UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL - UFRGS
PROGRAMA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA - PROPAR

Egon Vettorazzi

Contribuições das estratégias do conceito *Passive House* para edificações energeticamente mais eficientes na Região Sul-Brasileira

Porto Alegre, 2019.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL – UFRGS
PROGRAMA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA - PROPAR

Egon Vettorazzi

CONTRIBUIÇÕES DAS ESTRATÉGIAS DO CONCEITO *PASSIVE HOUSE* PARA EDIFICAÇÕES ENERGETICAMENTE MAIS EFICIENTES NA REGIÃO SUL-BRASILEIRA

Orientadora: Betina Tschiedel Martau, Profª. Drª. (UFRGS)

Porto Alegre, RS
2019

CIP - Catalogação na Publicação

Vettorazzi, Egon
Contribuições das estratégias do conceito Passive House para edificações energeticamente mais eficientes na Região Sul-Brasileira / Egon Vettorazzi. -- 2019.
371 f.
Orientadora: Betina Tschiedel Martau.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Arquitetura, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura, Porto Alegre, BR-RS, 2019.

1. Passive House. 2. Eficiência Energética. 3. Arquitetura Passiva. 4. Conforto Térmico. 5. Otimização de Projeto. I. Tschiedel Martau, Betina, orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE ARQUITETURA
PROGRAMA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA

CONTRIBUIÇÕES DAS ESTRATÉGIAS DO CONCEITO *PASSIVE HOUSE* PARA EDIFICAÇÕES ENERGETICAMENTE MAIS EFICIENTES NA REGIÃO SUL-BRASILEIRA

EGON VETTORAZZI

Tese apresentada ao Programa de Pesquisa e Pós-Graduação em Arquitetura - PROPAR – da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Arquitetura.

Área de concentração: Projeto de Arquitetura e Urbanismo

Orientadora: Betina Tschiedel Martau, Profª. Drª. (UFRGS)

Porto Alegre, RS
2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE ARQUITETURA
PROGRAMA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA

CONTRIBUIÇÕES DAS ESTRATÉGIAS DO CONCEITO *PASSIVE HOUSE* PARA EDIFICAÇÕES ENERGETICAMENTE MAIS EFICIENTES NA REGIÃO SUL-BRASILEIRA

EGON VETTORAZZI

Tese apresentada ao Programa de Pesquisa e Pós-Graduação em Arquitetura - PROPAR – da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Arquitetura. Área de concentração: Projeto de Arquitetura e Urbanismo. Orientadora: Betina Tschiedel Martau, Profª. Dra.

Membros da Banca:

Betina Tschiedel Martau, Profª. Dra.
(Orientadora – PROPAR UFRGS)

Benamy Turkienicz, Prof. Ph.D.
(PROPAR UFRGS)

Eduardo Grala da Cunha, Prof. Dr.
(PROGRAU UFPEL)

Helenice Maria Sacht, Profª. Dra.
(UNILA)

Romeu Vicente, Prof. Ph.D.
(UA - Portugal)

Porto Alegre, RS
2019

AGRADECIMENTOS

Agradeço à UFRGS, por possibilitar a realização do doutorado, à UNILA e ao ILATIT pela licença de dois anos. Ao PROPAR, especialmente, à Rosita Borges e Caroline Reck, pelo pronto-auxílio, ao corpo docente e aos colegas, em especial, ao Cláudio Nuss, Renato Tunzinho e Tarso Hoffmeister. Aos professores que aceitaram participar da banca de qualificação e da banca final. À professora Lucia Mascaró, pela orientação, pela paciência, por todo conhecimento e experiência transmitida. À professora Betina Martau, por aceitar a orientação e pelo auxílio durante todo processo. Ao professor Eduardo Grala, da UFPEL, pelo apoio fundamental durante todas as etapas. Ao LabCEE da UFPEL, em especial, à Renata Dalbem e ao Rodrigo Leitzke, pelo auxílio essencial. À Universidade de Aveiro e ao professor Romeu Vicente, pelas contribuições e pelos conhecimentos compartilhados. Aos colegas e amigos do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, Holger Quispe e membros da Associação Casa Passiva de Portugal, António Figueiredo, Rui Oliveira e Filipe Rebelo, pelas grandes contribuições. Aos amigos Helenice Sacht, Pedro Martins, (responsável pelos desenhos da linha do tempo), Marcelo Langner, pelo auxílio em diferentes etapas. Aos colegas da Unila, professores, servidores técnicos e estudantes do curso de Arquitetura e Urbanismo pela compreensão e apoio. Ao Renato Pedrotti, pelo auxílio nas simulações computacionais. A todos amigos e familiares que contribuíram, direta ou indiretamente, com a realização deste trabalho.

"Um desperdício de energia consumida para pensar, amar, criar, atuar, opinar, transformar, sentir, projetar, executar. Essas energias não se esgotam nunca. Pelo contrário. A humanidade precisa de um consumo cada vez maior delas. As outras – as que movem o mundo do material, as que resfriam e aquecem os nossos edifícios – cuidemos delas!"

Lúcia Mascaró (1983, p. 9).

RESUMO

VETTORAZZI, E. **Contribuições das estratégias do conceito *Passive House* para edificações energeticamente mais eficientes na Região Sul-Brasileira**. 2019. 371 f. Tese (Doutorado em Arquitetura) – Programa de Pesquisa e Pós-Graduação em Arquitetura, UFRGS, Porto Alegre, 2019.

O setor residencial é um dos principais setores responsáveis pelo elevado consumo energético e consequente emissões de gases com efeito estufa, no Brasil, e no mundo. Com a finalidade de que os edifícios sejam de consumo energético quase zero (NZEB) e de reduzir a pegada de carbono, muitos países membros da União Europeia e, mais recentemente da América do Norte, Ásia e Oceania, têm adotado progressivamente o conceito *Passive House* como estratégia para aumentar a eficiência energética, sem esquecer o conforto térmico e a qualidade ao ar interior nos edifícios. O objetivo do presente trabalho, é adaptar as estratégias do conceito *Passive House* a residências unifamiliares da Região Sul do Brasil, verificar qual o seu desempenho termoenergético e identificar quais as implicações no projeto arquitetônico. Para tal, a metodologia do trabalho foi estruturada em 6 etapas. Na etapa 1, realizou-se uma contextualização teórica sobre a relação entre energia, o meio ambiente e a arquitetura passiva no Brasil e no mundo, que foi sintetizada em linhas do tempo. Na etapa 2, foram selecionadas três edificações residenciais unifamiliares que constituem os estudos de casos, construídas com estratégias passivas básicas nas Zonas Bioclimáticas ZB1, ZB2 e ZB3 da Região Sul-Brasileira. Na etapa 3 procedeu-se à modelagem tridimensional da geometria das edificações referenciais para posterior simulação computacional nas etapas 4, 5 e 6. Na etapa 4, foi realizado a avaliação termoenergética das edificações através da classificação do nível de eficiência energética da envoltória segundo os Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R). Na etapa 5, foram determinadas as estratégias do conceito *Passive House* e verificado o desempenho termoenergético para cada uma das edificações em estudo. Por fim, na etapa 6 foram otimizadas as dimensões dos elementos de controle solar, assim como as dimensões das janelas, com e sem a otimização das estratégias *Passive House* das Edificações Referenciais. Como resultado, verificou-se que com a utilização do conceito *Passive House* há uma redução entre 55,1% e 83,5% no consumo energético e entre 73,7% e 86,2% no desconforto térmico numa base anual de conforto entre os 20-26ºC. Porém, com o conceito *Passive House* combinado com a otimização das dimensões das janelas e dos elementos de controle solar, obteve-se um desempenho termoenergético superior, com reduções do consumo energético entre 75,1% a 91,3% e do desconforto térmico entre 89,1% a 92,7%, embora a interferência há maior interferência no projeto arquitetônico. Sem a adoção das estratégias do conceito *Passive House* e otimizando-se apenas as dimensões das janelas e sombreamentos das edificações referenciais, conseguiu-se uma melhora no desempenho termoenergético relativamente baixa, com redução entre 5,3% e 10,9% do consumo energético e entre 5,8% e 8,7% do desconforto térmico. Contudo, nesse último caso, os resultados revelaram alterações significativas na definição das dimensões das janelas e dos elementos de controle solar externos. Conclui-se que, para as edificações das Zonas Bioclimáticas ZB1, ZB2 e ZB3 da Região Sul do Brasil que já possuem estratégias passivas básicas na sua concepção projetual, é possível utilizar o conceito *Passive House* sem interferir nas dimensões de janelas e nos elementos de controle solar externos, obtendo-se um desempenho termoenergético superior ao exigido pelo conceito *Passive House* para climas quentes.

Palavras chaves: Eficiência Energética; Arquitetura Passiva; Desempenho Termoenergético; Otimização de Projeto; Projeto Ótimo.

ABSTRACT

VETTORAZZI, E. **Contributions of the Passive House concept strategies for energy-efficient buildings in the South-Brazilian Region**. 2019. 371 f. Thesis (Doctorate in Architecture) – Architecture Research and Graduate Program, UFRGS, Porto Alegre, 2019.

The residential sector is one of the main responsible for the high energy consumption and consequent greenhouse gas emissions, in Brazil, and worldwide. In order to implement the Nearly Zero-Energy Buildings (NZEB) and to mitigate the building's carbon footprint, several European Union State Members, and more recently North America, Asia and Australia, have progressively adopted the Passive House concept as a strategy to increase the buildings energy efficiency, ensuring thermal comfort and indoor air quality. The goal of the present work is to adapt the Passive House concept strategies to single family dwellings located in the Southern Region of Brazil, in order to verify its thermo-energetic performance and to identify the potential impacts on the architectural project. The methodology of the work is structured in 6 stages. In stage 1, a theoretical contextualization on the relationship between energy, the environment and passive architecture in Brazil and in the world was performed and synthesized in timelines. In stage 2, three single-family residential buildings were selected, the three case studies analyzed in the present work, constructed with basic passive strategies in the ZB1, ZB2 and ZB3 bioclimatic zones of the South-Brazilian Region. In stage 3, the three-dimensional modeling of the geometry of the reference buildings was carried out for subsequent computational simulation in stages 4, 5 and 6. In stage 4, the thermo-energetic evaluation of the buildings was performed by classifying the energy efficiency level of the envelope according to the Technical Quality Requirements for the Energy Efficiency Level of Residential Buildings (RTQ-R). In stage 5, the Passive House concept strategies were determined and the thermo-energetic performance of each one of the case studies was verified. Finally, in stage 6 the dimensions of the solar control elements are optimized, as well as the dimensions of the windows, with and without the optimization of the Passive House strategies of the Referential Buildings. Regarding the obtained results, it was verified that with the use of the Passive House concept there is a reduction between 55.1% and 83.5% in energy consumption and between 73.7% and 86.2% in thermal discomfort, for an annual comfort base between 20-26ºC. Combining the Passive House concept with the optimized windows and external solar control elements, a superior thermo-energetic performance was achieved, with reductions in energy consumption between 75.1% and 91.3% and thermal discomfort between 89.1% and 92.7%, although increasing the influence on the architectural design. Without adopting the Passive House concept strategies and optimizing only the dimensions of the windows and the external solar control elements of the reference buildings, a relatively low improvement in the thermo-energetic performance was achieved, with a reduction between 5.3% and 10.9 % of the energy consumption and between 5.8% and 8.7% of thermal discomfort. However, in the latter case, the results revealed significant changes in the definition of window dimensions and external solar control elements. It is concluded that, for the buildings of the bioclimatic zones ZB1, ZB2 and ZB3 of the South of Brazil, which already have passive strategies in their conception design, it is possible to use the Passive House concept without interfering with the dimensions of windows and elements of external solar control, achieving a higher thermal performance than required by the Passive House concept for hot climates.

Keywords: Energy Efficiency; Passive Architecture; Thermo-energetic Performance; Project Optimization; Optimal project.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Figura 1-1: Inter-relação recíproca entre arquitetura, meio ambiente e energia. 31

Figura 1-2: Alterações de temperatura de 191 países do mundo. 33

Figura 1-3: Emissão de CO_2 no mundo em 1973 (Mt CO_2). 34

Figura 1-4: Emissão de CO_2 no mundo em 2015 (Mt CO_2). 34

Figura 1-5: Total de energia primaria fornecida em 1973. 34

Figura 1-6: Total de energia primaria fornecida em 2015. 34

Figura 1-7: Gráfico da geração, oferta e consumo de energia elétrica no Brasil: ano base 2016. 35

Figura 1-8: Gráfico comparativo do consumo de energia elétrica no Brasil entre as edificações e os outros setores (1970 a 2016). 35

Figura 1-9: Consumo de energia elétrica no Brasil, por setores, entre 1970 e 2016. 36

Figura 1-10: Gráfico com percentual de consumo de energia residencial no Brasil. 37

Figura 1-11: Gráfico com percentual de consumo de energia residencial na Região Sul do Brasil. 37

CAPÍTULO 2

Figura 2-1: Adão de Filarete, expulso do Paraíso. 44

Figura 2-2: Iglu: moradia para clima de frio extremo 45

Figura 2-3: Moradia africana para clima quente extremo 45

Figura 2-4: Cavernas de Massafra, na região italiana de Puglia. 45

Figura 2-5: Terra Amata, abrigo do Homo erectus, Nice – França (400.000 – 300.000 a.C.). 45

Figura 2-6: Cabana do homem de Cro-Magnon, Ucrânia, (44.000 a 12.000 a.C.). 45

Figura 2-7: *Megaron* típica grega 47

Figura 2-8: *Megaron* tradicional e energeticamente eficiente proposta por Sócrates (400 a.C.). 47

Figura 2-9: Reconstrução de uma casa grega clássica na cidade de Priene. 48

Figura 2-10: Cidade de Olinto. 48

Figura 2-11: A sombra gerada pelas colunas do templo Partenon de Atenas (447 a 432 a.C.). 48

Figura 2-12: Evolução da planta dos templos gregos. 48

Figura 2-13: Hipocausto, túneis aquecidos por uma fornalha para aquecer o ambiente e caldário para aquecer a água (séc. I a.C.). 49

Figura 2-14: Heliocaminus: grandes aberturas envidraçadas para reter o calor e grande massa térmica (I d.C.). 50

Figura 2-15: Casa átrio romana (200 a.C.). 50

Figura 2-16: Cobertura móvel do Coliseu em Roma (68-79 d.C.). 50

Figura 2-17: Quarto no convento de Muenster, Suíça (1512). 51

Figura 2-18: Vitrais da catedral de Sainte-Chapelle, Paris, (1248). 51

Figura 2-19: Villa Rotonda, Vicenza (1566). 52

Figura 2-20: Cortinas externas do Procuratie Vecchie, São Marcos, Vicenza (1586-1640). 52

Figura 2-21: Villa Costozza, Itália (1550). 53

Figura 2-22: Villa Rotonda, Vicenza (1566). 53

Figura 2-23: Prensa solar para impressão de Abel Pifre (1880). 55

Figura 2-24: Esquema de uma caixa de aquecimento solar de Saussure (1767). 55

Figura 2-25: Jardim de inverno como extensão da casa (séc. XIX) 56

Figura 2-26: Jardins de inverno na cobertura (séc. XIX). 56

Figura 2-27: *Great Conservatory*, Joseph Paxton (1836). 56

Figura 2-28: Palácio de Cristal, Joseph Paxton (1851). 56

Figura 2-29: Desenhos da patente do primeiro aquecedor solar de Moser, com três formas de operação (1881). 57

Figura 2-30: A casa de Morse em Salem, Massachusetts, (1881). 57

Figura 2-31: Estudos de sombras de Augustin Rey (1912). 59

Figura 2-32: Estudos de Atkinson para a cidade de Boston (1904). 60

Figura 2-33: “Casa solar” construída por Atkinson em (1912). 60

Figura 2-34: Uma das formas de utilizar o sistema “Climax” (1892). 61

Figura 2-35: Sistema de aquecimento de água "*Day and Night*" (1911). 61
Figura 2-36: Motor do primeiro sistema de ar-condicionado (1902). 62
Figura 2-37: Implantação da comunidade solar suíça em Neubühl (1932). 64
Figura 2-38: Comunidade solar suíça em Neubühl: áreas envidraçadas predominantemente para sul. 64
Figura 2-39: Primeiro Heliodon (1931-32). 65
Figura 2-40: Diagramas solares, Gropius (1930). 65
Figura 2-41: Diagrama solar de Keck (1936). 65
Figura 2-42: Diagrama solar de Le Corbusier (1938). 65
Figura 2-43: Projeto de escritórios de Le Corbusier em Argel (1938)..... 66
Figura 2-44: House of Tomorrow (1933). 67
Figura 2-45: MIT Solar House I (1939). 67
Figura 2-46: Sloan House, Keck, Chicago (1940). 68
Figura 2-47: Sloan House, Keck, Chicago (1940). 68
Figura 2-48: "Boulder House", Colorado, EUA (1945). 69
Figura 2-49: "MIT Solar House II", (1947). 69
Figura 2-50: "MIT Solar House III", (1949). 69
Figura 2-51: Fachada Sul da Dover Sun House, (1948). 69
Figura 2-52: Anúncio da energia nuclear em revista (1956). 71
Figura 2-53: "Denver House" (1956). 72
Figura 2-54: "Solar Building" (1956). 72
Figura 2-55: "MIT Solar House IV" (1959). 72
Figura 2-56: Fachada Sul da "St. George's School de Wallasey" (1974). 74
Figura 2-57: "Michel–Trombe House", Odeillo, França (1967). 74
Figura 2-58: Exterior da "Steve Baer House" (1971). 76
Figura 2-59: "Roof Pond System", Atascadero, Califórnia (1973)..... 76
Figura 2-60: "MIT Solar House V" (1978). 76
Figura 2-61: "Lo-Cal House" (1976). 77
Figura 2-62: "The Saskatchewan Conservation House" (1977). 77
Figura 2-63: "Leger House", EUA, fachada sul (1979). 77
Figura 2-64: Vista para o Sudoeste da "DTU Zero Energy House", Dinamarca (1974). 78
Figura 2-65: "Philips Experimental House", Alemanha, vista do sul (1974). 78
Figura 2-66: Casa Tedeschi, primeira casa solar da Argentina (1981). 80
Figura 2-67: A Casa solar de La Plata (1981). 80
Figura 2-68: "Self-Sufficient Solar House" (1992). 81
Figura 2-69: "Heliotrope" (1994). 81
Figura 2-70: Solarsiedlung, edificações residenciais e comerciais com energia positiva (2004). 82
Figura 2-71: Esquema demonstrando o controle e o aproveitamento da radiação solar. 82
Figura 2-72: Registros arqueológicos da Serra da Capivara, com pinturas rupestres (17000 a.C.). 85
Figura 2-73: Toca habitada na Serra da Capivara, perto de São Raimundo Nonato, alto sertão do Piauí. 85
Figura 2-74: Casa unitária dos Ianomâmis, fronteira entre Brasil e Venezuela. 86
Figura 2-75: Interior casa do Ianomâmis. 86
Figura 2-76: Planta da casa do Ianomâmis. 86
Figura 2-77: Pátio central de habitação coletiva Ianomâmis, Amazonas. 86
Figura 2-78: Habitação coletiva Ianomâmis vista de seu interior. 86
Figura 2-79: Oca do Alto Xingu – 25 m de comprimento, 10 m de largura, 7 m de altura. 87
Figura 2-80: Algumas soluções de utilização dos "buracos de bugre" apresentadas por arqueólogos. 88
Figura 2-81: Três abrigos indígenas pampeanos. 88
Figura 2-82: Exemplo de provável edificação residencial do século XVI. 89
Figura 2-83: Janela com escuro. 90
Figura 2-84: Janelas geminadas. 90
Figura 2-85: Provável configuração da senzala no século XVI. 91
Figura 2-86: Muxabis de uma rua central do Rio de Janeiro (final do séc. XVIII). 94
Figura 2-87: Muxarabi corrido da Casa Chica da Silva, Diamantina MG (séc. XVII). 94
Figura 2-88: Janela colonial com dois escuros com abertura para o interior. 95
Figura 2-89: Janela com balaústre na Igreja da Sé de Mariana (séc. XVIII). 95
Figura 2-90: Rótula em São Paulo, Parnaíba. 95
Figura 2-91: Gelosia, São Paulo, (séc. XVIII). 95
Figura 2-92: Urupemas. 95
Figura 2-93: Igreja de São Miguel, São Paulo (1622). 95
Figura 2-94: Casa do Padre Inácio, São Paulo: varanda da fachada principal (séc. XVII). 95
Figura 2-95: Varanda da fazenda de Ilhabela, São Paulo (séc. XVIII). 95
Figura 2-96: Varanda da Senzala do Engenho Matas, Cabo Santo Agostinho, Pernambuco (séc. XIII). 96
Figura 2-97: Varanda nas Missões Jesuíticas de São Miguel (séc. XVII). 96

Figura 2-98: Fazenda Capão Alto, Capão Alto – PR (séc. XVIII). 96
Figura 2-99: Pátio interno da Estância Arvorezinha, Piratini (séc. XVIII). 97
Figura 2-100: Evolução dos fechamentos: A trajetória da casa brasileira segundo Lucio Costa. 98
Figura 2-101: Janelas com folhas de vidro, Porto Alegre-RS (séc. XIX). 99
Figura 2-102: Janela em guilhotina com vidros, Fazenda da Palma, Pelotas-RS (1819). 99
Figura 2-103: Janela com vidro e veneziana, Casarão Mendonça, Pelotas-RS (séc. XIX). 99
Figura 2-104: Residência do final com corredor lateral alpendrado (séc. XIX). 100
Figura 2-105: Residência-Sede da Charqueada São João, Pelotas-RS (1810). 100
Figura 2-106: Planta baixa da Fazenda das Almas, Piratini-RS (séc. XIX). 100
Figura 2-107: Casa de Azulejos, Rio Grande-RS, (1862). 101
Figura 2-108: Fachada de azulejos portugueses, Recife -PE (séc. XIX). 101
Figura 2-109: Sobrado Português, Porto Alegre-RS (1866). 101
Figura 2-110: Residência urbana colonial sem platibanda (séc. XVII, XVIII). 101
Figura 2-111: Residência urbana no segundo reinado com platibanda (1840/1889). 101
Figura 2-112: Térreo com porão alto. 102
Figura 2-113: Sobrado com porão alto. 102
Figura 2-114: Residência geminada eclética com porão alto habitável. 102
Figura 2-115: Forro ventilado: gamela. São Luís, MA (séc. XIX). 102
Figura 2-116: Bandeira fixa vazada em gradil de ferro, São Luís, MA (1835). 102
Figura 2-117: Óculo para ventilação no Chalé em Nova Friburgo – RJ (pós 1870). 102
Figura 2-118: Casa do Arquiteto – Guarujá – Ricardo Severo (1922). 104
Figura 2-119: Pavilhão das Pequenas Indústrias – Nestor de Figueiredo e San Juan (1922). 104
Figura 2-120: Casarão dos Bica – Porto Alegre – Arq. Fernando Corona (1929-1937) 104
Figura 2-121: Casa Modernista da Rua Santa Cruz de Gregori Warchavchik (1927-28). 105
Figura 2-122: Casa Modernista da Rua Itápolis de Gregori Warchavchik (1929-30). 105
Figura 2-123: Edifício da ABI, irmãos Roberto (1936-38). 106
Figura 2-124: Edifício Obra do Berço, Oscar Niemeyer (1939). 106
Figura 2-125: Ministério da Educação e Saúde: Fachada noroeste protegido com brises horizontais móveis e verticais fixos (1936 -43). 107
Figura 2-126: Ministério da Educação e Saúde: Fachada sudoeste com vidros expostos, sem proteção (1936 - 43). 107
Figura 2-127: Casa Casado D'Azevedo (1950) 108
Figura 2-128: Residência Cândido Norberto (1952). 108
Figura 2-129: Palácio da Justiça (1953). 108
Figura 2-130: Exterior da Caixa d´Água de Olinda (1935). 109
Figura 2-131: Parque Guinle (1954). 109
Figura 2-132: Superquadra de Brasília (1957) 110
Figura 2-133: Edifício Avenida Central, Rio de Janeiro, Arq. Henrique Mindlin (1958-61). 110
Figura 2-134: Casa Ennio Cruz da Costa, Porto Alegre, (déc. 1970). 112
Figura 2-135: Parede trombe e ventilação por efeito chaminé (fachada norte) (1987). 112
Figura 2-136: Hospital Sarah de Brasília (1975-80). 113
Figura 2-137: Hospital Sarah do Rio de Janeiro (2000-2008). 113
Figura 2-138: Hospital da Rede Sarah, Salvador (1994). 116
Figura 2-139: Shopping Brasília, Brasília (1997). 116
Figura 2-140: Casa Eficiente da UFSC (2006). 120
Figura 2-141: Casa E da UFRGS (2009). 120
Figura 2-142: *Trend City Center*, Porto Alegre (2015). 120
Figura 2-143: PMCMV em Uberlândia-MG: mesma geometria com diferentes orientações. 120

CAPÍTULO 3

Figura 3-1: *Passive House* de Darmstadt, Alemanha (1991), primeira edificação com conceitos de Wolfgang Feist e Bo Adamson: Fachada Sul (HN). 123
Figura 3-2: *Passive House* de Darmstadt, Alemanha (1991), primeira edificação com conceitos de Wolfgang Feist e Bo Adamson: Fachada Norte (HN). 123
Figura 3-3: Estratégias passivas básicas e estratégias *Passive House*. 124
Figura 3-4: *Passive House* no mundo. 125
Figura 3-5: *Passive House* na Europa. 125
Figura 3-6: Classificação do conceito *Passive Houses: Classic, Plus* e *Premium*. 126

Figura 3-7: Estação de Bombeiros em Heidelberg (Alemanha).....127
Figura 3-8: Edifício educacional, 2012 (Correia do Sul). 127
Figura 3-9: PH em estrutura metálica: Edifício residencial, 2006 (Suíça). 127
Figura 3-10: PH com revestimento de bambu: Edifício Residencial, 2009 (França). 127
Figura 3-11: *Passive House* em Santiago, Chile: Agência do Banco (BCI) (2010-2011). 130
Figura 3-12: *Passive House*, Cidade do México, México (2013). 130
Figura 3-13: Edificação estudada para aplicação do conceito *Passive House*. 131
Figura 3-14: *Passive House* de Natal-RN (2018). 132
Figura 3-15: Planta Baixa da *Passive House* de Natal-RN (2018). 132
Figura 3-16: Orientação solar *Passive House* 134
Figura 3-17: Impacto da radiação solar em superfícies de um edifício com diferentes orientações. 135
Figura 3-18: Compacidade (C) e Fator de Forma (FF) de diferentes tipologias de edificações 137
Figura 3-19: Edificações de mesma área e compacidades (C) diferentes. 137
Figura 3-20: Relação entre forma irregular e isolamento térmico. 138
Figura 3-21: Relação do isolamento térmico e espessuras de diferentes composições construtivas. 141
Figura 3-22: Mesmo edifício sem e com superisolamento. 142
Figura 3-23: Exemplo de locais com possíveis pontes térmicas em uma edificação. 143
Figura 3-24:Termografia identificando pontes térmicas em uma edificação em Saragoça, Espanha. 144
Figura 3-25: Relação da geometria com as pontes térmicas. 144
Figura 3-26: Exemplo de forma regular: Edifício de Escritórios, Chile (2011). 144
Figura 3-27: Exemplo de forma irregular: Edifícios de Apartamentos, Estônia (2006-2012) 144
Figura 3-28: Esquema da relação da proporção de aberturas (HS) e integração visual com o exterior. 147
Figura 3-29: Exemplo de recuperador de calor. 149
Figura 3-30: Analogia entre um sistema de recuperador de calor e a respiração humana. 149
Figura 3-31: Exemplo de espaços utilizados para o sistema de ventilação mecânica com recuperador de calor. 149
Figura 3-32: Relação entre volume e consumo de energia. 150

CAPÍTULO 4

Figura 4-1: Esquema simplificado das três principais etapas do *EnergyPlus*. 155
Figura 4-2: *Plugin Euclid* v. 0.9.3 dentro do *SketchUp* v. 2017 *Make*. 156
Figura 4-3: Interface do programa de edição do *Input Data File* (IDF) do *EnergyPlus*: IDF Editor 157
Figura 4-4: Interface do *EP-Launch* e suas principais funções. 158
Figura 4-5: Da modelagem à manipulação dos resultados. 158
Figura 4-6: Exemplo do uso do EMS no *EnergyPlus*.159
Figura 4-7: Otimização evolutiva multiobjetivo: da modelagem a manipulação dos resultados. 162
Figura 4-8: ENCE geral de Projeto (a) e ENCE geral da Edificação Construída (b) para Unidades Habitacionais Autônomas. 163
Figura 4-9: Exemplificação “graus-hora” de resfriamento (GH_R). 165

CAPÍTULO 5

Figura 5-1: Esquema da metodologia adotada. 168
Figura 5-2: Zonas Bioclimáticas da Região Sul do Brasil. 170
Figura 5-3: Zoneamento bioclimático brasileiro. 171
Figura 5-4: Gráfico da Temperatura de Bulbo Seco e Umidade Relativa. 172
Figura 5-5: Carta solar de Bento Gonçalves. 172
Figura 5-6: Ângulos solares ao meio dia dos solstícios e do equinócio. 172
Figura 5-7: Gráfico da Temperatura de Bulbo Seco e Radiação Solar. 173
Figura 5-8: Gráfico da Temperatura de Bulbo Seco e Umidade Relativa. 174
Figura 5-9: Carta solar de Bento Gonçalves. 174
Figura 5-10: Ângulos solares ao meio dia dos solstícios e do equinócio. 174
Figura 5-11: Gráfico da Temperatura de Bulbo Seco e Radiação Solar. 175
Figura 5-12: Gráfico da Temperatura de Bulbo Seco e Umidade Relativa 176
Figura 5-13: Carta solar de Florianópolis. 176
Figura 5-14: Ângulos solares ao meio dia dos solstícios e do equinócio. 176
Figura 5-15: Gráfico da Temperatura de Bulbo Seco e Radiação Solar 177
Figura 5-16: Fachada principal, sul. 179
Figura 5-17: Fachada dos fundos, norte. 179
Figura 5-18: Implantação Residência ZB1. 180

Figura 5-19: Planta Baixa da Residência ZB1. 180
Figura 5-20: Percentual de horas de radiação solar em cada fachada durante o ano. 181
Figura 5-21: Paredes equivalentes externas da Residência ZB1. 183
Figura 5-22: Parede equivalente interna da Residência ZB1. 183
Figura 5-23: Fachada principal, leste. 184
Figura 5-24: Implantação da Residência ZB2. 184
Figura 5-25: Planta Baixa. 185
Figura 5-26: Percentual de radiação solar em cada fachada durante o ano. 186
Figura 5-27: Parede equivalente interna e externa da Residênia ZB2. 187
Figura 5-28: Fachada principal, leste. 188
Figura 5-29: Fachada fundos, oeste. 188
Figura 5-30: Implantação Residência ZB3. 189
Figura 5-31: Planta Baixa. 189
Figura 5-32: Percentual de horas de radiação solar em cada fachada durante o ano. 190
Figura 5-33: Parede equivalente externa e interna da Residência ZB3. 191
Figura 5-34: Residência ZB1, edificação modelada com as zonas térmicas. 193
Figura 5-35: Zonas térmicas da edificação Residencial ZB1. 193
Figura 5-36: Residência ZB2, edificação modelada com as zonas térmicas. 194
Figura 5-37: Zonas térmicas da edificação Residencial ZB2. 195
Figura 5-38: Residência ZB3, edificação modelada com as zonas térmicas. 196
Figura 5-39: Zonas térmicas da edificação residencial ZB3. 196
Figura 5-40: Método de classificação do nível de eficiência energética da envoltória do RTQ-R. 205
Figura 5-41: Processo da otimização multiobjetivo para *Passive House* 209
Figura 5-42: Quadrante PH, VPH e PFM 210
Figura 5-43: Esquema do isolamento térmico dos fechamentos opacos da Residência ZB1 210
Figura 5-44: Esquema do isolamento térmico dos fechamentos opacos da Residência ZB2 211
Figura 5-45: Esquema do isolamento térmico dos fechamentos opacos da Residência ZB3 211
Figura 5-46: Processo da otimização multiobjetivo para dimensionamento de janelas e elementos de controle solar com e sem o conceito *Passive House*. 214
Figura 5-47: Nomenclatura das janelas a otimizar. . 216
Figura 5-48: Dimensões mínimas e máximas das janelas a otimizar da Residência ZB1 217
Figura 5-49: Dimensões mínimas e máximas dos elementos de controle solar externos a otimizar na Residência ZB1 218
Figura 5-50: Nomenclatura das janelas a otimizar . 218
Figura 5-51: Dimensões mínimas e máximas dos elementos de controle solar externos a otimizar da Residência ZB2 220
Figura 5-52: Dimensões mínimas e máximas dos elementos de controle solar externos a otimizar da Residência ZB2 220
Figura 5-53: Nomenclatura das janelas otimizadas. 221
Figura 5-54: Dimensões mínimas e máximas das janelas a otimizar da Residência ZB3 223
Figura 5-55: Dimensões mínimas e máximas dos elementos de controle solar externos a otimizar da Residência ZB3 223

CAPÍTULO 6

Figura 6-1: Classificação do nível de eficiência energética da envoltória da Residência ZB1 234
Figura 6-2: Classificação do nível de eficiência energética da envoltória da Residência ZB2 235
Figura 6-3: Classificação do nível de eficiência energética da envoltória da Residência ZB3 236
Figura 6-4: Gráfico das temperaturas da residência ZB1 ventilada naturalmente (VN). 237
Figura 6-5: Percentual de horas em conforto e desconforto da Residência Referencial ZB1 ventilada naturalmente (VN). 238
Figura 6-6: Gráfico das temperaturas da Residência Referencial ZB1 com condicionamento artificial (AC). 239
Figura 6-7: Percentual de horas em conforto e desconforto da Residência Referencial ZB1 e o consumo energético (AC). 240
Figura 6-8: Consumo energético mensal (AC) de refrigeração (CR) e aquecimento (CA) na Residência Referencial ZB1. 241
Figura 6-9: Consumo energético anual (AC) para aquecimento e refrigeração na Residência Referencial ZB1 241
Figura 6-10: Gráfico das temperaturas da residência ZB2 ventilada naturalmente (VN). 242
Figura 6-11: Percentual de horas em conforto e desconforto da Residência ZB2 ventilada naturalmente (VN). 243
Figura 6-12: Gráfico das temperaturas da Residência Referencial ZB2 com condicionamento artificial (AC). 244

Figura 6-13: Percentual de horas em conforto e desconforto da Residência Referencial ZB2 e o consumo energético (AC). 245
Figura 6-14: Consumo energético mensal (AC) de refrigeração (CR) e aquecimento (CA) na Residência ZB2. 246
Figura 6-15: Consumo energético (AC) anual para aquecimento e refrigeração na Residência ZB2. .. 246
Figura 6-16: Gráfico das temperaturas da Residência Referencial ZB3 ventilada naturalmente (VN). 247
Figura 6-17: Percentual de horas em conforto e desconforto da Residência ZB3 ventilada naturalmente (VN). 247
Figura 6-18: Gráfico das temperaturas da Residência Referencial ZB3 com condicionamento artificial (AC). 248
Figura 6-19: Percentual de horas em conforto e desconforto da Residência ZB3 e o consumo energético (AC). 249
Figura 6-20: Consumo energético (AC) mensal de refrigeração (CR) e aquecimento (CA) na Residência ZB3. 250
Figura 6-21: Consumo energético (AC) anual para aquecimento e refrigeração na Residência ZB3 ... 250
Figura 6-22: Percentual de horas em conforto e desconforto da Residência ZB1, ZB2 e ZB3 ventilada naturalmente (VN) e condicionadas artificialmente (AC). 251
Figura 6-23: Consumo energético (AC) de aquecimento (CA) e refrigeração (CR) das Residências ZB1, ZB2 e ZB3 252
Figura 6-24: Resultado das simulações de otimizações: Residência ZB1 PH 255
Figura 6-25: Percentual de horas em conforto, desconforto e o consumo energético (MVHR): Residência ZB1 PH (PFM) 257
Figura 6-26: Consumo energético mensal (MVHR) para aquecimento (CA) e refrigeração (CR) 257
Figura 6-27: Consumo energético anual (MVHR) para aquecimento (CA) e refrigeração (CR) 257
Figura 6-28: Resultado das simulações de otimizações: Residência ZB2 PH 258
Figura 6-29: Resultado das simulações de otimizações: Residência ZB2 PH VN 259
Figura 6-30: Percentual de horas em conforto, desconforto e o consumo energético (MVHR): Residência ZB2 PH VN (VPH) 262
Figura 6-31: Consumo energético mensal (MVHR) para aquecimento (CA) e refrigeração (CR) 262
Figura 6-32: Consumo energético anual (MVHR) para aquecimento (CA) e refrigeração (CR) 262
Figura 6-33: Resultado das simulações de otimizações: Residência ZB3 PH 263
Figura 6-34: Resultado das simulações de otimizações: Residência ZB3 PH VN 263
Figura 6-35: Percentual de horas em conforto, desconforto e o consumo energético (MVHR): Residência ZB3 PH VN (PFM) 265
Figura 6-36: Consumo energético mensal (MVHR) para aquecimento (CA) e refrigeração (CR) 266
Figura 6-37: Consumo energético anual (MVHR) para aquecimento (CA) e refrigeração (CR) 266
Figura 6-38: Soluções das otimizações com conceito PH 267
Figura 6-39: Percentual de horas em conforto e desconforto e consumo energético anual. 268
Figura 6-40: Valores da redução do consumo energético e do desconforto térmico das Residências ZB1, ZB2 e ZB3 com a aplicação do conceito *Passive House* em relação às edificações referenciais. 270
Figura 6-41: Comparativo da diminuição do consumo energético entre as soluções 271
Figura 6-42: Comparativo da diminuição do desconforto entre as soluções 271
Figura 6-43: Resultados das simulações para otimização do dimensionamento das janelas e elementos de controle solar externos: Residência ZB1 DIM 273
Figura 6-44: Residência ZB1 DIM, percentual de variação do dimensionamento de janelas e elementos de controle solar externos. 276
Figura 6-45: Percentual de horas em conforto, desconforto e o consumo energético (AC): Residência ZB1 DIM (PFM) 276
Figura 6-46: Consumo energético mensal (AC) para aquecimento (CA) e refrigeração (CR) 277
Figura 6-47: Consumo energético anual (AC) para aquecimento (CA) e refrigeração (CR) 277
Figura 6-48: Resultados das simulações para otimização do dimensionamento das janelas e elementos de controle solar externos: Residência ZB1 DIM PH 277
Figura 6-49: Residência ZB1 DIM PH, percentual de variação do dimensionamento de janelas e elementos de controle solar externos. 281
Figura 6-50: Percentual de horas em conforto, desconforto e o consumo energético (MVHR): Residência ZB1 DIM PH (PFM) 282
Figura 6-51: Consumo energético mensal (MVHR) para aquecimento (CA) e refrigeração (CR) 282
Figura 6-52: Consumo energético anual (MVHR) para aquecimento (CA) e refrigeração (CR) 282
Figura 6-53: Resultados das simulações para otimização do dimensionamento das janelas e

elementos de controle solar externos: Residência ZB2 DIM 283
Figura 6-54: Residência ZB2 DIM, percentual de variação do dimensionamento de janelas e elementos de controle solar externos. 285
Figura 6-55: Percentual de horas em conforto, desconforto e o consumo energético (AC): Residência ZB2 DIM (PFM)..... 286
Figura 6-56: Consumo energético mensal (AC) para aquecimento (CA) e refrigeração (CR) 286
Figura 6-57: Consumo energético anual (AC) para aquecimento (CA) e refrigeração (CR) 286
Figura 6-58: Resultados das simulações para otimização do dimensionamento das janelas e elementos de controle solar externos: Residência ZB2 DIM PH VN 287
Figura 6-59: Residência ZB2 DIM PH VN, percentual de variação do dimensionamento de janelas e elementos de controle solar externos. 290
Figura 6-60: Percentual de horas em conforto, desconforto e o cons. energético (MVHR): Residência ZB2 DIM PH VN (PFM) 291
Figura 6-61: Consumo energético mensal (MVHR) para aquecimento (CA) e refrigeração (CR) 291
Figura 6-62: Consumo energético anual (MVHR) para aquecimento (CA) e refrigeração (CR) 291
Figura 6-63: Resultados das simulações para otimização do dimensionamento das janelas e elementos de controle solar externos: Residência ZB3 DIM 292
Figura 6-64: Residência ZB3 DIM, percentual de variação do dimensionamento de janelas e elementos de controle solar externos. 295
Figura 6-65: Percentual de horas em conforto, desconforto e o consumo energético (AC): Residência ZB3 DIM (PFM)..... 295
Figura 6-66: Consumo energético mensal (AC) para aquecimento (CA) e refrigeração (CR) 296
Figura 6-67: Consumo energético anual (AC) para aquecimento (CA) e refrigeração (CR) 296
Figura 6-68: Resultados das simulações para otimização do dimensionamento das janelas e elementos de controle solar externos: Residência ZB3 DIM PH VN 297
Figura 6-69: Residência ZB3 DIM PH VN, percentual de variação do dimensionamento de janelas e elementos de controle solar externos. 300
Figura 6-70: Percentual de horas em conforto, desconforto e o consumo energético (MVHR): Residência ZB3 DIM PH VN (PFM)..... 301
Figura 6-71: Consumo energético mensal (MVHR) para aquecimento (CA) e refrigeração (CR) 301
Figura 6-72: Consumo energético anual (MVHR) para aquecimento (CA) e refrigeração (CR) 301
Figura 6-73: Otimização Residência Referencial 302
Figura 6-74: Otimização com conceito PH 302
Figura 6-75: Percentual de horas em conforto e desconforto e consumo energético anual 303
Figura 6-76: Comparativo da diminuição do consumo energético entre as soluções 304
Figura 6-77: Comparativo da diminuição do desconforto térmico entre as soluções..... 305
Figura 6-78: Residência ZB1, soluções de dimensionamento de janelas e elementos de controle solar externos 307
Figura 6-79: Residência ZB2, soluções de dimensionamento de janelas e elementos de controle solar externos 307
Figura 6-80: Residência ZB3, soluções de dimensionamento de janelas e elementos de controle solar externos 308
Figura 6-81: Residências ZB1, ZB2 e ZB3: soluções de dimensionamento de janelas e elementos de controle solar externos 309
Figura 6-82: Comparativo da diminuição das janelas entre as soluções 309
Figura 6-83: Comparativo da variação dos elementos de controle solar externos entre as soluções 310

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 3

Tabela 3-1: Projeto *Passive-On*: resumo dos resultados do consumo energético 129

CAPÍTULO 5

Tabela 5-1: Dados climáticos mensais de Bento Gonçalves. 173
Tabela 5-2: Dados climáticos mensais de Santa Maria. 175
Tabela 5-3: Dados climáticos mensais de Florianópolis. 177
Tabela 5-4: Critérios atendidos para definição das edificações referenciais. 179
Tabela 5-5: Compacidade e Fator de Forma da Residência ZB1*. 181
Tabela 5-6: Resumo das propriedades dos materiais da Residência ZB1. 182
Tabela 5-7: Dados da envoltória do projeto. 183
Tabela 5-8: Compacidade e Fator de Forma da Residência ZB3. 186
Tabela 5-9: Resumo das propriedades dos materiais da Residência ZB2. 187
Tabela 5-10: Dados da envoltória do projeto. 188
Tabela 5-11: Compacidade e Fator de Forma da Residência ZB3. 190
Tabela 5-12: Resumo das propriedades dos materiais da Residência ZB3. 191
Tabela 5-13: Dados da envoltória do projeto. 192
Tabela 5-14**:** Características das zonas térmicas da Residência ZB1 194
Tabela 5-15**:** Características das zonas térmicas da Residência ZB2. 195
Tabela 5-16**:** Características das zonas térmicas da Residência ZB3 197
Tabela 5-17: Número de pessoas por ambiente. 197
Tabela 5-18: Padrão de ocupação para dias de semana e final de semana. 197
Tabela 5-19: Taxas metabólicas para cada atividade. 198
Tabela 5-20: Agenda de Iluminação para dias de semana e final de semana. 198
Tabela 5-21: Temperaturas médias mensais do solo para as Residências ZB1, ZB2 e ZB3 200
Tabela 5-22: Pré-requisitos de absortância solar, transmitância térmica e capacidade térmica para as ZB 1, 2 e 3. 201
Tabela 5-23: Classificação dos níveis de eficiência energética dos ambientes de permanência prolongada de acordo com o RTQ-R 203
Tabela 5-24: Classificação da envoltória da edificação de acordo com o RTQ-R 204
Tabela 5-25: Total de simulações para a classificação do nível de eficiência energética da envoltória e diagnóstico termoenergético. 205
Tabela 5-26: Resumo dos parâmetros simulados 208
Tabela 5-27: Total de simulações da etapa. 209
Tabela 5-28: Valores de transmitâncias atuais e máximos propostos para as Residências ZB1, ZB2 e ZB3 212
Tabela 5-29: Propriedade térmicas utilizadas para as janelas. 212
Tabela 5-30: Total de simulações da etapa. 215
Tabela 5-31: Dimensões atuais, mínimas e máximas propostas por ambiente para as janelas da Residência ZB1 216
Tabela 5-32: Percentual de janelas por orientação solar 217
Tabela 5-33: Dimensionamento dos elementos de proteção solar externos da Residência ZB1 218
Tabela 5-34: Dimensões atuais, mínimas e máximas propostas por ambiente para as janelas da Residência ZB2 219
Tabela 5-35: Percentual de janelas por orientação solar 219
Tabela 5-36: Dimensionamento dos elementos de proteção solar externos da Residência ZB2 221
Tabela 5-37: Dimensões atuais, mínimas e máximas, propostas para as janelas da Residência ZB3 222
Tabela 5-38: Percentual de janelas por orientação solar 222
Tabela 5-39: Dimensionamento dos elementos de proteção solar externa da Residência ZB3 224

CAPÍTULO 6

Tabela 6-1: Verificação do atendimento aos pré-requisitos nas paredes externas Residência ZB1 .. 229
Tabela 6-2: Verificação do atendimento aos pré-requisitos na cobertura Residência ZB1 229
Tabela 6-3: Verificação do atendimento ao pré-

requisito de ventilação para Residência ZB1 229
Tabela 6-4: Verificação do atendimento ao pré-requisito de ventilação cruzada para Residência ZB1 230
Tabela 6-5: Verificação do atendimento ao pré-requisito de iluminação natural 230
Tabela 6-6: Verificação do atendimento aos pré-requisitos nas paredes externas Residência ZB2 . 230
Tabela 6-7: Verificação do atendimento aos pré-requisitos na cobertura Residência ZB2 230
Tabela 6-8: Verificação do atendimento ao pré-requisito de ventilação para Residência ZB2 231
Tabela 6-9: Verificação do atendimento ao pré-requisito de ventilação cruzada para Residência ZB2 231
Tabela 6-10: Verificação do atendimento ao pré-requisito de iluminação natural para Residência ZB2 231
Tabela 6-11: Verificação do atendimento aos pré-requisitos nas paredes externas Residência ZB3 . 231
Tabela 6-12: Verificação do atendimento aos pré-requisitos na cobertura Residência ZB3 232
Tabela 6-13: Verificação do atendimento ao pré-requisito de ventilação para Residência ZB3 232
Tabela 6-14: Verificação do atendimento ao pré-requisito de ventilação cruzada para Residência ZB3 232
Tabela 6-15: Verificação do atendimento ao pré-requisito de iluminação natural para Residência ZB3 232
Tabela 6-16: Média percentual anual de horas em conforto e desconforto na Residência Referencial ZB1 ventilada naturalmente. 238
Tabela 6-17: Média percentual anual de horas em conforto e desconforto na Residência ZB1 ventilada naturalmente e condicionada artificialmente. 240
Tabela 6-18: Média percentual anual de horas em conforto e desconforto na Residência ZB2 ventilada naturalmente (VN). 243
Tabela 6-19: Média percentual anual de horas em conforto e desconforto na Residência Referencial ZB2 ventilada naturalmente (VN) e condicionada artificialmente (AC). 245
Tabela 6-20: Média percentual anual de horas em conforto e desconforto na Residência ZB3 ventilada naturalmente (VN). 248
Tabela 6-21: Média percentual anual de horas em conforto e desconforto na Residência ZB3 ventilada naturalmente (VN) e condicionada artificialmente (AC). 249
Tabela 6-22: Requisitos para consumo energético e sobreaquecimento para o conceito *Passive House*. 256
Tabela 6-23: Resultados das soluções *Passive House* para a ZB1 PH (PFM e VPH) 256
Tabela 6-24: Requisitos para consumo energético e sobreaquecimento para o conceito *Passive House*. 260
Tabela 6-25: Abertura de janelas. 260
Tabela 6-26: Resultados das soluções para a Residência ZB2 PH VN (VPH) 261
Tabela 6-27: Requisitos de consumo energético e sobreaquecimento para o conceito *Passive House*. 264
Tabela 6-28: Abertura de janelas. 264
Tabela 6-29: Resultados das soluções para a Residência ZB3 PH VN (PFM e VPH) 265
Tabela 6-30: Abertura de janelas. 267
Tabela 6-31: Resultados resumidos das soluções *Passive House* para a ZB1, ZB2 e ZB3 269
Tabela 6-32: Consumo energético e desconforto térmico. 274
Tabela 6-33: Resultado das dimensões das janelas otimizadas da Residência ZB1 DIM (PFM) 274
Tabela 6-34: Percentual de janelas das fachadas dos ambientes de permanência prolongada pela orientação solar: Residência ZB1 DIM (PFM) 275
Tabela 6-35: Dimensionamento otimizado dos elementos de proteção solar da Residência ZB1 DIM (PFM) 275
Tabela 6-36: Requisitos de consumo energético e sobreaquecimento para o conceito *Passive House*. 278
Tabela 6-37: Resultados das soluções *Passive House* para a Residência ZB1 DIM PH (PFM e VPH) 279
Tabela 6-38: Resultado das dimensões das janelas otimizadas da Residência ZB1 DIM PH (PFM e VPH) 279
Tabela 6-39: Percentual de janelas das fachadas dos ambientes de permanência prolongada pela orientação solar: Residência ZB1 DIM PH (PFM e VPH) 280
Tabela 6-40: Dimensionamento otimizado dos elementos de proteção solar da Residência ZB1 DIM PH (PFM e VPH) 281
Tabela 6-41: Consumo energético e desconforto ... 283
Tabela 6-42: Resultado das dimensões das janelas otimizadas da Residência ZB2 DIM (PFM) 284
Tabela 6-43: Percentual de janelas das fachadas dos ambientes de permanência prolongada pela orientação solar: Residência ZB2 DIM (PFM) 284
Tabela 6-44: Dimensionamento otimizado dos elementos de proteção solar da Residência ZB2 DIM

(PFM)..... 285
Tabela 6-45: Requisitos de consumo energético e sobreaquecimento para o conceito *Passive House*. 287
Tabela 6-46: Abertura de janelas. 288
Tabela 6-47: Resultados das soluções *Passive House* para a Residência ZB2 DIM PH VN (PFM e VPH) .. 288
Tabela 6-48: Resultado das dimensões das janelas otimizadas da Residência ZB2 DIM PH VN (PFM e VPH) 289
Tabela 6-49: Percentual de janelas das fachadas dos ambientes de permanência prolongada pela orientação solar: Residência ZB2 DIM PH VN (PFM e VPH) 289
Tabela 6-50: Dimensionamento otimizado dos elementos de proteção solar da Residência ZB2 DIM PH VN (PFM e VPH) 290
Tabela 6-51: Requisitos de consumo energético e sobreaquecimento para o conceito *Passive House*. 293
Tabela 6-52: Resultado das dimensões das janelas otimizadas da Residência ZB3 DIM (PFM) 293
Tabela 6-53: Percentual de janelas das fachadas dos ambientes de permanência prolongada pela orientação solar: Residência ZB3 DIM (PFM) 294
Tabela 6-54: Dimensionamento otimizado dos elementos de proteção solar da Residência ZB3 DIM (PFM)..... 294
Tabela 6-55: Requisitos de consumo energético e sobreaquecimento para o conceito *Passive House*. 297
Tabela 6-56: Abertura de janelas. 298
Tabela 6-57: Resultados das soluções *Passive House* para a Residência ZB3 DIM PH VN (PFM e VPH)... 298
Tabela 6-58: Resultado das dimensões das janelas otimizadas da Residência ZB3 DIM PH VN (PFM e VPH) 299
Tabela 6-59: Percentual de janelas das fachadas dos ambientes de permanência prolongada pela orientação solar: Residência ZB3 DIM PH VN (PFM e VPH) 299
Tabela 6-60: Dimensionamento otimizado dos elementos de proteção solar da Residência ZB3 DIM PH VN (PFM e VPH) 300
Tabela 6-61: Abertura de janelas. 303
Tabela 6-62: Resultados comparativos das otimizações de dimensionamento de elementos de controle solar externos juntamente com o conceito PH 306

LISTA DE QUADROS

CAPÍTULO 3

Quadro 3-1: Critérios passivos básicos para clima frio e quente. 151
Quadro 3-2: Critérios da *Passive House* para clima frio e quente 151

CAPÍTULO 5

Quadro 5-1: Resumo dos dados climáticos de Bento Gonçalves. 173
Quadro 5-2: Resumo dos dados climáticos de Bento Gonçalves. 175
Quadro 5-3: Resumo dos dados climáticos de Florianópolis. 177
Quadro 5-4: Zona Bioclimática e edificações em estudo. 178
Quadro 5-5: Arquivos climáticos utilizados. 199
Quadro 5-6: Critérios para simulação computacional de ambiente ventilado naturalmente e condicionado artificialmente. 203

CAPÍTULO 6

Quadro 6-1: Acionamento dos sistemas de condicionamento térmico das edificações AC, PH e PH VN 254
Quadro 6-2: Acionamento dos sistemas de condicionamento térmico das edificações AC, PH e PH VN 272

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASHRAE *American Society of Heating, Refrigerating and AirConditioning Engineers*

BEN Balanço Energético Nacional

BLAST *Building Loads Analysis and Thermodynamics*

CA Consumo relativo de energia para aquecimento

CAPES Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

CEASE Conjunto de Edilício Solar de Alta Densidade

CIAM Congresso Internacional de Arquitetura Moderna

CR Consumo relativo de energia para refrigeração

DOE *Department of Energy*

ENCE Etiqueta Nacional de Conservação de Energia

ENTAC Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

EPW *EnergyPlus Weather Data File*

ERV *Energy Recovery Ventilators*

FF Fator de Forma

GH_R Graus-Hora Resfriamento

HN Hemisfério Norte

HS Hemisfério Sul

INMET Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia

LABAUT Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética Departamento de Tecnologia da Arquitetura da FAUUSP

LabCEE Laboratório de Conforto e Eficiência Energética da Universidade Federal de Pelotas

LabCon Laboratório de Conforto Ambiental da Faculdade de Arquitetura na Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LabEEE Laboratório de Eficiência Energética em Edificações da Universidade Federal de Santa Catarina

MEC Ministério da Educação e Cultura

MIT *Instituto de Tecnologia de Massachusetts*

MVHR *Ventilação mecânica com recuperador de calor*

NBR Norma Brasileira

NZEB *Nearly Zero Energy Building*

PBE Programa Brasileiro de Etiquetagem

PH *Passive House*

PMCMV Programa Minha Casa Minha Vida

Procel Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica

RAC Requisitos de Avaliação da Conformidade para Eficiência Energética de Edificações

RAC-C Requisitos de Avaliação da Conformidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicos

RAC-R Requisitos de Avaliação da Conformidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais

RIBA *Royal Institute of British Architects*

RTQ-C Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos

RTQ-R Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais

TBS Temperatura de Bulbo Seco

UA Universidade de Aveiro

UFPel Universidade Federal de Pelotas

UFRGS Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UFSC Universidade Federal de Santa Catarina

UFSCar Universidade Federal de São Carlos

UFSM Universidade Federal de Santa Maria

UR Umidade Relativa

ZB Zona Bioclimática

ZT Zona Térmica

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO 31

1.1 CONTEXTO E JUSTIFICATIVA 31

1.2 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA 39

1.3 HIPÓTESE 40

1.4 OBJETIVOS 41

1.4.1 Objetivo geral 41

1.4.2 Objetivos específicos 41

1.5 ESTRUTURA DA TESE 41

CAPÍTULO 2. CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA SOBRE A ARQUITETURA E A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA 43

2.1 ARQUITETURA PASSIVA NO MUNDO 44

2.1.1 Período pré-Revolução Industrial (século XII a.C a XIII d.C) 44

2.2.2 Pós-Revolução Industrial (século XVIII a XIX) 54

2.2.3 Século XX 58

2.2.4 Século XXI: A Atualidade da arquitetura passiva 82

2.2 SÍNTESE DA ARQUITETURA PASSIVA NO MUNDO 83

2.3 ARQUITETURA PASSIVA NO BRASIL 84

2.3.1 Pré-História Brasileira 84

2.3.2 Período pós chegada dos europeus ao Brasil (século XIV a XIX) 88

2.3.3 Século XX 103

2.3.4 Século XXI: Consolidação dos laboratórios de conforto ambiental, intensificação do uso de programas computacionais e normalizações 117

2.4 SÍNTESE DA ARQUITETURA PASSIVA NO BRASIL 121

CAPÍTULO 3. O CONCEITO *PASSIVE HOUSE* 123

3.1 O CONCEITO *PASSIVE HOUSE* EM CLIMAS QUENTES 128

3.2 ESPECIFICAÇÃO DOS PRINCIPAIS REQUISITOS DAS ESTRATÉGIAS PASSIVAS BÁSICAS E DAS ESTRATÉGIAS DO CONCEITO *PASSIVE HOUSE* 132

3.2.1 Estratégias Passivas Básicas 134

3.2.2 Estratégias do conceito Passive House 140

3.3 SÍNTESE DOS REQUISITOS PARA A ARQUITETURA PASSIVA BÁSICA E DO CONCEITO *PASSIVE HOUSE* 150

CAPÍTULO 4. A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL TERMOENERGÉTICA COMO FERRAMENTA DE PESQUISA 153

4.1 A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL TERMOENERGÉTICA 153

4.2 O PROGRAMA DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL *ENERGYPLUS* 154

4.2.1 Sistema de Gerenciamento de Energia (EMS) 159

4.3 OTIMIZAÇÃO EVOLUTIVA MULTIOBJETIVO 160

4.4 RTQ-R E OS CRITÉRIOS PARA REALIZAR AS SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS DE DESEMPENHO TERMOENERGÉTICO 162

4.4.1 Simulação computacional da edificação ventilada naturalmente e condicionada artificialmente 164

CAPÍTULO 5. METODOLOGIA 167

5.1 ETAPA 1: SÍNTESE HISTÓRICA COM BASE NA ELABORAÇÃO DE LINHA DO TEMPO DA ARQUITETURA PASSIVA NO MUNDO E NO BRASIL 169

5.2 ETAPA 2: DEFINIÇÃO DE CRITÉRIOS E SELEÇÃO DAS EDIFICAÇÕES REFERENCIAIS PARA O ESTUDO DE CASO 169

5.2.1 As Zonas Bioclimáticas e as cidades representativas 170

5.2.2 Definições das edificações referenciais 177

5.2.3 As Residências ZB1, ZB2 e ZB3 e a descrição das soluções construtivas 179

5.3 ETAPA 3: MODELAGEM DA GEOMETRIA E CONFIGURAÇÃO DOS PARÂMETROS PARA SIMULAÇÃO 192

5.3.1 Modelagem da geometria 192

5.3.2 Configuração do uso e ocupação das edificações 197

5.3.3 Arquivos climáticos utilizados 199

5.3.4 Temperatura de Conforto 199

5.3.5 Configuração da temperatura do solo 199

5.4 ETAPA 4: CLASSIFICAÇÃO DO NÍVEL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DA ENVOLTÓRIA (RTQ-R) E DIAGNÓSTICO TERMOENERGÉTICO 200

5.4.1 Classificação do nível de eficiência energética da envoltória (RTQ-R) 200

5.4.2 Diagnóstico termoenergético 205

5.5 ETAPA 5: APLICAÇÃO OTIMIZADA DAS ESTRATÉGIAS *PASSIVE HOUSE* 206

5.5.1 Isolamento térmico 210

5.5.2 Janelas eficientes 212

5.5.3 Estanqueidade 213

5.5.4 Ventilação Mecânica com Recuperador de Calor 213

5.6 ETAPA 6: OTIMIZAÇÃO DO DIMENSIONAMENTO DE JANELAS E ELEMENTOS DE CONTROLE SOLAR EXTERNOS 213

5.6.1 Residência ZB1 216

5.6.2 Residência ZB2 218

5.6.3 Residência ZB3 221

CAPÍTULO 6. RESULTADOS 225

6.1 SÍNTESE HISTÓRICA DAS EDIFICAÇÕES PASSIVAS NO BRASIL E NO MUNDO 225

6.2 CLASSIFICAÇÃO DO NÍVEL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DA ENVOLTÓRIA (RTQ-R) E DIAGNÓSTICO TERMOENERGÉTICO 229

6.2.1 Atendimento aos pré-requisitos da envoltória 229

6.2.2 Classificação do nível de eficiência energética da envoltória, pelo método de simulação do RTQ-R. 233

6.2.3 Diagnóstico termoenergético das edificações referenciais 236

6.2.4 Síntese dos resultados 250

6.3 APLICAÇÃO OTIMIZADA DAS ESTRATÉGIAS *PASSIVE HOUSE* 253

6.3.1 Residência ZB1 254

6.3.2 Residência ZB2 258

6.3.3 Residência ZB3 262

6.3.4 Síntese dos resultados 266

6.4 OTIMIZAÇÃO DO DIMENSIONAMENTO DE JANELAS E ELEMENTOS DE CONTROLE SOLAR EXTERNOS 271

6.4.1 Residência ZB1 273

6.4.2 Residência ZB2 282

6.4.3 Residência ZB3 292

6.4.4 Síntese dos resultados 302

6.5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS 310

6.5.1 Síntese histórica da arquitetura passiva 311

6.5.2 Classificação do nível de eficiência energética da envoltória (RTQ-R) e diagnóstico termoenergético 311

6.5.3 Aplicação otimizada das estratégias do Conceito Passive House 313

6.5.4 Otimização do dimensionamento de janelas e elementos de controle solar externos 314

CAPÍTULO 7. CONCLUSÕES 317

7.1 ADAPTAÇÃO DAS ESTRATÉGIAS *PASSIVE HOUSE* E DESEMPENHO TERMOENERGÉTICO NAS ZONAS BIOCLIMÁTICAS ZB1, ZB2 E ZB3 SUL-BRASILEIRAS 317

7.2 IMPLICAÇÕES DAS ESTRATÉGIAS *PASSIVE HOUSE* NO PROJETO ARQUITETÔNICO 319

7.3 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS 322

REFERÊNCIAS 325

APÊNDICES 335

APÊNDICE A: REGIÃO SUL DO BRASIL: ZONAS BIOCLIMÁTICAS ZB1, ZB2 E ZB3 335

APÊNDICE B: FATOR DE FORMA (FF) E COMPACIDADE (C) 336

APÊNDICE C: TABELAS DE PROPRIEDADE DOS MATERIAIS 337

APÊNDICE D: PERCENTUAL VENTILAÇÃO/ILUMINAÇÃO DE JANELAS 340

APÊNDICE E: CLASSIFICAÇÃO DO NÍVEL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DA ENVOLTÓRIA 341

APÊNDICE F: EXEMPLO PROGRAMAÇÃO EMS 342

APÊNDICE G:EXEMPLO DE CONFIGURAÇÃO DE PARÂMETROS PARA SIMULAÇÃO COM O ALGORITMO 343

APÊNDICE H: DIMENSÕES ATUAIS, MÍNIMAS E MÁXIMAS DAS JANELAS (RELATIVO A ÁREA DO PISO DO AMBIENTE) 344

APÊNDICE I: DIMENSÕES ATUAIS, MÍNIMAS E MÁXIMAS DAS JANELAS (RELATIVO A FACHADA DO AMBIENTE) 346

APÊNDICE J: LINHAS DO TEMPO DA ARQUITETURA PASSIVA NO MUNDO 347

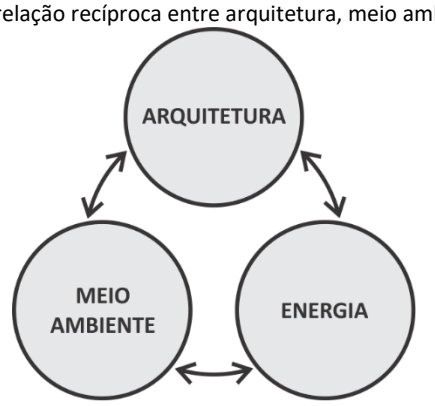
APÊNDICE K: LINHA DO TEMPO DA ARQUITETURA PASSIVAS NO BRASIL 359

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO E JUSTIFICATIVA

Com a crescente demanda mundial de energia [1] e a intensificação de problemas ambientais decorrentes do aquecimento global e da escassez de recursos naturais, tais como a água, intensificou-se a preocupação da comunidade internacional com a influência que as edificações podem ter sobre os recursos naturais e energéticos. Nesse sentido, é fundamental que se compreenda o papel da arquitetura na inter-relação recíproca com o meio ambiente e a questão relacionada à produção, fornecimento e consumo de energia (Figura 1-1).

Figura 1-1: Inter-relação recíproca entre arquitetura, meio ambiente e energia.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Ao longo da história da humanidade, sempre que ocorre abundância de recursos naturais e energéticos, a arquitetura não tem se mostrado preocupada com os fatores locais, consumindo de maneira descomedida recursos para obtenção de conforto térmico. De forma oposta, quando a crise ambiental e energética é eminente, a arquitetura volta-se para estratégias que busquem o menor consumo de energia e não degradem o meio ambiente, adotando, para isso, estratégias passivas adaptadas ao clima. A arquitetura passiva[2] é, assim, mais flexível e independente, adequando-se aos dois cenários, enquanto que a arquitetura alheia ao clima é mais frágil, pois depende da energia.

Desde a antiguidade, a arquitetura procura, por meio da adaptação às condições climáticas específicas de cada local, proporcionar conforto ambiental aos usuários com o menor consumo energético

[1] A palavra *energia* significa atividade, originando-se do grego "ἐνέργεια (enérgeia)", que significa "ativo". No entanto, a palavra grega se divide em "ἐν (en)" (em) e "εργον (ergon)" (trabalho) de forma que energia pode ser definida também como algo com trabalho em si (ASIMOV, 1972).

[2] A arquitetura passiva é definida por Wassouf (2014) como aquela que existe desde a Antiguidade e que se adapta às condições climáticas de seu entorno.

possível. Na Grécia e na Roma Antigas, por exemplo, o consumo excessivo de lenha para aquecer as edificações nos períodos frios levou à devastação de florestas, sendo necessário encontrar alternativas para que a arquitetura se adequasse ao clima com a menor dependência energética possível. No século passado, a crise internacional do petróleo na década 1970, juntamente com o aumento populacional dos grandes centros urbanos, fez com que muitos arquitetos repensassem o uso indiscriminado de sistemas de climatização artificial, como o uso de ar-condicionado, em favor de uma arquitetura mais apropriada ao clima e, consequentemente, com menor consumo de energia. No Brasil, por sua vez, a preocupação com a eficiência energética na arquitetura aumentou principalmente após os "apagões"[3] das últimas décadas, quando a crise no setor energético obrigou o país a buscar medidas mais eficientes quanto à racionalização de energia elétrica. Dessa forma, a construção de edificações que leva em conta questões climáticas não pode ser entendida somente como um idealismo, mas como uma necessidade energética e ambiental para a sobrevivência humana.

A integração entre arquitetura e clima é um dos assuntos de maior relevância para a redução do consumo energético e a diminuição da necessidade de produção de energia. Smith (2012) destaca que é apropriado que o projeto e a construção dos edifícios sejam o fator principal no esforço para diminuir os efeitos da mudança climática. Desse modo, a eficiência energética na arquitetura é objeto de constante investigação, com vistas ao desenvolvimento de novas tecnologias e disposições construtivas que reduzam o consumo energético e a emissão de gases de efeito estufa. Silva e Kinsel (2006, p. 6), afirmam:

> [...] é importante que novas maneiras de pensar o ambiente e inovações na arquitetura e prática construtiva sejam exploradas para prover mais e melhores ambientes, principalmente nos países em desenvolvimento e combinando as aspirações de desenvolvimento da população, e com a redução ou supressão da necessidade de equipamentos mecânicos para o conforto (SILVA; KINSEL, 2006, p. 6).

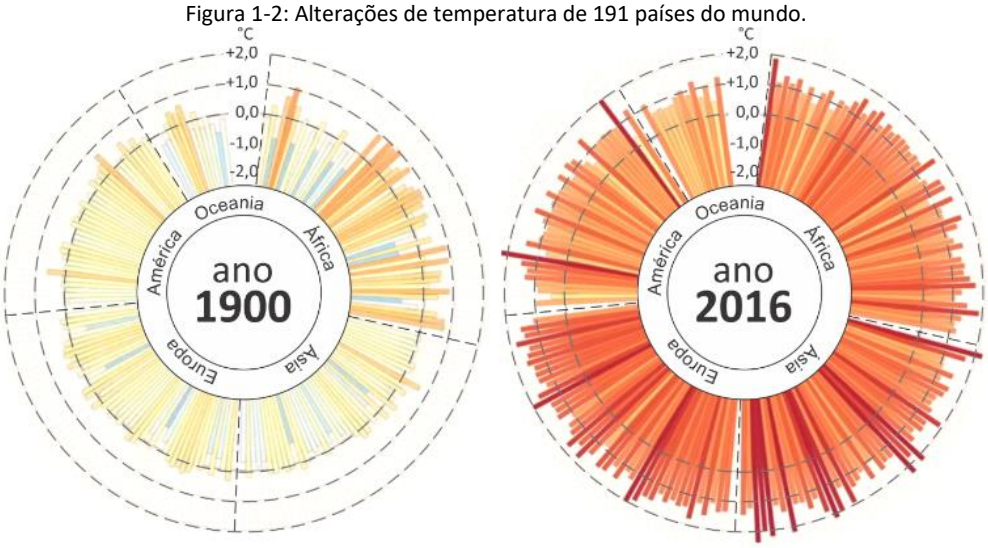
Prado (2006), afirma que os prédios atuais têm pouca ou nenhuma pertinência ao lugar, sendo inapropriados à realidade em que se inserem e demonstrando a incapacidade dos arquitetos em projetar em consonância com o clima e com as técnicas e materiais construtivos do local. Segundo o autor, essa realidade é agravada devido ao aumento da demanda por energia elétrica em um contexto atual de escassez de recursos naturais.

> [...] a importação indiscriminada de modelos externos produziu ao longo de nossa história, e ainda produz largamente nos dias de hoje, exemplares de arquiteturas absolutamente inadequadas. E sua impertinência reside principalmente na sua incapacidade de considerar e por vezes até mesmo desprezar nossa realidade sob vários aspectos, e dentre eles o nosso clima (PRADO, 2006, p. 10).

[3] O termo "apagão" refere-se a uma crise nacional de fornecimento e distribuição de energia elétrica ocorrida entre os anos 2001 e 2002. No início da crise, levantou-se a hipótese de que talvez se tornasse necessário fazer longos cortes forçados de energia elétrica em todo Brasil, os quais deram origem ao termo. Nesse período, houve uma intensa campanha por um racionamento de energia. Em 21 de março de 2018, um novo apagão deixou 70 milhões de pessoas sem energia elétrica em 14 estados da Região Norte e Nordeste.

O aumento do consumo de energia no mundo, recentemente impulsionado pelo crescimento acelerado dos países em desenvolvimento, entre eles o Brasil, vem gerando impactos significativos na economia em escala global. A demanda de energia cresce, exponencialmente, e repercute no custo da energia, impactando de maneira generalizada no preço de diversos produtos essenciais à vida moderna, ao mesmo tempo em que se intensificam os problemas ambientais como o aquecimento global, o aumento do buraco na camada de ozônio, a emissão de CO_2 e a escassez de água, entre tantos outros (Figura 1-2).

Figura 1-2: Alterações de temperatura de 191 países do mundo.



Fonte: adaptado de Geospatialworld (2017).[4]

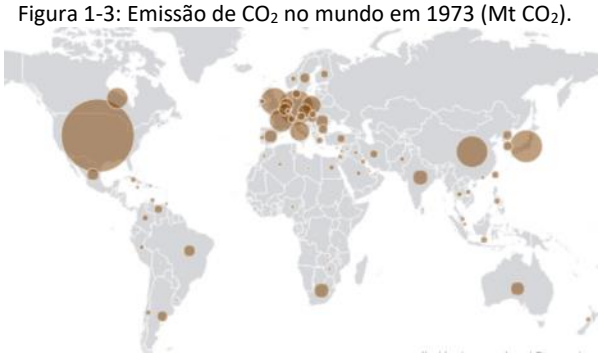
Em 2018, o consumo de energia cresceu 2,3% em todo o mundo e as emissões globais de CO_2 relacionadas à energia aumentaram 1,7% (IEA, 2019). Nos últimos 40 anos, o Brasil quadruplicou[5] a emissão de CO_2, passando da posição de 19º para a de 11º maior país emissor de CO_2 internacionalmente, tornando-se, atualmente, o primeiro da América Latina (Figura 1-3 e 1-4) (IEA, 2018b). A redução do consumo de energia em edificações torna-se, assim, uma das estratégias chave na mitigação da emissão de CO_2[6].

[4] Criado por Antti Lipponen, pesquisador do Instituto Meteorológico da Finlândia, com base em dados da NASA (*National Aeronautics and Space Administration* – Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço).

[5] Em 1973 o Brasil emitia 112,1 Mt CO_2 na atmosfera e em 2015 450,8 Mt CO_2 (IEA, 2018b).

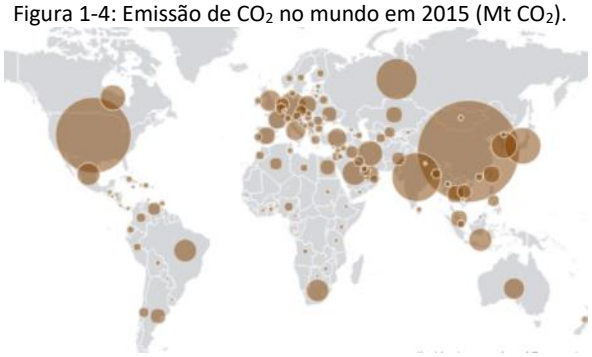
[6] "As emissões de CO_2 em edificações estão relacionadas ao consumo direto de energia, nas suas mais diversas fontes. Em todas as fases do ciclo de vida de um edifício o consumo de recursos naturais é impactante ao meio ambiente e à atmosfera – e, por ter uma longa vida útil e abrigar as mais diversas atividades humanas, a fase de uso e operação é de extrema importância [...] As emissões de carbono em edifícios podem se dar de maneira direta, quando há o consumo de fontes de energia primária (como a queima de combustíveis fósseis), e de maneira indireta, quando há o consumo de fontes secundárias, como é o caso da eletricidade" (INSTITUTO CLIMA E SOCIEDADE (ICS), 2017).

Figura 1-3: Emissão de CO_2 no mundo em 1973 (Mt CO_2).



Fonte: IEA (2018b).

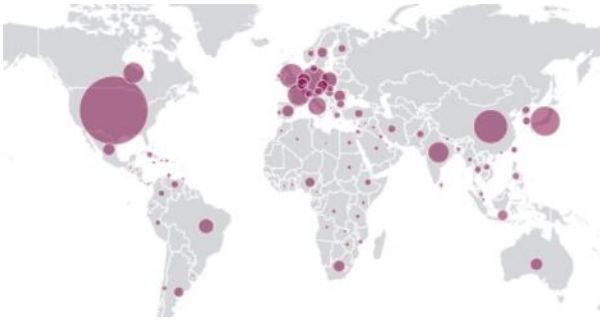
Figura 1-4: Emissão de CO_2 no mundo em 2015 (Mt CO_2).



Fonte: IEA (2018b).

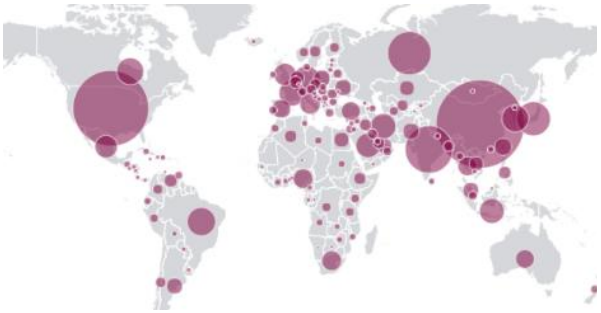
Nesse cenário de mudanças climáticas, a arquitetura tem um papel fundamental. Afinal, as edificações são responsáveis, mundialmente, por 40% do consumo de energia primária[7] e por 24% da emissão de gases de efeito de estufa (SHC/IEA, 2018). O consumo mundial de energia primária vem crescendo, exponencialmente, e, atualmente, o Brasil é o sexto país que mais consome esse tipo de energia no mundo, ficando atrás apenas da China, Estados Unidos, Índia, Rússia e Japão. Notadamente, entre 1973 e 2015, o consumo de energia no Brasil aumentou mais de três vezes[8] (Figura 1-5 e 1-6) (IEA, 2018a).

Figura 1-5: Total de energia primaria fornecida em 1973.



Fonte: IEA (2018a).

Figura 1-6: Total de energia primaria fornecida em 2015.



Fonte: IEA (2018a).

No Brasil, as edificações consomem 50,8% da energia elétrica, o setor residencial é responsável por 25,5%, seguido do setor comercial, com 17,1%, e do setor público, com 8,2% (EPE, 2018)[9]. A projeção é que o setor residencial represente 29,7% do consumo de energia elétrica em 2026 (EPE, 2017b). O gráfico da Figura 1-7 ilustra quais são as energias primárias no Brasil responsáveis pela produção de eletricidade e quais são os consumidores dessa energia gerada.

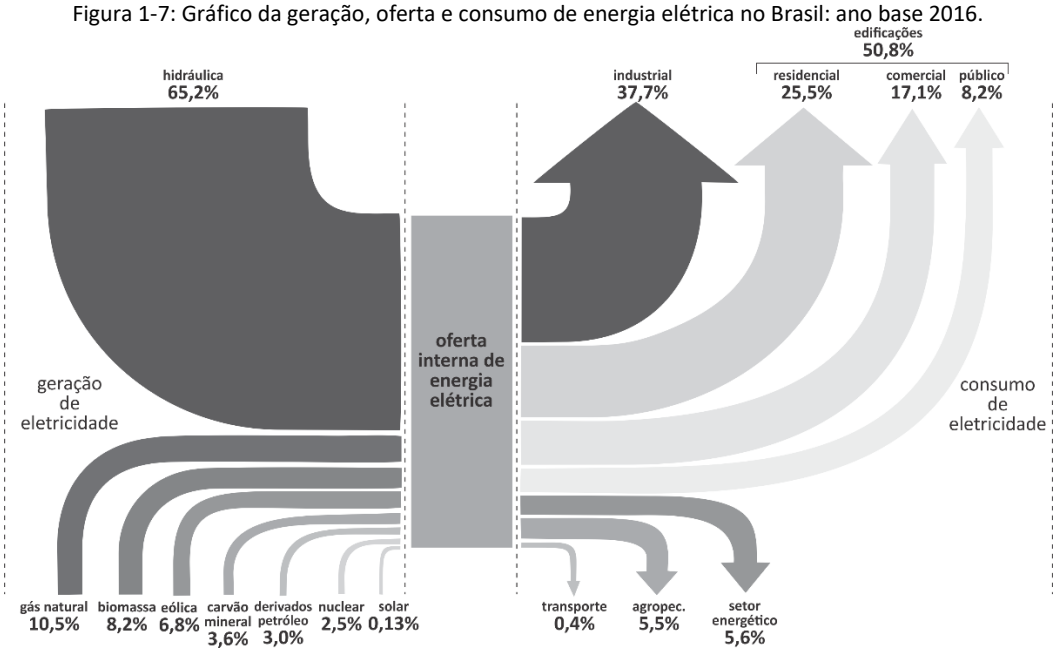
---

[7] Energias primárias são originadas das riquezas encontradas na natureza em estado bruto: a água, o sol, o vento, o petróleo, o carvão, o urânio, etc. A energia primária sofre transformações para dar origem à energia final (por exemplo, o carvão – energia primária - pode produzir eletricidade – energia final).

[8] Em 1973 o fornecimento de energia no Brasil era de 81,98 Mtep e em 2015 de 297,98 Mtep, correspondendo a um aumento de 3,63 vezes (IEA, 2018a).

[9] O último balanço do consumo de energia foi realizado em 2018, com dados referentes a 2017. O BEN é fornecido anualmente pela Empresa de Pesquisa de Energia (EPE) e fica disponível em: http://www.epe.gov.br/pt.

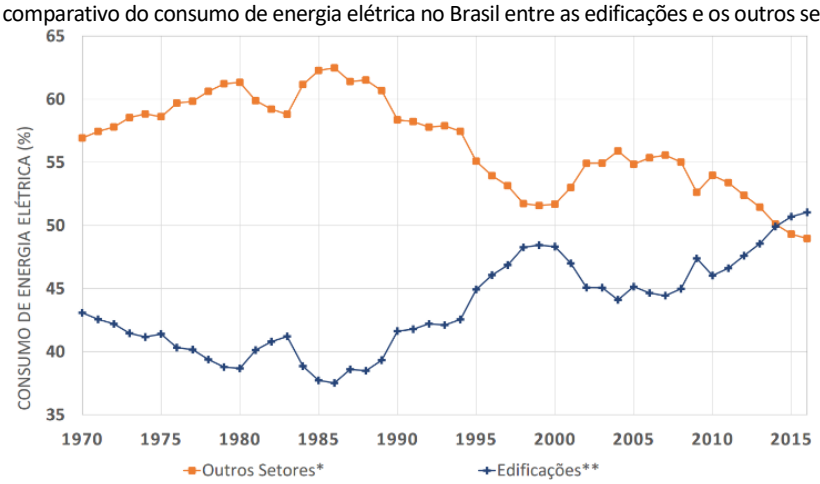
Figura 1-7: Gráfico da geração, oferta e consumo de energia elétrica no Brasil: ano base 2016.



* foram desconsideradas as perdas no consumo de eletricidade, que correspondem a 16,1%.
Fonte: adaptado de EPE (2018).

O consumo de energia elétrica das edificações, no Brasil, vem crescendo gradualmente ao longo dos anos, enquanto os outros setores somados apresentam uma diminuição de consumo. O gráfico da Figura 1-8 apresenta, comparativamente, o consumo energético percentual no Brasil, de 1970 até 2016, entre as edificações e os demais setores.

Figura 1-8: Gráfico comparativo do consumo de energia elétrica no Brasil entre as edificações e os outros setores (1970 a 2016).

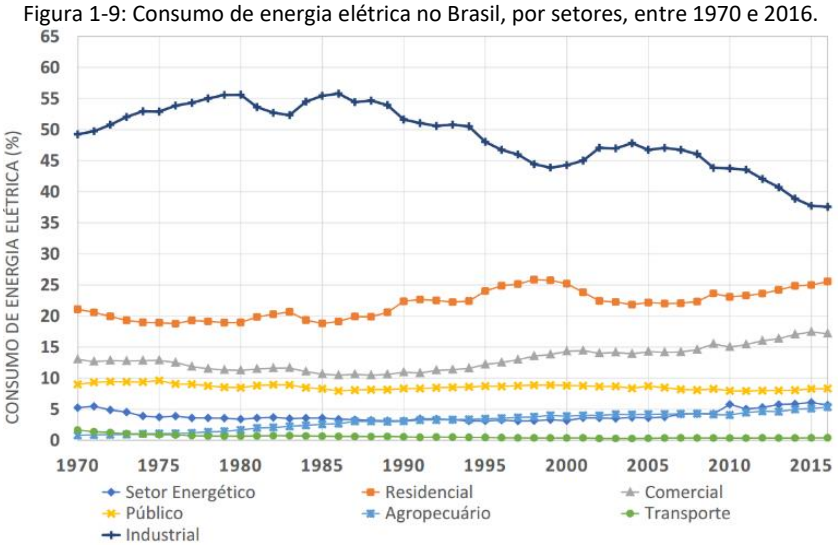


*Setor energético, industrial, agropecuário e transporte; ** Setor comercial, residencial e público.
Fonte: Desenvolvido pelo autor com base em EPE (2017a).

Entre os setores da edificação, o residencial e o comercial vêm apresentando crescimento praticamente contínuo no consumo de energia elétrica no Brasil, especialmente a partir de meados da década de 1950; tal crescimento apresentou uma queda nos anos 2000, voltando a progredir em 2005, o que se mantém até a atualidade. O consumo de energia elétrica no setor público, por sua vez, vem

apresentando uma leve queda, assim como o consumo do setor industrial, sobretudo a partir do final da década de 1980. O gráfico da Figura 1-9 ilustra o consumo elétrico percentual de todos os setores no Brasil, entre os anos de 1970 e 2016.

Figura 1-9: Consumo de energia elétrica no Brasil, por setores, entre 1970 e 2016.



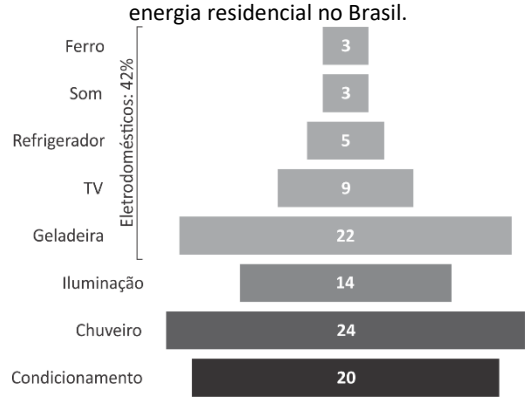
Fonte: Desenvolvido pelo autor com base em EPE (2017a).

A predominância do uso de ar-condicionado para se obter conforto, notadamente durante os períodos de maior calor no verão, é uma ameaça à estabilidade da rede pública de energia, segundo Strengers e Maller (2011). Em cidades de clima equatorial como Maracaibo, 76% do consumo energético residencial decorre do uso de ar-condicionado (BRAVO; GONZÁLEZ, 2013). Nas regiões ultramarinas tropicais francesas, incluindo a Guiana Francesa, território ao Norte do Brasil, reportaram um valor de 50% de climatização, o que provoca um crescimento do consumo energético total das edificações em 4% (GARDE *et al.* 2007).

Segundo o último levantamento publicado pela Eletrobras[10], no Brasil a situação é parecida, haja vista que 20% da energia elétrica consumida em uma edificação residencial é voltada para o condicionamento ambiental (Figura 1-10); note-se que esse mesmo consumo aumentaria para 26,3%, caso o chuveiro também não fosse aquecido por meio de eletricidade. Na Região Sul, o consumo percentual de energia pelo sistema de condicionamento ambiental é ainda maior, chegando a somar 32% de toda a energia consumida (Figura 1-11) (ELETROBRAS, 2007b). Nesse caso, se o chuveiro fosse aquecido por outra forma de energia, como a solar, o consumo de energia elétrica relacionada ao condicionamento chegaria aos 42,7%.

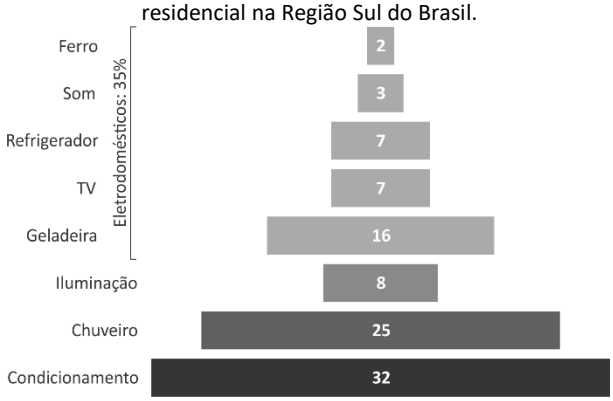
[10]Os dados de referência datam de 2005, ocasião do último levantamento publicado pela Eletrobras (ELETROBRAS, 2007b).

Figura 1-10: Gráfico com percentual de consumo de energia residencial no Brasil.



Fonte: Desenvolvido pelo autor com base em dados da Eletrobras (2007b).

Figura 1-11: Gráfico com percentual de consumo de energia residencial na Região Sul do Brasil.



Fonte: Desenvolvido pelo autor com base em dados da Eletrobras (2007b).

O consumo energético das edificações residenciais está aumentando substancialmente a cada ano, sendo o ar-condicionado o principal consumidor de energia elétrica na Região Sul do Brasil. Com o crescimento populacional, o desenvolvimento social e consequente aumento do poder aquisitivo, somados à diminuição dos preços dos aparelhos e à construção de edificações não adequadas ao clima, o uso de aparelhos de ar-condicionado será cada vez maior (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014). Como passamos cerca de 87% do tempo no interior de edificações (KLEPEIS *et al.*, 2001), o consumo energético para obter conforto higrotérmico de ambientes fechados tende a ser elevado.

A promoção do ar-condicionado como solução para o desconforto térmico inibe a busca do desenvolvimento e adoção de estratégias passivas por parte do setor residencial, segundo Strengers e Maller (2011). Como consequência, é desejável a busca de alternativas ao modelo energeticamente intensivo da climatização por ar-condicionado. Nesse quadro, é importante lembrar que é mais viável, financeiramente, economizar energia do que fornecê-la (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014), ou seja, é muito mais vantajoso do ponto de vista energético, ambiental e econômico, um projeto arquitetônico passivo ao invés de uma arquitetura dependente de meios artificiais de condicionamento térmico.

Piñón (2006) comenta que o desperdício de materiais em uma edificação, ainda que o edifício seja de iniciativa privada, é um efeito da incompetência dos projetistas que acaba prejudicando toda a sociedade. Da mesma forma, se um edifício consome mais energia do que o necessário, independentemente da escala ou do nível social ao qual se destina, essa construção está cometendo um ato de desperdício que colabora com a degradação, escassez ambiental e energética que afeta toda a humanidade. A diminuição do consumo de energia representa, portanto, um grande benefício social, tanto pela diminuição do impacto ambiental quanto pela redução de gastos públicos para a produção de energia. Desse modo, o investimento antes gasto com o consumo energético pode ser

revertido para outras necessidades dos moradores, como educação, cultura, lazer e saúde, aumentando a qualidade de vida dos cidadãos e movimentando a economia do país. A arquitetura deve evitar o desperdício de energia, mas sem aceitar restrições indevidas. A finalidade não é reduzir as novas edificações a modelos com grandes vantagens energéticas, mas sim desenvolver técnicas para elaborar projetos arquitetônicos energeticamente compatíveis com a realidade do lugar ao qual se destinam (MASCARÓ; MASCARÓ, 1985).

O governo brasileiro tem demonstrado crescente preocupação com a questão ambiental e energética relacionada às edificações, de tal modo que, em julho de 2009, o Inmetro publicou o RTQ-C, um regulamento com requisitos técnicos sobre a qualidade de edifícios comerciais, de serviços e públicos em relação à sua eficiência energética. Recentemente, em 2010, foi publicado o RTQ-R, que trata de edificações residenciais, assim como a NBR 15575, a qual estabelece a avaliação de desempenho de edifícios residenciais (ABNT, 2013).

No contexto mundial atual, a preocupação com a economia de energia das edificações fez com que vários países aprimorassem seus códigos de construção. Em 2010, por exemplo, o Parlamento Europeu aprovou a Diretiva Europeia sobre o Desempenho Energético dos Edifícios (EPBD), Diretiva 2010/31/EU, que prevê uma redução de 20% do consumo de energia até 2020, promovendo a construção de novos edifícios na União Europeia caracterizados por um consumo quase zero, *NZEB*[11] (*Nearly Zero Energy Building)* (DIRETIVA 2010/31/EU). Segundo Dalbem *et al.* (2017), "essa meta ambiciosa" pode ser alcançada mediante a aplicação do conceito *Passive House*, já testado e com grande disseminação na Europa. Da mesma forma, Ionescu *et al*. (2015) afirmam que a aplicação do conceito de *Passive House* contribuirá, significativamente, para a realização dos objetivos estabelecidos pela Diretiva 2010/31/EU. Mais recentemente, a Diretiva 2018/844/EU pretende acelerar a renovação dos edifícios existentes da União Europeia para que, até 2050, todos se convertam em um parque imobiliário descarbonizado e com necessidades quase nulas de energia.

O conceito *Passive House*, desenvolvido na Alemanha a partir de 1988, procura manter as condições interiores da edificação confortáveis durante todo o ano com um gasto mínimo de energia. Para isso, além de priorizar a utilização de estratégias passivas básicas como orientação solar adequada, uso de elementos de controle solar, o fator de forma e a medida de compacidade de acordo com o clima, o conceito *Passive House* também engloba cinco estratégias fundamentais: (i) bom nível de isolamento, (ii) janelas eficientes, (iii) estanqueidade, (iv) ventilação mecânica com recuperador de calor e, por fim, (v) minimização das pontes térmicas. Esse conceito é amplamente adotado em diversos países como

[11] "[...] um edifício com um desempenho energético muito elevado [...]. As necessidades de energia quase nulas ou muito pequenas deverão ser cobertas em grande medida por energia proveniente de fontes renováveis, incluindo energia proveniente de fontes renováveis produzida no local ou nas proximidades" (artigo 2º DIRETIVA 2010/31/EU, p. 158/18).

resposta às necessidades energéticas e ambientais locais e mundiais, devido à sua eficiência energética e viabilidade financeira. Atualmente, há edificações construídas com base na aplicação do conceito *Passive House* por todo o mundo, sendo que, na América Latina, há edificações construídas e certificadas no México e no Chile (PHI, 2018). No Brasil, a primeira *Passive House* foi construída em 2018, em Natal-RN, por intermédio de uma parceria entre o Ministério Federal da Educação e Pesquisa da Alemanha e o SENAI – RN. As pesquisas mais avançadas sobre esse tema no Brasil são realizadas pela Universidade Federal de Pelotas, em parceria com a Universidade de Aveiro, em Portugal, desde 2015. A implementação do conceito *Passive House* pode ser uma solução alternativa para encontrar possíveis sistemas e recursos que deem uma resposta às correntes necessidades energéticas do Brasil.

Tendo-se esse quadro em vista, a pergunta que norteia esta pesquisa é: como as estratégias do conceito *Passive House* podem contribuir para edificações residenciais unifamiliares energeticamente mais eficientes na Região Sul-Brasileira e quais são as interferências decorrentes no projeto arquitetônico? Para responder a essa questão, o conceito *Passive House* foi implementado em projetos arquitetônicos existentes, para a verificação de como essas estratégias se comportam do ponto de vista do desempenho termoenergético e de que forma interferem no projeto arquitetônico.

A presente investigação busca contribuir com o desenvolvimento de projetos arquitetônicos adequados à realidade climática sul-brasileira, a fim de diminuir a dependência energética e mitigar os impactos ambientais locais. O trabalho se alinha, desse modo, às principais pesquisas internacionais e nacionais atuais da área, haja vista a crescente necessidade de diminuição do consumo energético. A temática abordada é de grande relevância atual, no Brasil e no mundo, sendo pertinente especialmente considerando-se as lacunas de pesquisa sobre edificações com alto desempenho energético para o clima sul-brasileiro e a necessidade de se encontrar alternativas que diminuam o consumo energético das edificações mantendo-se os bons níveis de conforto ao usuário. Por fim, ressalta-se que esta pesquisa pode contribuir para o avanço da área de conhecimento, uma vez que aborda um tema atual e relevante, com poucas investigações sistematizadas referentes ao contexto arquitetônico e climático brasileiro.

1.2 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

Para se obter conforto higrotérmico[12] e baixo consumo energético, é necessário prever estratégias específicas de projeto para cada clima. Assim, as edificações apresentarão diferentes estratégias para sua adaptação ao lugar em que serão inseridas. O presente trabalho delimita o estudo sobre a Região Sul do Brasil, e utilizará para a investigação as zonas bioclimáticas estabelecidas pela NBR 15220-3:

[12] Palavra criada a partir do grego *hygrós*, "úmido, molhado", mais *thermos*, "calor". Relaciona as variáveis que envolvem temperatura e umidade do ar.

"Desempenho térmico de edificações - Parte 3: Zoneamento Bioclimático Brasileiro e Diretrizes Construtivas para Habitações Unifamiliares de Interesse Social" (ABNT, 2005). Das cinco Zonas Bioclimáticas da Região Sul, as que ocupam maiores áreas são a ZB1, ZB2 e ZB3 e, por esse motivo, foram selecionadas para o trabalho. Em relação às estratégias projetuais adotadas, serão estudadas as cinco principais elencadas no conceito de *Passive House*, conforme citado anteriormente: (i) isolamento térmico, (ii) estanqueidade, (iii) janelas eficientes, (iv) ventilação mecânica com recuperador de calor e (v) minimização das pontes térmicas.

Como estudo de caso, o trabalho é delimitado à análise de edificações residenciais unifamiliares, dado que, no Brasil, essas edificações representam mais de 50,8% do consumo de energia elétrica, sendo o setor residencial, portanto, o maior consumidor de energia, responsável por utilizar 25,5% do total produzido. Os edifícios residenciais unifamiliares constituem 84%[13] dos domicílios brasileiros da Região Sul do país (ELETROBRAS, 2007a).

Como mencionado anteriormente, independentemente da escala da edificação ou do nível social ao qual se destina, o consumo de energia gera impactos ambientais que afetam a todos e, por esse motivo, neste trabalho não foi priorizada a escolha de habitações de interesse social. As edificações residenciais unifamiliares selecionadas para o estudo de caso adotam as principais estratégias passivas básicas definidas por Wassouf (2014): orientação solar da edificação, predominantemente, no eixo leste/oeste, a presença de elementos de controle solar externos e fator de forma ≤ 3. A presença de estratégias passivas básicas são critérios iniciais para posterior aplicação do conceito *Passive House*.

Por fim, o trabalho aborda aspectos relacionados ao desempenho termoenergético[14], logo, a ênfase é o estudo do mínimo consumo possível de energia elétrica para se obter conforto térmico, excluindo-se aspectos relacionados ao conforto lumínico, acústico e ergonômico. Para quantificar o conforto térmico, utilizou-se a temperatura operativa[15].

1.3 HIPÓTESE

A hipótese da presente pesquisa se baseia na possibilidade de adaptação das estratégias do conceito *Passive House* em projetos de edificações na Região Sul do Brasil, e aventa a ideia de que essa adaptação pode contribuir para o aumento do desempenho termoenergético das edificações, com pouca interferência nos projetos arquitetônicos, desde que já possuam estratégias passivas básicas.

[13] Dados referentes ao ano de 2005, última data do levantamento publicado pela Eletrobras. No Brasil, esse percentual é muito semelhante, pois 85,4% das moradias são residenciais unifamiliares (ELETROBRAS, 2007b).

[14] O termo termoenergético refere-se ao consumo energético necessário para o condicionamento térmico do ambiente. Térmo vem do grego "therme", significando calor; e energético deriva de energia, que vem do latim "energia", do grego "energia", "operação, atividade", de "energos", "ativo, trabalhador", formada por en, "em", + ergon, "trabalho, ação".

[15] Temperatura operativa corresponde ao valor médio entre a temperatura do ar e a temperatura radiante média do ambiente (INMETRO, 2012b).

Para verificar a hipótese de investigação delineada, esta tese assume a orientação solar da edificação, o uso de elementos de controle solar e o fator de forma como estratégias passivas básicas e busca analisar a adaptação das estratégias norteadores da *Passive House* em edificações que apresentem essas três características passivas, observando se há melhorias em seu desempenho termoenergético.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo geral

Adaptar as estratégias do conceito *Passive House* a residências unifamiliares da Região Sul do Brasil, verificando qual o seu desempenho termoenergético e identificando quais são as implicações para o projeto arquitetônico.

1.4.2 Objetivos específicos

a. Compreender a evolução da arquitetura passiva ao longo da história no cenário nacional e internacional e sintetizar através de linhas do tempo, identificando as principais tecnologias passivas empregadas, o contexto energético e ambiental em cada período;

b. Definir critérios e selecionar edificações referenciais para o estudo de caso: residências unifamiliares com estratégias passivas básicas, para Zonas Bioclimáticas ZB1, ZB2 e ZB3 sul-brasileiras;

c. Analisar o desempenho termoenergético e o nível de desempenho da envoltória[16] segundo o regulamento brasileiro RTQ-R das edificações referenciais;

d. Aplicar as estratégias do conceito *Passive House* nas edificações referenciais e definir as estratégias que apresentam os melhores desempenhos termoenergéticos;

e. Analisar a relação do dimensionamento de elemento de controle solar e das janelas no desempenho termoenergético das edificações referenciais com e sem as estratégias *Passive House.*

1.5 ESTRUTURA DA TESE

A estrutura da tese está dividida em sete capítulos, do seguinte modo:

Capítulo 1: Apresenta uma introdução geral do tema, compreendendo a contextualização e a justificativa, as delimitações, hipótese e objetivos do trabalho.

Capítulo 2: É destinado à contextualização histórica sobre a eficiência energética na arquitetura no cenário nacional e internacional e a sua relação com os aspectos energéticos e ambientais de cada

[16] INMETRO (2012a, p. 32) define envoltória como: "Conjunto de planos que separam o ambiente interno do ambiente externo, tais como fachadas, empenas, cobertura, aberturas, assim como quaisquer elementos que os compõem. Não estão incluídos pisos, estejam eles ou não em contato com o solo".

época. Apresenta a revisão da literatura dos assuntos pertinentes ao embasamento teórico do tema, tendo como intuito reforçar sua pertinência e relevância, bem como identificar as lacunas do conhecimento e a contribuição da pesquisa para o avanço científico da área.

Capítulo 3: Discorre sobre o conceito *Passive House*. São abordadas as principais estratégias passivas básicas e as estratégias utilizadas pelo conceito *Passive House*, assim como os requisitos energéticos exigidos. Também são apresentados exemplos de edificações *Passive House* no mundo e os estudos de adaptação do conceito em climas quentes.

Capítulo 4: É realizada uma breve revisão da literatura sobre simulação computacional em edificações como ferramenta de pesquisa, tratando de simulação termoenergética e sobre o programa *EnergyPlus*. Também são abordadas as metodologias e os procedimentos utilizados pelo RTQ-R para a simulação computacional de edificações e suas contribuições para o desenvolvimento deste trabalho.

Capítulo 5: Apresenta os métodos e as etapas da metodologia utilizadas na pesquisa para a adaptação do conceito *Passive House* ao contexto climático sul-brasileiro. Aborda os critérios para a escolha das edificações referenciais para o estudo de caso, a modelagem da geometria das edificações referenciais e a configuração dos parâmetros para simulação computacional. Também trata dos procedimentos adotados para a verificação do nível de desempenho da envoltória, segundo o regulamento brasileiro RTQ-R, e do diagnóstico termoenergético das edificações referenciais e, por último, aborda a adaptação dos conceitos dados pelo termo *Passive House* e a otimização do dimensionamento das janelas e elementos de controle solar externos.

Capítulo 6: São apresentados os resultados das soluções encontradas nas seis etapas da Tese: as linhas do tempo desenvolvidas; o nível de eficiência energética da envoltória e o diagnóstico termoenergético das edificações referenciais de acordo com o RTQ-R; o desempenho termoenergético das edificações referenciais com aplicação do conceito *Passive House* e as melhores soluções de estratégias encontradas; por fim, é apresentado o resultado do desempenho termoenergético da otimização do dimensionamento dos elementos de controle solar externos e das janelas com e sem o uso das estratégias *Passive House*. O capítulo é encerrado com as discussões dos principais resultados do trabalho.

Capítulo 7: Apresenta as conclusões do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

Apêndices: Apresentam informações complementares à Tese: detalhe das Zonas Bioclimáticas ZB1, ZB2 e ZB3 da Região Sul do Brasil; cálculo do Fator de Forma e da Compacidade; detalhe das propriedades dos materiais, das janelas e dos resultados do nível de eficiência energética da envoltória das edificações em estudo; exemplo de programação EMS; exemplo de configuração de parâmetros para simulação com o algoritmo e as linhas do tempo das edificações passivas no Brasil e no mundo.

CAPÍTULO 2. CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA SOBRE A ARQUITETURA E A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Em um primeiro momento, foram realizadas pesquisas mediante a revisão de literatura da história da arquitetura passiva no contexto mundial e brasileiro, visando verificar as estratégias passivas empregadas nas edificações e a sua relação com cada período da história. Tal pesquisa tem como propósito reforçar a pertinência do tema por meio da contextualização da eficiência energética da arquitetura, principalmente, quanto ao cenário energético, tecnológico e ambiental atual, além de identificar possíveis lacunas do conhecimento e contribuir para o avanço científico da área.

É importante conhecer, também, as experiências anteriores e as barreiras encontradas pelos predecessores para entender a evolução da arquitetura passiva, os novos conceitos e as soluções para reduzir o consumo de energia com as edificações. As estratégias arquitetônicas para adequação de edificações aos diferentes climas com eficiência energética não são descobertas recentes. São resultados da experimentação, da evolução científica e da mentalidade da sociedade ao longo de toda a história humana no sentido mais amplo, com uma aceleração das inovações a partir da Revolução Industrial. As edificações sempre tiveram uma relação íntima com as questões que envolvem a disponibilidade ou escassez de diferentes fontes de energia, na maioria das vezes como forma de adequação às diferentes exigências climáticas.

Segundo Mascaró (1983), o uso da energia na arquitetura evoluiu através do tempo, produzindo edifícios de diferentes características energéticas segundo as disponibilidades e restrições do espaço-tempo. Assim, quando a disponibilidade de energia era restrita, o homem otimizava o uso, maximizando a aplicação dos recursos disponíveis.

A evolução da preocupação com a eficiência energética das edificações, ao longo do tempo, possui muitas dimensões e ramificações. Este estudo privilegia alguns dos momentos considerados como definidores na evolução da arquitetura passiva no mundo, destacando acontecimentos importantes de cada período, em paralelo ao desenvolvimento de tecnologias construtivas e suas consequências no estudo da eficiência energética em edificações, enfatizando os precursores de cada novo momento e as suas respostas positivas à escassez energética e aos problemas ambientais.

2.1 ARQUITETURA PASSIVA NO MUNDO

A seguir, será apresentado, de forma cronológica, um breve histórico da evolução do estudo das edificações energeticamente eficientes no mundo, em especial à arquitetura passiva. O histórico parte dos primórdios da arquitetura, em que a adaptação climática só era possível com o uso de meios passivos ou com baixo consumo energético, até os tempos atuais, em que a questão energética está relacionada aos aspectos políticos, econômicos e ambientais.

2.1.1 Período pré-Revolução Industrial (século XII a.C a XIII d.C)

- As primeiras moradias

Na impossibilidade de determinar com precisão como seria a primeira habitação humana, durante o Renascimento, foram feitas suposições especulativas. Assim, Filarete [1], em seu *Trattato di Architettura* (1464), associa as origens da habitação humana à tradição cristã e à natureza: descreve Adão depois de expulso do paraíso como o primeiro arquiteto. Filarete representa Adão protegendo-se da chuva com as duas mãos posicionadas em forma de telhado, demonstrando que além dos edifícios derivarem das proporções do corpo humano, também derivam da necessidade de proteção do homem das intempéries (FINOLI; GRASSI, 1972).

Figura 2-1: Adão de Filarete, expulso do Paraíso.

Fonte: Finoli e Grassi (1972).

Desde os primórdios da humanidade, o ser humano buscou meios para satisfazer suas necessidades de sobrevivência, muitas vezes, de forma intuitiva. Segundo Behling e Behling (2002), os homens enfrentaram as adversidades climáticas com uma “segunda ou terceira pele” (Figuras 2-2 e 2-3). A segunda pele é relativa a vestimenta que adiciona mais uma camada de isolamento térmico à pele humana e, a terceira, mais espaçosa, a habitação.

[1] Filarete (1400 1469), italiano, foi escultor, engenheiro, arquiteto e teórico da arquitetura do Renascimento no século XV.

Figura 2-2: Iglu: moradia para clima de frio extremo[2].

Fonte: Behling e Behling (2002).

Figura 2-3: Moradia africana para clima quente extremo[3].

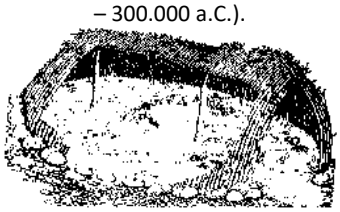
Fonte: Behling e Behling (2002).

Inicialmente, no período Paleolítico, acerca de 2,5 milhões de anos até aproximadamente 10.000 a.C., o homem utilizou a caverna e formações geológicas como terceira pele, sendo estas as suas primeiras moradias (Figura 2-4). Na ausência de cavernas naturais, o homem primitivo encontrou alternativas para tirar partido de outros recursos naturais para a construção do seu habitat (Figura 2-5 e 2-6) (REBELLO; LEITE, 2007).

Figura 2-4: Cavernas de Massafra, na região italiana de Puglia.

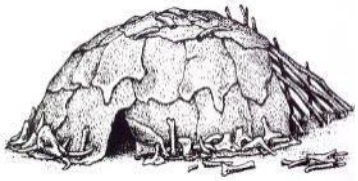
Fonte: adaptado de Rebello e Leite (2007).

Figura 2-5: Terra Amata, abrigo do Homo erectus, Nice – França (400.000 – 300.000 a.C.).



Fonte: Behling e Behling (2002).

Figura 2-6: Cabana do homem de Cro-Magnon, Ucrânia, (44.000 a 12.000 a.C.).



Fonte: Roth (2007).

A busca pela sobrevivência aos climas hostis levou o ser humano a utilizar a energia do fogo. Há certa de 30.000 a.C., o homem obteve o domínio do fogo (HÉMERY; BEBIER; DELÉAGE, 2007) e, a partir de então, pode aquecer-se e realizar mais atividades no período após o pôr do sol (FONSECA, 1978).

O homem viveu longos períodos no estado nômade, em que a energia utilizada era proveniente da força muscular. No Período Neolítico, 8.000 até 5.000 a.C., a descoberta da agricultura leva o homem ao sedentarismo e a domesticação de animais. Por volta de 4.000 a.C., nascem as primeiras civilizações como a Mesopotâmia, por exemplo, e a força muscular passa a ser complementada pela energia dos cursos das águas, além da tração animal e da lenha. Nesse mesmo período, surgem os primeiros Estados com eminentes construções arquitetônicas (TESSMER, 2002). Depois, ao longo dos séculos, a lenha foi sendo complementada por outras fontes de energia, tais como: o vento (barcos a vela,

[2] O formato compacto reduz a área de perda de calor interno e pelos ventos externos. Os habitantes possuem uma "segunda pele" pesada que isolam o corpo das baixas temperaturas exteriores.

[3] Há necessidade de proteção solar ao mesmo tempo que o ar possa circular para retirar o calor excessivo. Os habitantes muitas vezes não necessitam do isolamento da "segunda pele" já que, desejam perder calor para o meio externo.

moinhos de vento, etc.), o óleo de baleia, a turfa, etc. Em seguida, surge o carvão como outra fonte de energia, o qual foi complementado pelo petróleo (CARVALHO, 2014). Na medida em que as fontes de energia eram descobertas e utilizadas, conferiam novos rumos para a evolução do homem e das edificações.

Grande parte do que se construiu na história da arquitetura não foi projetada por profissionais, nem se trata da arquitetura oficial, mas foi, antes de tudo, uma expressão da tradição popular. A arquitetura conhecida como vernacular[4], utiliza os materiais e técnicas construtivas tradicionais do local para adaptar as edificações às necessidades impostas pelo clima. Assim, a natureza e o clima local são fatores determinantes na definição da concepção arquitetônica, dos materiais e das técnicas construtivas utilizadas. A arquitetura vernacular segue um caminho de mudanças lentas e um processo autoadaptativo ao contexto, ao clima, à energia e à ecologia (ROHDE, 1987).

O interesse pelo estudo da arquitetura vernacular começou na Inglaterra do final do século XIX, devido às suas qualidades de simplicidade e harmonia com o entorno (TEIXEIRA, 2008). Esse conhecimento contribui para a compreensão dos mecanismos utilizados pelas civilizações passadas para a criação do abrigo com o mínimo consumo de material e o máximo desempenho possível em termos de conforto ambiental (REBELLO; LEITE, 2007).

As características energéticas próprias da arquitetura vernacular diluíram-se ao longo do século XX, sobretudo a partir do auge da arquitetura do Estilo Internacional no pós-guerra (WASSOUF, 2014). Romero (1997), comenta que, se por um lado o homem experimentava avanços espetaculares da ciência em praticamente todas as áreas, por outro, houve a separação de um casamento quase perfeito que durou cerca de 10.000 anos, entre arquitetura e clima.

- Grécia Antiga (século XII a II a.C.)[5]

O processo intuitivo de adequação das edificações ao clima na Grécia Antiga é revestido pela razão, com as contribuições de alguns gregos renomados como Aristóteles, Xenofonte e Hipócrates e, principalmente, por meio dos escritos de Vitruvio (KRÜGER, 2000).

---

[4] O termo “arquitetura vernacular” é amplamente discutido, também denominada conforme o caso exige de "anônima", "espontânea", “popular”, "indígena", "rural", “informal”, “autóctone” entre outros. Weimer (2012) lembra que o vocábulo vernáculo provém do latim vernaculu, que originalmente designava o escravo nascido na casa do senhor. O termo vernáculo é o usado quando os autores brasileiros se referem às manifestações construtivas do povo, mas, como Weimer explica, é um qualificativo mal-empregado quando se refere à arquitetura. Para Weimer, o termo mais apropriado é popular, cuja origem latina é populus. Weimer explica, “populus, designava o conjunto dos cidadãos que excluíam, por um lado, os mais privilegiados [...], e, por outro lado, os menos afortunados, a plebe, dos despossuídos”. Donde conclui que, em seu sentido mais direto, significa aquilo que é próprio das camadas intermediárias da população. O autor considera o termo arquitetura popular o mais correto para referir-se ao saber do povo. Deste modo, define arquitetura popular como aquela que é própria do povo e por ele realizada. Reforça tal consideração recordando que é também essa a terminologia adotada nos países ibéricos. Já Teixeira (2017) comenta que o termo "vernacular” é oriunda do latim "vernae", termo utilizado para identificar a linguagem vulgar no Império Romano. Porém, como o termo “vernacular” é consagrado será mantido no trabalho.

[5] Tradicionalmente a Grécia Antiga abrange desde 1100 a.C. (período posterior à invasão dórica) até a dominação romana em 146 a.C., contudo deve-se lembrar que os autores utilizam direrentes períodos para datar seu início.

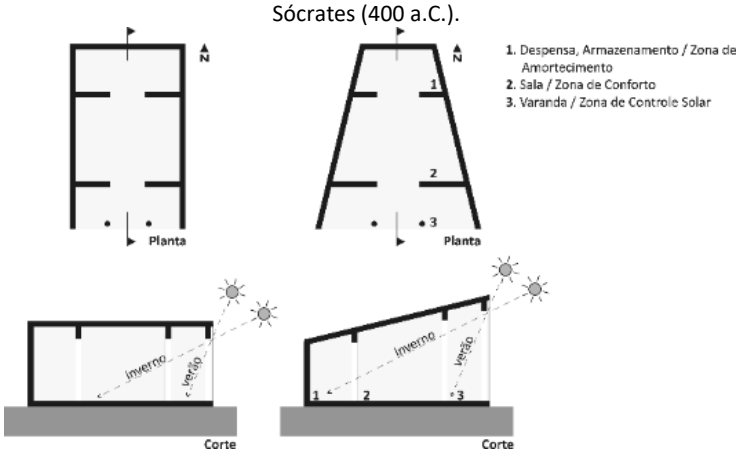
Na Grécia Antiga, a energia motriz mais eficiente e solicitada é a do homem. Na cidade de Atenas, por exemplo, a mão de obra escrava correspondia a 80% da população. Para aquecer as edificações no frio, era utilizado a madeira, o que levou a devastação das florestas e a regulação do uso de carvão por numerosas cidades-estados. A Grécia Antiga também sofreu com variações climáticas que tornavam irregular o uso da energia hidráulica (TESSMER, 2002). Como alternativa, muitas cidades utilizaram a energia solar como auxílio ao aquecimento da casa e como resposta positiva à escassez energética. Os gregos aprenderam a construir beneficiando-se dos raios solares para aquecê-los no frio e protege-los do calor no verão. Assim, nasceu no ocidente a arquitetura solar (BUTTI; PERLIN, 1985).

Um dos exemplos mais antigos de aproveitamento da radiação solar na arquitetura é a casa grega típica chamada de "Megaron" (Figura 2-7). Posteriormente, em 400 a.C., Sócrates descreve uma Megaron energeticamente eficiente (LOFTNESS; HAASE, 2013; BEHLING; BEHLING, 2002), com forma trapezoidal para captar mais radiação solar no inverno, mantendo o conforto no verão graças aos beirais que sombreiam a varanda (Figura 2-8) (WASSOUF, 2014). Segundo Yáñez (1988), a Megaron proposta por Sócrates foi a primeira concepção de casa passiva da história e segundo Behling e Behling (2002) é a primeira casa solar[6].

Figura 2-7: *Megaron* típica grega.

Fonte: Behling e Behling (2002).

Figura 2-8: *Megaron* tradicional e energeticamente eficiente proposta por Sócrates (400 a.C.).



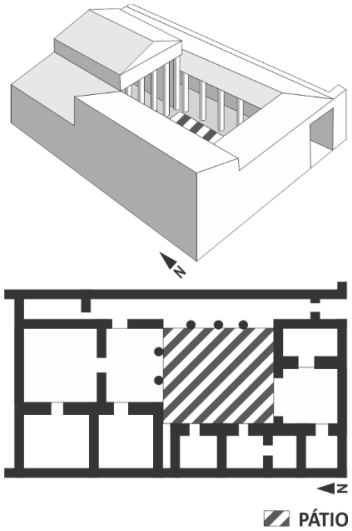
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Outro exemplo clássico da preocupação com a radiação solar é a casa pátio grega que possuía um pátio limitado por colunas que proporcionava sombra no verão e acesso à radiação solar no inverno (BEHLING; BEHLING, 2002) (Figura 2-9). A orientação das cidades também era pensada em função do

[6] "Casa solar" é um termo utilizado para descrever edificações residenciais que aproveitam a radiação solar como auxílio para obter conforto térmico com eficiência energética. Para isso, utilizam a orientação solar norte/sul como principal, maiores aberturas a norte e menores a Sul (HS) e pequenas aberturas a leste e oeste. Já o termo "arquitetura solar" ou "edifícios solares" é mais amplo, é aplicável a qualquer edificação que utilizem essas estratégias, não só residencial.

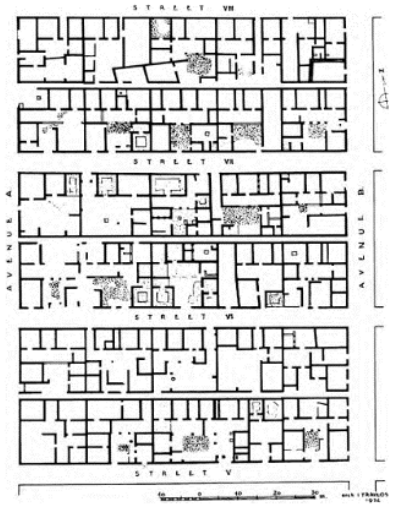
Sol (Figura 2-10). Além disso, os gregos utilizavam em várias tipologias de edificações as colunas que atuavam como enormes *brises-soleil*[7] (BEHLING; BEHLING, 2002) (Figuras 2-11 e 2-12).

Figura 2-9: Reconstrução de uma casa grega clássica na cidade de Priene[8].



Fonte: adaptado de Behling e Behling (2002).

Figura 2-10: Cidade de Olinto[9].

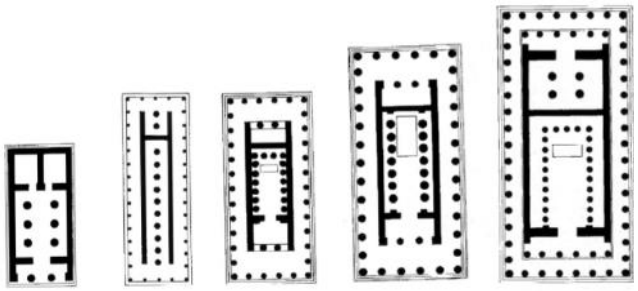


Fonte: Lechner (2014).

Figura 2-11: A sombra gerada pelas colunas do templo Partenon de Atenas (447 a 432 a.C.).

Fonte: Behling e Behling (2002).

Figura 2-12: Evolução da planta dos templos gregos.



Fonte: Behling e Behling (2002).

- Roma Antiga (século VIII a.C. a V d.C.)

Mesmo com os avanços técnicos em obras de engenharia, a utilização de moinhos com força animal ou hidráulica não substituiu a grande dependência da mão de obra escrava (TESSMER, 2002) e o consumo de madeira, utilizada em escala industrial, foi ainda mais acentuado que na Grécia. A crise

[7] "Brise-soleil" é uma palavra composta de origem francesa que é encontrada na literatura com a tradução para o português como "quebra-sol", "quebra-luzes", "corta-luz", "para-sol", "para-sóis" ou popularmente de maneira simplificada "brise". Porém, quando é feita a tradução do francês para o português de cada palavra de forma isolada, "brise" assume o significado de "brisa" (vento leve, fresco, considerado como agradável) e "soleil" de sol. A ideia de assumir a tradução de "brise" como brisa, faz sentido pois o *brise-soleil* protege a edificação da radiação solar direta ao mesmo tempo que permite livremente a circulação do ar. Os termos mais utilizados em inglês são "sun-breakers" e "external shading devices".

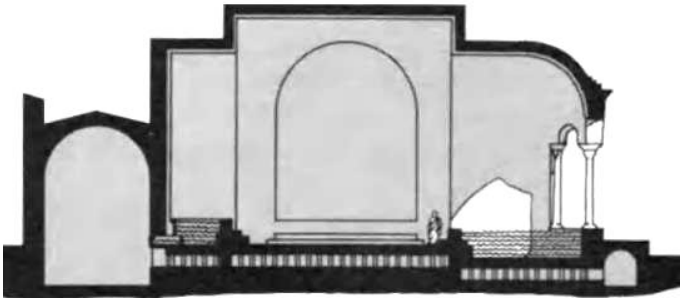
[8] A casa era aberta para o lado sul do pátio e contava com área coberta aberta que auxiliam no controle da radiação solar.

[9] Traçado de parte da cidade de Olinto. As ruas e avenidas se alinhavam de modo que todos os edifícios se beneficiassem da orientação sul (HN).

de combustível fez com que os romanos adotassem técnicas gregas de arquitetura solar, todavia, com fechamentos transparentes para as janelas, aumentando a eficácia do aquecimento (BUTTI; PERLIN, 1985).

Segundo Lamberts, Dutra e Pereira (2014), foi na Roma Antiga que surgiu o primeiro sistema de aquecimento artificial e, segundo Behling e Behling (2002), o início do desenvolvimento de sistemas ativos de climatização: para aquecimento de água, o caldário[10]; para aquecimento de ambientes, o hipocausto[11] (Figura 2-13).

Figura 2-13: Hipocausto, túneis aquecidos por uma fornalha para aquecer o ambiente e caldário para aquecer a água (séc. I a.C.).



Fonte: Cornoldi e De Llorens (1982).

Segundo Krüger (2000), as bases da denominada Arquitetura Bioclimática remontam à Roma Antiga, com os tratados de Vitruvio, *De Architectura*[12] datado de aproximadamente 31 a 27 a.C. Também na Roma Antiga, no século VI, foi criada a primeira legislação ambiental (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014), e segundo Moita (2011), a primeira jurisdição a consagrar o "direito ao sol".

A arquitetura romana possuía inúmeros exemplos para o controle da radiação solar para o conforto térmico e eficiência energética, como o "heliocaminus", a casa átrio e sistema "velum". No século I d.C., uma edificação chamada *heliocaminus*[13] (Figura 2-14) possibilitava o aquecimento solar do ambiente (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014). Outro exemplo é a "casa átrio" (Figura 2 15), residência particular romana construídas por cerca de 200 a.C. (MOITA, 2011). Os romanos também utilizavam engenhosos sistemas de sombreamento, como a cobertura do Coliseu, que funcionava como um grande toldo móvel chamados de "velum" (Figura 2-16) (BEHLING; BEHLING, 2002).

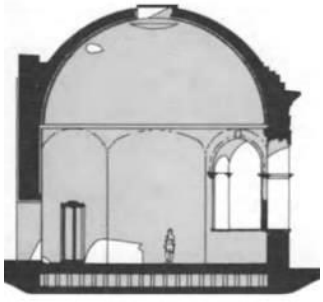
[10] Sistema utilizado na Roma Antiga para aquecimento de água. Eram constituídos de túneis subterrâneos onde uma fornalha aquecia o ar, que por sua vez aquecia a água utilizada para os banhos. Caldário (em latim *caldarium*, também escrito *calidarium*, *cella* caldaria ou *cella coctilium*).

[11] Sistema utilizado na Roma Antiga para aquecimento de ambientes. Eram constituídos de túneis subterrâneos onde uma fornalha aquecia o ar, que por sua vez aquecia os ambientes. Hipocausto (latim: *hypocaustum*), palavra de origem grega cujo significado literal é "aceso por baixo": *hypo* significa "sob", "por baixo de" e *kaiein*, "acender".

[12] Vitruvio menciona a orientação solar nos Livros I, IV, VI e IX da sua obra. No Livro I, cap. IV, aparecem as diretrizes gerais para a escolha do sítio de uma cidade e como a trajetória aparente do Sol deve ser considerada. No Livro IV, cap. V, escreve sobre a orientação dos templos. No livro VI, cap. I, define as diretrizes para o projeto de edificações com mais detalhes, trazendo conselhos para diversos tipos de cômodos. Há a descrição detalhada da casa grega. O livro IX, cap. VII, demonstra alto grau de conhecimento técnico ao tratar de astronomia em geral e geometria solar.

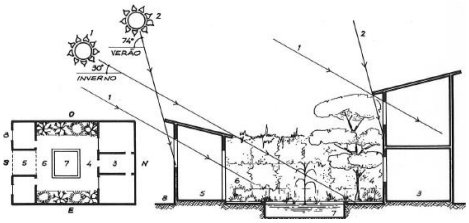
[13] A tradução é forno solar.

Figura 2-14: Heliocaminus: grandes aberturas envidraçadas para reter o calor e grande massa térmica (I d.C.).



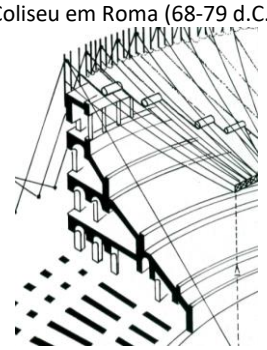
Fonte: Cornoldi e De Llorens (1982).

Figura 2-15: Casa átrio romana (200 a.C.).



Fonte: Moita (2011).

Figura 2-16: Cobertura móvel do Coliseu em Roma (68-79 d.C.).



Fonte: Behling e Behling (2002).

- Idade Média (século V a XV)

Com a Queda do Império Romano, as cidades passaram a despovoar-se, e começaram a surgir vilas fortificadas. O sentimento de insegurança justificava edificações baseadas, principalmente, em estratégias de defesa, com o uso de paredes espessas e pequenas janelas. O domínio da Igreja e o Teocentrismo inibiam o desenvolvimento de tecnologias construtivas, muitas delas consideradas uma intromissão ao plano divino[14]. A escala material era renunciada e o conforto corporal era abandonado em função do silêncio, da contemplação (GIEDION, 1978), e do plano espiritual. Na arquitetura, muitos dos conhecimentos anteriores quanto à eficiência energética foram perdidos por séculos, como aquecimento de paredes e pisos utilizados pelos romanos. Após a Queda de Roma, os arquitetos europeus ignoraram os princípios de orientação solar. O aquecimento do ambiente era deficiente e fazia frio na casa medieval (GIEDION, 1978). Os escritos clássicos sobre arquitetura solar de Sócrates, Aristóteles, Vitruvio e outros caíram em desuso (BUTTI; PERLIN, 1985). Mesmo assim, houve avanços significativos na área energética, como os moinhos hidráulicos e moinhos eólicos que melhoravam o rendimento produtivo do homem (TESSMER, 2002).

Na Idade Média, a escravidão foi diminuindo, gradualmente, enquanto que o uso da energia hidráulica[15] expandia-se (KATINSKY, 1976). Nesse período, houve uma rápida substituição da força humana por outras formas de energia, como tração animal e fontes renováveis de energia, tais como a energia hidráulica (moinhos de água e, em menor escala, de maré) e energia eólica para força dinâmica. Segundo Gimpel (1986), a energia hidráulica teve tanta importância quanto o petróleo no

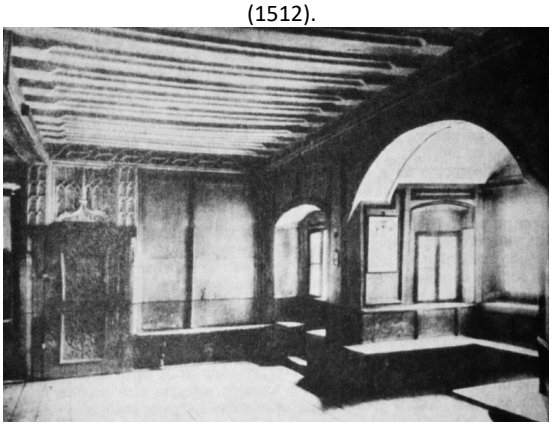
[14] Por exemplo, as estufas e jardins de inverno caíram em desuso durante a Idade Média e, segundo Butti e Perlin (1985), um dos motivos foi que construção de estufas para cultivar frutas fora de época era considerado intromissão ao plano divino.

[15] Os moinhos eram largamente usados no trato de cereais – descascamento, quebra e moagem, fabricação de óleos, para acionar foles em forjas, marteletes no preparo de couros, apisoar tecidos e malhar peças de ferro, para levantes de água, etc. Representaram uma protoindustrialização e um caminho irreversível na utilização de recursos técnicos de melhor rendimento produtivo ao homem. Marcaram o início dos empreendimentos capitalistas energéticos (TESSMER, 2002).

século XX. Segundo White (1985), o maior feito da Idade Média não foi a construção das catedrais góticas, mas a construção, pela primeira vez na história, de uma sociedade baseada na energia não humana. Para o aquecimento dos ambientes, era utilizado a queima da lenha e, assim como na Grécia e na Roma Antigas, foi um dos motivos que levaram à devastação de florestas pela Europa (TESSMER, 2002).

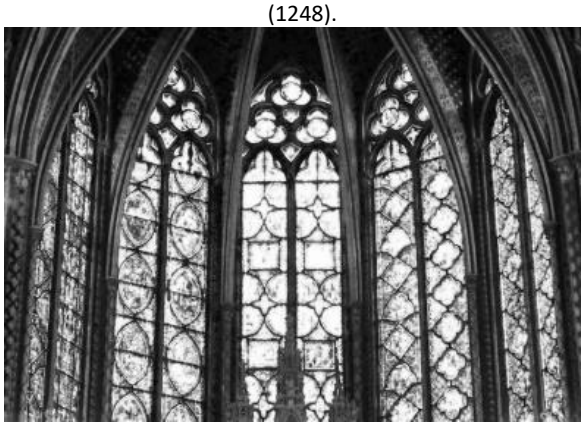
No entanto, houve poucas inovações quanto ao uso de técnicas passivas na arquitetura. Maragno (2000), afirma que foi nos últimos séculos da Idade Média, a partir do século XIV, que a utilização do vidro começou a expandir para as janelas, permitindo que os ambientes internos ficassem mais luminosos sem a entrada do ar e com redução da perda de calor (Figura 2-17). As catedrais incorporaram os vidros coloridos, não só com a finalidade de criar espaços onde a luz representasse o divino, mas, também, para controlar o excesso de luz e da radiação solar direta (Figura 2-18). Segundo Mascaró (1990), os vidros coloridos eram utilizados nos países do mediterrâneo para proteger as aberturas da radiação solar direta intensa e, posteriormente, transformou-se em uma das mais importantes formas artísticas das catedrais.

Figura 2-17: Quarto no convento de Muenster, Suíça (1512).



Fonte: Giedion (1978).

Figura 2-18: Vitrais da catedral de Sainte-Chapelle, Paris, (1248).



Fonte: Behling e Behling (2002).

O traçado urbano das cidades da Idade Média também não levava em consideração a radiação solar. Com finalidades defensivas, a definição do traçado das cidades pouco fazia referência à trajetória solar e, consequentemente, não possuíam preocupações com o conforto térmico das edificações.

- Renascimento (século XIV a XVI) e Barroco (século XVI a XVIII)

Durante à Renascença e o Barroco, não houve mudanças significativas na questão energética em relação à Idade Média. Dessa forma, continuou-se a utilizar como fonte de energia a tração animal, lenha e carvão, foram aperfeiçoando-se as rodas d'água (como os moinhos de trigo e as primitivas máquinas de serraria). Entretanto, a diminuição do poder da Igreja e o Antropocentrismo aceleram os

avanços em todas as áreas, incluindo os aspectos arquitetônicos e energéticos. Nesse período, há um aprimoramento da navegação à vela; tecnologias mecânicas e as primeiras tentativas de usar o vapor.

Os autores dos Tratados do Renascimento[16] idealizaram cidades que faziam um paralelismo com a harmonia descrita nos textos da antiguidade clássica, mas não realizavam uma intenção efetiva de relação entre o edificado e o clima. Na Renascença, é verificada a exportação de modelos arquitetônicos semelhantes em climas diferentes, em que os princípios climáticos eram frequentemente suprimidos e subordinados aos requisitos de composição (MARKUS; MORRIS, 1980). Com a chegada da influência clássica trazida pelo Renascimento para o norte da Europa, os arquitetos copiaram as formas externas dos edifícios antigos. Entretanto, desconsideraram os princípios solares que outorgavam funcionalidade à sua composição e ao seu caráter. Não souberam orientar os edifícios adequadamente, não aproveitando a oportunidade de aquecê-los com a ajuda do Sol (BUTTI; PERLIN, 1985).

Apesar disso, na arquitetura Renascentista, há inúmeros exemplos da preocupação da adequação das edificações ao clima. Em seu tratado "*De re aedificatoria"*[17]*,* Alberti[18] (1986), afirma que é preciso observar o Sol para verificar a conveniência do tamanho das janelas de acordo com a orientação da edificação. Entre os exemplos de aplicação de estratégias passivas nas edificações, estão a utilização de varandas com colunas ou arcadas para proporcionar sombra e criar um microclima entre interior e exterior, e a utilização de cortinas externas, que proporcionavam sombra nos períodos que a radiação solar não era desejável (Figuras 2-19 e 2-20).

Figura 2-19: Villa Rotonda, Vicenza (1566).

Fonte: Behling e Behling (2002).

Figura 2-20: Cortinas externas do Procuratie Vecchie, São Marcos, Vicenza (1586-1640).

Fonte: Behling e Behling (2002).

[16] Os tratados de arquitetura são típicos do Renascimento. O tratado de Vitruvio, *De Architectura* (~27ac), foi inspiração para o primeiro tratado de arquitetura da época moderna: o De *Re aedificatoria libri decem* de Alberti. A partir dessa obra embrionária, os tratados foram aparecendo gradativamente até se converterem no veículo de transmissão do conhecimento sobre a arte de projetar a arquitetura (RAMOS, 2011).

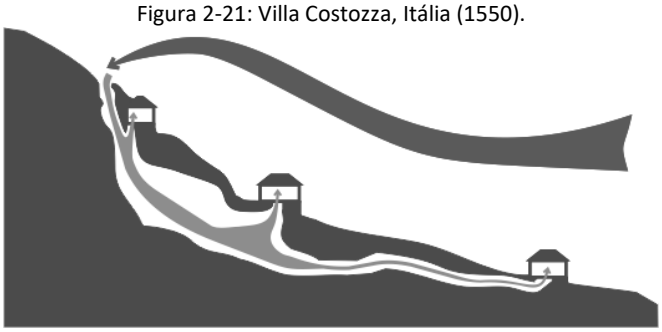
[17] "Sobre a arte de construir", em latim. É um tratado arquitetônico clássico escrito por Leon Battista Alberti, em 1452, e publicado em 1485. Apesar de bastante dependente do *De architectura* de Vitruvio, foi o primeiro livro teórico sobre o assunto escrito no Renascimento e em 1485 tornou-se o primeiro livro impresso sobre arquitetura. Foi seguido, em 1486, com a primeira versão impressa de Vitruvio. *De re aedificatoria* é dividida em dez livros.

[18] Leon Battista Alberti (1404 -1472) foi um arquiteto, teórico de arte e humanista, filósofo da arquitetura e do urbanismo, pintor, músico e escultor italiano.

A Arquitetura Renascentista também explorou algumas formas de ventilação natural, principalmente para reduzir a temperatura do interior das edificações. O "covoli"[19], um sistema de buracos no solo utilizado para refrigerar o ar, foi uma verdadeira inovação técnica retomada na renascença. O *covoli* ficava em comunicação com o ar exterior por meio de aberturas que, nos períodos que a temperatura do ar externo era maior que do ar interno, produziam um movimento de circulação natural do ar. Para tirar proveito desse refrigerador natural, as edificações eram conectadas ao *covoli* por meio de túneis chamados de "ventidotti"[20] os quais terminavam na base das edificações. Um exemplo de aplicação dessa estratégia passiva são as casas construídas a partir de 1550, na Villa Costozza[21], Itália (Figura 2-21) (MASCARÓ, 1990).

Palladio[22], inspirado nesse sistema, adota em algumas edificações, como a Villa Rotonda, um sistema de ventilação natural em que o ar é resfriado no subsolo e ascende por efeito chaminé pela parte central da edificação (Figura 2-22). Palladio também seguia as recomendações de Vitruvio quanto à orientação solar dos edifícios e de seus ambientes (BUTTI; PERLIN, 1985).

Figura 2-21: Villa Costozza, Itália (1550).



Fonte: redesenhado de Behling e Behling (2002).

Figura 2-22: Villa Rotonda, Vicenza (1566).

Fonte: redesenhado de Behling e Behling (2002).

Outra inovação técnica, de consequência formal e ambiental, foi a mansarda[23]. Sua importância consiste em possibilitar a combinação do telhado inclinado medieval, característico de regiões com neve, com a existência de áticos habitáveis, bem iluminados, que permitiam acomodar a crescente população urbana (MASCARÓ, 1990).

[19] *Covoli* é um sistema de cavernas e cavidades parte natural e parte artificial localizadas em colunas onde ficam as casas. A temperatura do ar dentro dessas cavernas é bastante estável, entre 11 a 12ºC (MASCARÓ, 1990).

[20] São dutos de vento cavados que podem ter centenas de metros.

[21] Os *Covoli di Costozza* são um sistema de cavernas e cavidades na cidade de Longare, na província de Vicenza. Estas cavidades encontram-se na rocha calcária das colinas de Berici e foram utilizadas durante muito tempo para a conservação de vinho ou produtos alimentares.

[22] Andrea Palladio (1508 - 1580) foi um arquiteto italiano. No primeiro livro de sua publicação *Quattro Libri dell'Architettura* (1570), Palladio comenta sobre o sistema de ventilação utilizado na Villa Costozza.

[23] O termo mansarda tem origem no nome do arquiteto francês François Mansart (1598-1666), que não o inventou, mas popularizou o termo inspirando-se em obras italianas anteriores.

Próximo ao século XV, o vidro começa a se espalhar nas janelas e a mudar as condições de conforto no interior das edificações. A utilização do vidro permitiu transformar os espaços interiores, que nas estações frias eram fechados e escuros, em lugares luminosos e confortáveis (SERRA, 1993).

Depois da Reforma da Igreja, alguns países europeus, sem influência da Igreja Católica e da Inquisição, começaram a utilizar a orientação solar para cultivo de hortas em estufas. No século XVI, os holandeses foram os primeiros a utilizarem o vidro para construir estufas modernas, espalhando-as por todo o continente europeu (BUTTI; PERLIN, 1985).

No Barroco, por sua vez, não houve novidades significativas em relação ao desenvolvimento e ao uso de estratégias passivas na arquitetura, e também quanto à utilização de novas formas de geração de energia. Nesse período, houve o predomínio crescente dos vãos sobre as paredes (MASCARÓ, 1990) e a luz solar torna-se o ponto central dos projetos.

2.2.2 Pós-Revolução Industrial (século XVIII a XIX)

Segundo Tessmer (2002), a Revolução Industrial foi o coroamento do avanço científico o qual inicia-se com o Renascimento, impulsionado pelos grandes gênios, pela ciência e pelo método científico. As transformações econômicas e sociais espalharam-se por toda a Europa (CANÊDO, 1987) e influenciaram diretamente a arquitetura, sua relação com os materiais, com as técnicas construtivas e com o clima.

Assim como aconteceu na Grécia e na Roma Antigas, a preocupação com o esgotamento dos combustíveis também era discutida na época. Em 1860, o professor Augustin Mouchot[24], declarava: "...sem dúvida, o carvão se esgotará. Que fará então a indústria?" (BUTTI; PERLIN, 1985, tradução nossa).

Nesse caso, com o advento da Revolução Industrial, inicia-se a era dos combustíveis de origem fóssil[25]. O ano de 1859 é considerado o marco zero da industrialização do petróleo, quando Edwin Drake[26] descobriu petróleo em Tutsville, nos EUA (FARIAS; SELLITTO, 2011). Carvalho (2014), comenta que o desenvolvimento subsequente à Revolução Industrial é apoiado em bases energéticas insustentáveis e não renováveis, que são o gás natural e o petróleo.

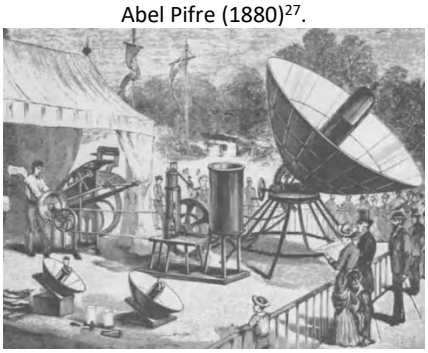
[24] Augustin Bernard Mouchot (1825 - 1912) foi um professor e engenheiro francês, um dos pioneiros do estudo do aproveitamento da energia solar. Desenvolveu o primeiro motor solar.

[25] São combustíveis formados por meio de processos naturais, como a decomposição de organismos mortos soterrados. São usados como combustíveis fósseis, o carvão mineral, gás natural e o petróleo.

[26] Edwin Laurentine Drake (1819-1880), foi um perfurador de poços de petróleo estadunidenses, considerado o primeiro a perfurar poços de petróleo nos Estados Unidos da América.

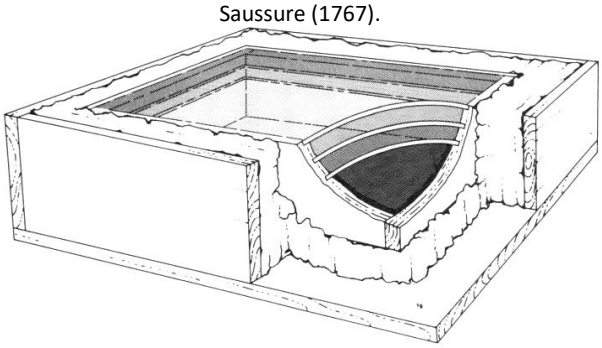
Durante todo o século XVIII, foram estudadas alternativas energéticas para substituir ou diminuir o consumo do carvão, dentre elas, a energia solar (Figura 2-23). Eram estudados e desenvolvidos mecanismos para aproveitar a energia solar, tais como: a caixa de aquecimento solar (Figura 2-24), coletores para esquentar água e para aquecimento de casas e até motor solar para mover máquina a vapor (BUTTI; PERLIN, 1985). Todas essas tecnologias influenciaram os estudos para as edificações energeticamente eficientes durante o século XX e, muitas delas, de certo modo, também refletem, em muito, várias tecnologias utilizadas nas edificações atuais.

Figura 2-23: Prensa solar para impressão de Abel Pifre (1880)[27].



Fonte: Butti e Perlin (1985).

Figura 2-24: Esquema de uma caixa de aquecimento solar de Saussure (1767).



Fonte: Butti e Perlin (1985).

A possibilidade de fabricação em série e a consequente diminuição do valor, tornaram o vidro e o ferro mais acessíveis na utilização como material construtivo, revolucionando a arquitetura. Diversos estudos nos séculos XVIII e XIX utilizavam o vidro para a construção de estufas e a geração de microclimas, tanto para o cultivo de plantas, quanto para o aumento da temperatura no interior das edificações em climas frios. No século XVIII, as estufas fechadas adquiriram grande popularidade no continente europeu, principalmente na Inglaterra, sendo conhecido por muitos como o "século das estufas". Os holandeses construíram estufas com vidro duplo espaçado com ar, atuando como isolante (BUTTI; PERLIN, 1985).

Logo adiante, no século XIX, as estufas começaram a adquirir uma forma mais luxuosa, funcionavam como jardins de inverno com vegetação exótica (Figura 2-25). Devido ao espaço restrito dos centros urbanos, começou-se a utilizar os jardins de inverno também nas coberturas (Figura 2-26) (BUTTI; PERLIN, 1985).

[27] Abel Pifre (1852-1928) foi um engenheiro francês que desenvolveu a primeira impressora de energia solar. Foi inicialmente um assistente de Augustin Mouchot. Imprimia aproximadamente 500 cópias de jornal por hora.

Figura 2-25: Jardim de inverno como extensão da casa (séc. XIX)[28].

Fonte: Butti e Perlin (1985).

Figura 2-26: Jardins de inverno na cobertura (séc. XIX)[29].

Fonte: Butti e Perlin (1985).

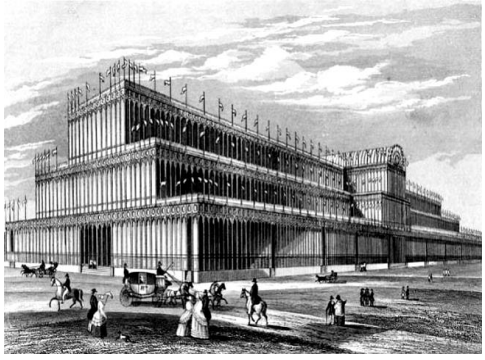
As diversas tecnologias surgidas a partir da Revolução Industrial se popularizaram nos séculos posteriores e mudaram nossa maneira de projetar e construir. Os novos materiais para estrutura, como ferro, aço e concreto armado, as estruturas de pilares, vigas e lajes de concreto armado passaram a transferir as cargas estruturais. A partir desse momento, tornou-se possível construir com materiais finos e leves (KEELER; BURKE, 2010), permitindo a entrada da luz natural e da radiação solar na totalidade da fachada.

Em 1836, Joseph Paxton[30] constrói na Inglaterra o *Great Conservatory*[31] uma estrutura totalmente envidraçada e, posteriormente o Palácio de Cristal (Figura 2-27 e 2-28) (VALE; VALE, 1978). Mascaró (1990), considera o Palácio de Cristal a construção mais visionária e ousada do século XIX, de enorme expressão plástica das potencialidades da Era Industrial e, segundo a autora, a obra foi o primeiro grande edifício público construído sem participação de arquiteto e que marca o início de um período no qual o progresso seria levado adiante pelos engenheiros.

Figura 2-27: *Great Conservatory*, Joseph Paxton (1836).

Fonte: Behling e Behling (2002).

Figura 2-28: Palácio de Cristal, Joseph Paxton (1851).



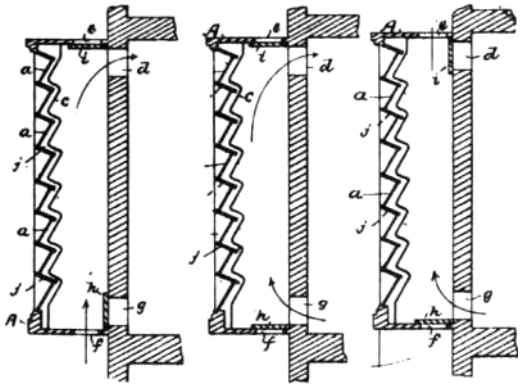
Fonte: Behling e Behling (2002).

[28] Muitas vezes o jardim de inverno era uma extensão da casa, assim, o ar quente solar dos jardins de inverno também auxiliavam no aquecimento das casas.
[29] Os jardins de inverno na cobertura permitiam o cultivo de vegetação em centros urbanos, além de aquecer a edificação.
[30] Joseph Paxton (1803 - 1865) foi um naturalista, ilustrador e arquiteto autodidata inglês.
[31] Era o maior prédio de vidro na Inglaterra até a construção do Palácio de Cristal. Para criar o clima ideial para manter a vegetação, havia oito caldeiras subterrâneas alimentadas por carvão que aqueciam o ambiente. Devido ao alto custo de manutenção, o prédio foi demolido em 1920.

Com o aumento da popularidade dos jardins de inverno, muitas pessoas começaram a utiliza-los sem a preocupação com a orientação solar. Com o início da Primeira Guerra Mundial e o racionamento dos combustíveis, os jardins de inverno foram perdendo espaço e os conhecimentos sobre o aquecimento solar foram sendo esquecidos (BUTTI; PERLIN, 1985).

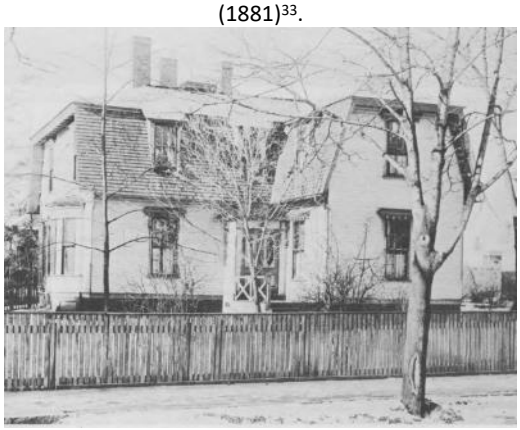
Em 1880, nos Estados Unidos, Edward S. Morse[32], da "Essex Institute de Salem", de Massachusetts, empregou uma caixa aquecida para construir o primeiro coletor solar para aquecimento (Figura 2-29 e 2-30). Além da economia de energia, o sistema reduzia a poeira e as cinzas das estufas de carvão ou madeira para aquecimento. No entanto, o sistema desenvolvido por Morse foi esquecido por mais de meio século e retomados somente na década de 1960, por intermédio dos trabalhos desenvolvidos pelo engenheiro francês Félix Trombe e o arquiteto Jacques Michel (BUTTI; PERLIN, 1985).

Figura 2-29: Desenhos da patente do primeiro aquecedor solar de Moser, com três formas de operação (1881).



Fonte: Butti e Perlin (1985).

Figura 2-30: A casa de Morse em Salem, Massachusetts, (1881)[33].



Fonte: Butti e Perlin (1985).

A Revolução Industrial não trouxe somente energia barata, mas também muitas doenças e condições de vida intoleráveis para a nova classe trabalhadora urbana. Milhões de pessoas morreram em prédios superlotados, em estradas estreitas e mal iluminadas. A maioria dos médicos especialistas estavam convencidos de que essas doenças eram causadas pela falta de ar fresco e Sol. Deste modo, o acesso solar nas cidades recuperou a atenção em todo o mundo ocidental durante à urbanização do século XIX e início do século XX. Em 1900, numerosos países aprovaram leis de saúde pública e planejamento urbano garantindo o direito ao Sol aos cidadãos. Os arquitetos começaram a estudar mais cientificamente a questão da orientação solar. Durante à primeira metade do século XX, Raymond Unwin[34] compilou ampla informação sobre os movimentos solares anuais e chegou à mesma conclusão que os gregos antigos: "considerando o conjunto do ano não cabe dúvida que a orientação solar Sul,

[32] Edward Sylvester Morse (1838-1925), estadunidense, trabalhou em instituições de ensino superior nos Estados Unidos (*Essex Institute de Salem* e *Peabody Academy of Science*) e no Japão (Universidade de Tóquio).
[33] Seu segundo aquecedor solar é pouco visível por trás da janela à esquerda da fotografia.
[34] Raymond Unwin (1863 - 1940) foi um urbanista inglês.

ou ligeiramente a sudoeste, é considerada a mais desejável para habitações"[35] (BUTTI; PERLIN, 1985, tradução nossa).

Do outro lado do Atlântico, nos Estados Unidos, a situação era muito parecida. No que se refere à colonização dos Estados Unidos, os conhecimentos construtivos e legados indígenas foram se perdendo com o tempo e a arquitetura solar dos antepassados se converteria em uma arte perdida. Aliás, com a crescente urbanização, as cidades eram tão mal planejadas quanto os bairros operários europeus. Assim, alguns arquitetos começaram a se preocupar em projetar aproveitando a ventilação natural e orientação solar. No início do século XX, essas preocupações evoluiriam para projetos e estudos de insolação e orientação solar de grande importância (BUTTI; PERLIN, 1985).

Ainda no final do século XIX, houve uma verdadeira revolução na área energética com o uso prático da eletricidade. Em 1879, Thomas Edison[36] criou a lâmpada incandescente e, em 1882, construiu as primeiras usinas geradoras de eletricidade, com sistema de fios e postes para o atendimento de sistemas de iluminação (FARIAS; SELLITTO, 2011). As cidades do Brasil e do mundo passaram a iluminar suas ruas com eletricidade. Além da iluminação, o transporte e outros serviços públicos e particulares beneficiaram-se da utilização da eletricidade. Por exemplo, o Corpo de Bombeiros utilizava um sistema de alarme sonoro elétrico em caso de fogo e os serviços de abastecimento de água e de saneamento utilizavam bombas elétricas as quais facilitavam o envio de água para as novas áreas das cidades. A eletrificação provocou grandes mudanças também nas telecomunicações, com o surgimento do aparelho de telégrafo elétrico, telefone, gramofone e do cinema (MEMÓRIA DA ELETRICIDADE, 2017).

2.2.3 Século XX

- *Décadas de 1900 a 1930: Início da era do petróleo e primeiras experiências com casas solares da era moderna*

No início do século XX, o mundo vivia grandes transformações que influenciaram o pensamento e os valores da humanidade, impulsionadas pela tecnologia, industrialização e em uma velocidade de inovações nunca vista antes. Também no início do século XX, os pesquisadores já tinham os fundamentos teóricos e tecnológicos para construir uma futura casa com eficiência energética (IONESCU *et al.,* 2015). Com o petróleo e o gás vendidos a preços muito baixos, o mundo volta a sentir-se confiante com a situação energética (BUTTI; PERLIN, 1985).

No que diz respeito à energia elétrica, a partir do século XX, a popularização da lâmpada de Thomas Edison fez com que muitas habitações passassem a utilizar a iluminação elétrica. Por outro lado, a

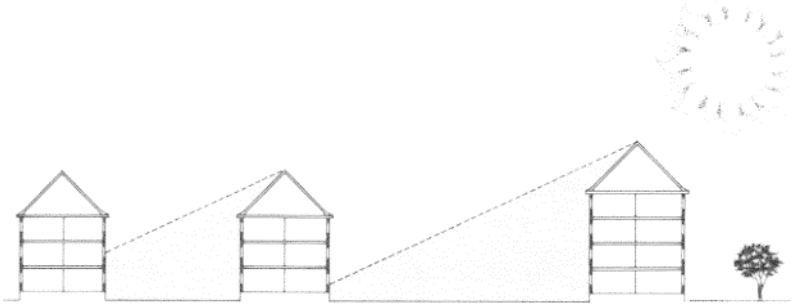
[35] Essa consideração é feita com relação ao HN. Para o HS, pode ler-se: "considerando o conjunto do ano não cabe dúvida que a orientação solar norte, ou ligeiramente a noroeste, é considerada a mais desejável para habitações".

[36] Thomas Edison (1847 - 1931), inventor estadunidense, registrou 2.332 patentes. Entre as principais invenções estão: a lâmpada elétrica incandescente, o fonógrafo, o cinescópio ou cinetoscópio, o ditafone e o microfone de grânulos de carvão para o telefone.

lâmpada fez com que as jornadas de trabalho se prolongassem para além do entardecer (GALVÃO; D'OTTAVIANO, 2015). Segundo Fretin (2013), a eletricidade foi incorporada com sucesso na produção e no uso dos espaços edificados, transformando-os em microclimas controláveis, independentes do clima externo e da hora do dia, uma vez que a iluminação e a temperatura podiam ser ajustadas.

A crescente urbanização dos centros urbanos e as precárias edificações, principalmente dos operários, fez com que arquitetos e urbanistas dos Estados Unidos e da Europa voltassem sua atenção para a questão solar no final do século XIX e início do XX. Em 1912, o arquiteto Augustin Rey[37] investigou a viabilidade de um urbanismo solar[38] para as dez maiores cidades do mundo: Viena; Paris; Londres; Berlim; Moscou; Washington; Filadélfia; Nova Iorque; Chicago e Boston (Figura 2-31) (BUTTI; PERLIN, 1985).

Figura 2-31: Estudos de sombras de Augustin Rey (1912)[39].



Fonte: Butti e Perlin (1985).

Nos Estados Unidos, com a crescente densificação das cidades e a resultante dificuldade de exposição solar, as cidades começaram a verticalizar-se. William Atkinson[40], arquiteto de Boston, verificou que, embora os arranha-céus aproveitassem a luz natural, sombreavam os edifícios mais baixos (Figura 2-32). Assim, elaborou uma série de diagramas que, em 1904, auxiliaram a convencer a prefeitura de Boston a criar novas leis que limitavam a altura das construções. Outros estudos de Atkinson determinavam que as janelas menos recomendadas eram orientadas a leste e oeste devido à grande radiação solar recebida no verão e pouca radiação no inverno, sendo as mais indicadas ao Sul (HN). Atkinson demonstrou, mediante estudos em uma "caixa solar", que no inverno a maior radiação solar procede do Sul (HN) e que os raios solares não são indiferentes ao aquecimento das casas. Posteriormente, em 1912, Atkinson construiu, em Boston, o que denominou de "casa solar" com o objetivo de determinar com maior precisão o potencial de aquecimento solar (BUTTI; PERLIN, 1985).

[37] Augustin Rey (1864-1934), arquiteto francês diplomado pela *École des Beaux-Arts* de Paris.

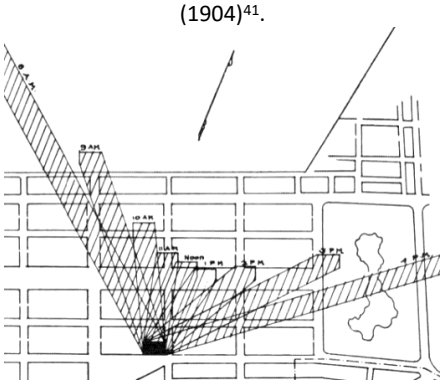
[38] Urbanismo solar consiste no planejamento urbano pensado em função da trajetória aparente do sol, com o intuito de aproveitar melhor a radiação solar nas áreas públicas e privadas. Em geral, é priorizada a orientação solar norte e sul.

[39] Estudos de Augustin Rey, edifícios orientados a Sul (HN) e o espaçamento necessário para não sombrear as outras edificações.

[40] William Atkinson foi arquiteto e escritor estadunidense. Em 1912 publicou "The Orientation of Buildings or Planning for Sunlight".

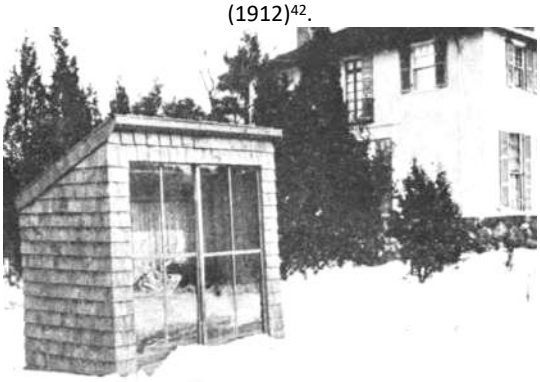
A casa solar de Atkinson era um pequeno edificado, com a face Sul (HN) envidraçada e as demais termicamente isoladas (Figura 2-33).

Figura 2-32: Estudos de Atkinson para a cidade de Boston (1904)[41].



Fonte: Butti e Perlin (1985).

Figura 2-33: "Casa solar" construída por Atkinson em (1912)[42].



Fonte: Butti e Perlin (1985).

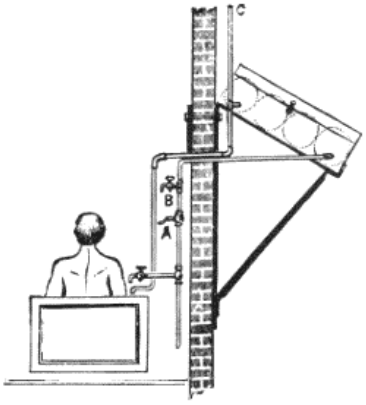
Segundo Jones e Bouamane (2012), as primeiras casas solares da Era Moderna foram construídas na Alemanha depois da Primeira Guerra Mundial. Nos anos 1920, a arquitetura solar encontrava um ambiente favorável para o seu desenvolvimento na Alemanha devido às dificuldades econômicas do pós-guerra, suas reservas de carvão tinham sido ocupadas pelos aliados e havia a necessidade de construir novas moradias. Os conjuntos habitacionais, denominados *Zeilenbau*[43], gradualmente, foram trocando de orientação leste-oeste para norte-Sul. A planta *Zeilenbau*, descrita por muitos como "heliotrópica" [44] causou grande agitação na comunidade arquitetônica internacional. Era uma arquitetura distinta, em que as janelas envidraçadas eram deliberadamente usadas como coletores de calor solar, a fim de contribuir para a boa temperatura interior dos edifícios no inverno (BUTTI; PERLIN, 1985).

O final do século XIX e início do século XX também foram marcados pelo desenvolvimento de sistemas para aquecer a água doméstica. Aquecer a água sempre foi um problema para os Estados Unidos, dado que a maioria dos habitantes eram de pequenas cidades que careciam de gás e eletricidade. Assim, nesse período, vários sistemas para aquecimento de água por energia solar foram desenvolvidos, como o "Climax" (Figura 2-34); "*Climax Perfeccionado*" e o "*Day and Night*"[45] (Figura 2-35) que contava com um sistema de armazenamento da água aquecida (BUTTI; PERLIN, 1985). O "*Day and Night*" é muito

[41] Estudos de Atkinson, onde mostra a sombra de um edifício em um dia de dezembro em vários horários. Devido ao seu trabalho, o Conselho municipal de Boston, aprovou em 1904 uma norma limitadora da altura dos edifícios.
[42] A temperatura interna superava frequentemente 37°C em dias de muito frio.
[43] "Zeilenbau", palavra alemã que significa "construção em linha".
[44] Heliotropia: Movimentos de plantas ou animais sésseis, ou de alguns dos seus órgãos acompanhando o percurso do sol.
[45] A diferença básica entre os sistemas os sistemas de coleta da energia solar. O "Climax" possuía coletores cilíndricos pintados de pretos, o "*Climax Perfeccionado*" possuía um coletor único de pouca profundidade enquanto o "*Day and Night*" era formado por uma trama de tubos de cobres.

semelhante a sistemas de aquecimento de água utilizados até hoje. Entre 1920 e 1930, foram descobertas grandes bolsas de gás natural, em Los Angeles, a produção de gás disparou e os preços caíram drasticamente, fazendo com que os aquecedores solares de água, praticamente, caíssem em desuso (BUTTI; PERLIN, 1985).

Figura 2-34: Uma das formas de utilizar o sistema "Climax" (1892)[46].



Fonte: Butti e Perlin (1985).

Figura 2-35: Sistema de aquecimento de água "*Day and Night*" (1911)[47].

Fonte: Butti e Perlin (1985).

Esses sistemas de aquecimento de água foram pautados nos estudos desenvolvidos no século XIX e foram a base dos sistemas de aquecimento de ar utilizados em muitas das casas solares ativas iniciadas, posteriormente, na década de 1930, e consolidadas a partir da década de 1940.

Outra grande invenção desenvolvida no início do século XX foi o aparelho de ar-condicionado. Em 1902, Willis Haviland Carrier[48] inventa o equipamento elétrico para condicionar o ar, controlando a temperatura e a umidade, passando o ar por meio de uma rede de tubos frios ou quentes (Figura 2-36) (CARRIER, 2018). Depois da invenção do aparelho de ar-condicionado, Carrier publicou um diagrama psicométrico (IONESCU *et al*., 2015). A invenção do equipamento de ar-condicionado por Carrier deu-se por meio do aprimoramento de tecnologias desenvolvidas no século XIX, sendo a patente atribuída a ele em 1906. Na década de 1920, o aparelho de ar-condicionado era utilizado apenas em edificações comerciais e nos prédios do governo dos Estados Unidos e, somente em 1928, foi criado uma versão de equipamento ar-condicionamento de pequeno porte para uso doméstico (KEELER; BURKE, 2010).

[46] Uma das formas de utilizar o sistema "Climax" segundo folheto da empresa, 1892.
[47] Família de Pomona Valley, Califórnia, com um sistema de aquecimento de água "Day and Night", 1911.
[48] Willis Haviland Carrier (1876 –1950) foi um engenheiro e inventor estadunidense.

Figura 2-36: Motor do primeiro sistema de ar-condicionado (1902)[49].

Fonte: Carrier (2018).

Os avanços tecnológicos iniciados com a Revolução Industrial continuaram a influenciar a arquitetura do século XX. Com a popularização da estrutura independente[50], por meio do uso do aço e do concreto armado, liberou-se a função estrutural dos fechamentos possibilitando construir prédios cada vez mais altos, com fechamentos leves, de pouca espessura e com vãos maiores para aberturas. Em 1929, o arquiteto Le Corbusier revoluciona a relação espacial da arquitetura propondo a utilização de cinco estratégias: pilotis; planta livre; terraço jardim; estrutura independente e fachada de vidro (GUTIERREZ; LABAKI, 2005).

Segundo Bruand (2012), Le Corbusier enaltecia a abertura dos edifícios para o exterior, proporcionando a entrada do ar, da luz e da natureza. Entretanto, Givoni (1981), afirma que a ampla utilização da pele de vidro nas fachadas das edificações na arquitetura moderna alterou a relação entre o ambiente interno e o clima, enfatizando o problema do superaquecimento proporcionado por esse material construtivo.

De forma gradual e, cada vez mais acelerada, a arquitetura pesada da estrutura portante, presente durante muitos séculos, foi sendo substituía pela arquitetura leve e transparente da estrutura independente proporcionada pelo vidro, aço e concreto. Assim, no século XX, o desenvolvimento de novas tecnologias construtivas incorporadas à arquitetura moderna conduziu à desmaterialização das paredes externas, as quais foram muitas vezes reduzidas ao mínimo necessário e, outras, totalmente substituídas pelo vidro. O vidro conquistou uma preferência universal ao permitir fluidez visual entre os espaços interiores e exteriores, e passou a ser empregado como uma importante característica da era da máquina. Por outro lado, perderam-se as vantagens térmicas que as grandes massas ofereciam.

[49] Ilustração do motor do primeiro sistema de ar-condicionado, instalado em 1902 na fábrica de impressão Sackett & Wilhelms, Brooklyn, Nova Iorque.

[50] Segundo Weimer (2012) as técnicas milenares de construção em enxaimel são "precursoras imediatas das estruturas independentes que fizeram alegria dos pioneiros do modernismo na Europa". Weimer (2012) comenta que seria simples e lógica a influência do enxaimel suíço para inspiração de Le Corbusier quanto a estrutura independente.

Krüger (2000), afirma que, com o advento da Revolução Industrial, e da introdução de novos materiais na construção civil, as tendências arquitetônicas passam a ser difundidas globalmente, assim como a ideia de que os ganhos térmicos indesejados das fachadas de vidro podiam ser contornados por intermédio de sistemas de condicionamento artificial. Segundo Fretin (2013), considerava-se que era possível construir qualquer coisa em qualquer lugar, desde que houvesse energia elétrica que pudesse acionar os condicionadores de ar e restabelecer o conforto. De acordo com o autor, as torres de vidro, autênticos coletores solares, absorvem e armazenam quantidades, às vezes, absurdas de calor, e demandam o aporte de grandes quantias de energia elétrica para a retirada deste calor excessivo. Em regiões de clima com períodos de altas temperaturas, estas soluções se mostram incoerentes e, em muitos casos, absurdas.

No entanto, os avanços tecnológicos também permitiam a possibilidade de edificações energeticamente eficientes. A imprensa divulgava que novas casas eram possíveis e os edifícios solares ganhavam destaque. Um exemplo de tal arquitetura é demonstrado no trabalho do arquiteto George Fred Keck[51] (LOFTNESS; HAASE, 2013) a partir da década de 1930.

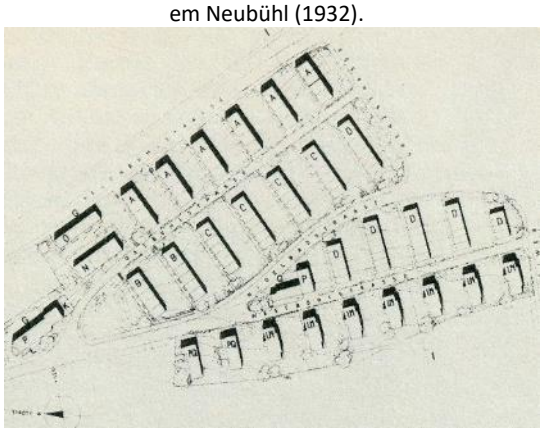
- *Década de 1930: Primeiras experiências com arquitetura solar nos Estados Unidos*

A década de 1930 foi marcada pelo desenvolvimento de pesquisas relativas às edificações residenciais que aproveitassem a energia solar para diminuir o consumo energético, ao mesmo tempo em que aumentasse o conforto térmico. Da mesma forma que o pensamento arquitetônico vanguardista da época, esses estudos foram, exclusivamente, realizados nos países nórdicos e para climas frios, em especial, os Estados Unidos e países europeus, e tinham como princípio inicial o aquecimento dos ambientes por meio do aproveitamento da radiação solar para diminuir os gastos energéticos com o aquecimento ativo. Os estudos e ferramentas, os quais possibilitavam melhor visualização da incidência da radiação solar e das projeções das sombras dos projetos arquitetônicos, começam a aparecer e a avançar nesse período.

Depois da Primeira Guerra Mundial, as inquietudes solares também se estenderam para vários países europeus, tais como Holanda, Suécia e Suíça; todavia, nenhum com a mesma força que na Alemanha. Um dos exemplos mais significativos foi a construção da comunidade solar da Suíça, em Neubühl, perto de Zurique, em 1932 (Figura 2-37 e 2-38). A comunidade, basicamente, era um conjunto de edifícios orientados a Sul (HN) e sudeste que pretendia captar o máximo de Sol durante o inverno, sem que houvesse sombra de um edifício sobre o outro (BEHLING; BEHLING, 2002). Segundo Butti e Perlin (1985), a fachada Sul (HN) era a mais envidraçada; contudo, depois da Segunda Guerra Mundial, as experiências solares foram desencorajadas pelo baixo preço dos combustíveis fósseis.

[51] George Frederick Keck (1895-1980) foi um arquiteto modernista estadunidense entusiasta da arquitetura solar.

Figura 2-37: Implantação da comunidade solar suíça em Neubühl (1932).



Fonte: Butti e Perlin (1985).

Figura 2-38: Comunidade solar suíça em Neubühl: áreas envidraçadas predominantemente para sul.

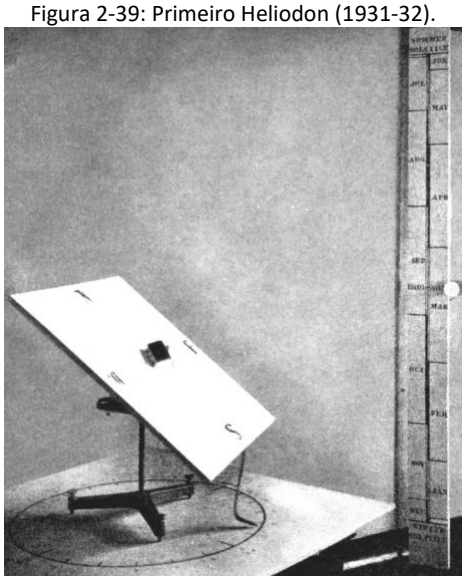
Fonte: Butti e Perlin (1985).

Essa nova arquitetura, porém, entrou em decadência com a ascensão de Hitler e a perseguição nazista. Dessa forma, os nazistas impossibilitaram a expansão das comunidades solares na Alemanha, enquanto que a Segunda Guerra Mundial destruiu praticamente tudo que se havia realizado (BUTTI; PERLIN, 1985).

Informes europeus sobre a orientação solar mais adequada dos edifícios começaram a surgir, sendo o mais influente os estudos realizados por *Royal Institute of British Architects* (RIBA) em 1931-32. O instituto publicou um manual claro e fácil de como seguir os movimentos diários do Sol e as suas estações, assim como o número de horas diárias que seus raios incidiam sobre as janelas orientadas a diversas direções. Desenvolveu, também, o Heliodon[52], o qual ajudava os arquitetos a determinar os efeitos da radiação solar sobre um edifício ainda na fase do projeto (Figura 2-39) (BUTTI; PERLIN, 1985). Na década de 1930, também, arquitetos modernos como Walter Gropius e Le Corbusier incorporam à sua produção estudos de insolação (ROSENFELD, 2007). No terceiro congresso do CIAM, em Bruxelas, em 1930, Gropius apresentou um diagrama que mostrou como os blocos de habitações devem ser espaçados para evitar auto sombreamento usando um ângulo de Sol de inverno (Figura 2-40) (DENZER, 2013).

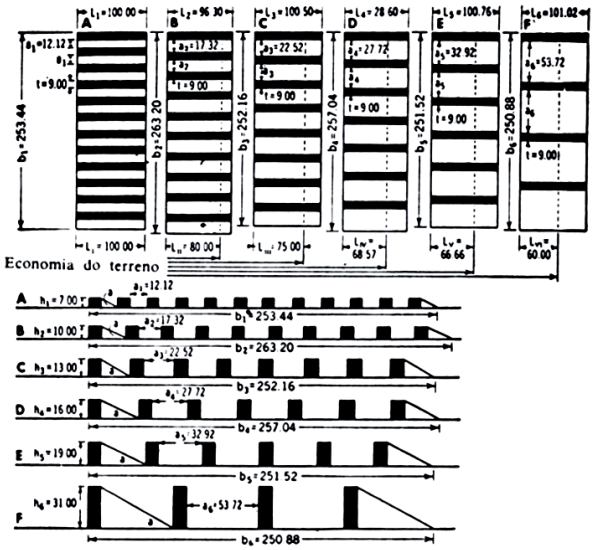
[52]Também conhecido por helioscópio ou solarscópio, é um equipamento que simula o movimento da trajetória aparente do Sol em modelos reduzidos (maquetes), no decorrer do dia e do ano para qualquer local da superfície terrestre. Possibilita o estudo da incidência dos raios solares e de sombreamento sobre o objeto de estudo, como edificações, vegetações, cidades entre outros.

Figura 2-39: Primeiro Heliodon (1931-32).



Fonte: Perlin (2013).

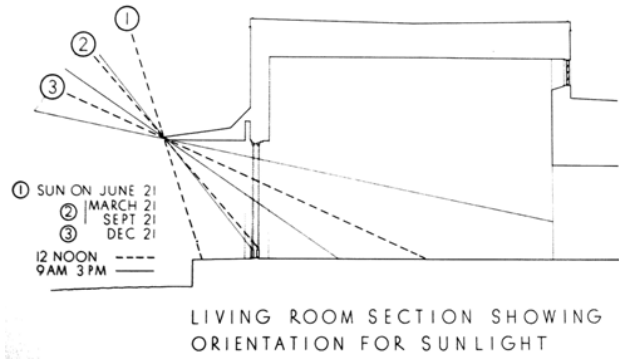
Figura 2-40: Diagramas solares, Gropius (1930).



Fonte: Denzer (2013).

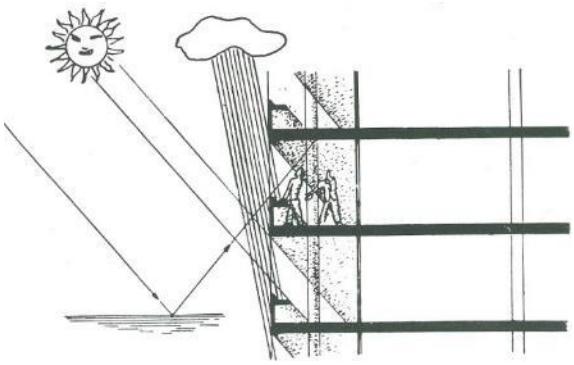
Ainda na década de 1930, especificadamente em 1936, o arquiteto George Fred Keck desenvolve um diagrama solar para demonstrar o sombreamento e a incidência de diferentes ângulos solares em uma edificação (Figura 2-41). Segundo Denzer (2013), esse seria, provavelmente, o primeiro diagrama solar bidimensional[53], no mesmo ano que Henry N. Wright[54]. Segundo Frampton (2001), Le Corbusier faz o seu primeiro diagrama solar bidimensional, em 1938, para um projeto de escritório, em Argel, conforme apresentado na Figura 2-42. Esses diagramas são ainda hoje, amplamente, utilizados no meio acadêmico e profissional.

Figura 2-41: Diagrama solar de Keck (1936).



Fonte: Denzer (2013).

Figura 2-42: Diagrama solar de Le Corbusier (1938).



Fonte: Frampton (2001).

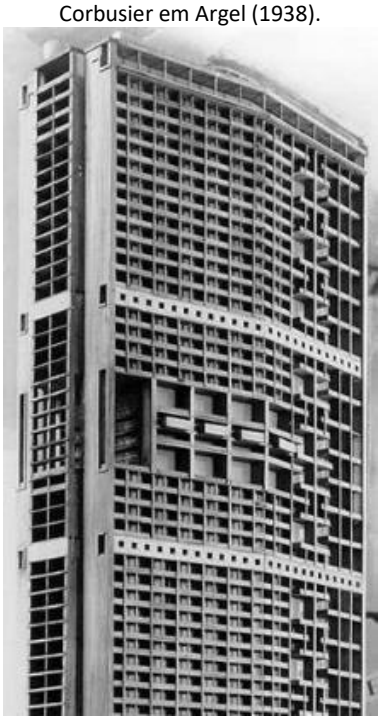
Nas primeiras décadas do século XX, antes da popularização do aparelho de ar-condicionado, havia a preocupação pelos arquitetos quanto à adequação arquitetônica de projetos aos diferentes climas sem

[53] Em um artigo anterior, Denzer (2012a) comenta que Keck pode ter sido o primeiro arquiteto a desenhar um diagrama de sombreamento em 2D, em 1937 e não em 1936, como confirmou em seu livro posteriormente (DENZER, 2013). Em seu livro, Denzer (2013) comenta em uma nota de fim que o diagrama solar de "Keck não foi publicado até 1939, mas provavelmente foi elaborado no início de 1936".

[54] Henry N. Wright (1910 – 1986), arquiteto e professor estadunidense.

o uso de meios artificiais. Enquanto a estrutura independente e superfícies envidraçadas permitia à arquitetura uma nova relação entre o interior e exterior, também trazia o problema do superaquecimento para as edificações em países com clima quente e temperatura elevada.

Figura 2-43: Projeto de escritórios de Le Corbusier em Argel (1938).



Fonte: Behling e Behling (2002).

Em busca de uma solução, Le Corbusier sistematiza a utilização do *brise-soleil* para seus projetos em 1933 (CORONA; LEMOS, 1998) e, consoante Behling e Behling (2002), o projeto de escritórios de Le Corbusier, em Argel, em 1938, se configurou como a primeira utilização do *brise-soleil*. No entanto, antes disso, o edifício da ABI (Associação Brasileira de Imprensa) dos irmãos Roberto, em 1936-38, já havia utilizado brises verticais. No entanto, Bruand (2012), afirma que a aplicação prática e a definição final do brise deve ser atribuída aos arquitetos brasileiros. Segundo Maragno (2000), "sua origem pode ser identificada com elementos de arquiteturas tradicionais utilizados para filtragem da radiação solar, da luz e do calor aplicados, principalmente, na arquitetura árabe". A concepção desse elemento é basicamente funcional, entretanto sua aplicação passa a dialogar com a composição arquitetônica da edificação. Para Baker (1998), o brise "levou ao abandono do efeito cúbico das primeiras casas (...)" modernistas e, segundo Mascaró (1990), o *brise-soleil* foi uma das inovações tecnológicas mais importantes do século XX no campo do controle ambiental.

Pouco antes da Segunda Guerra Mundial (1939 a 1945), o Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT), realizou trabalhos em edificações aquecidas por energia solar que levaram à construção de várias edificações de investigação sucessivas (PARKER, 2009). Entretanto, o maior interesse estadunidense pela eficiência energética surgiu devido à Segunda Guerra Mundial, quando a potencial escassez de energia se tornou um problema a ser superado (JONES; BOUAMANE, 2012).

No início da década de 1930, ainda, o arquiteto George Fred Keck experimentou os princípios básicos de casas solares passivas para projetar a "House of Tomorrow" [55] (Figura 2-44), em 1933, para Exposição Internacional em Chicago (IONESCU *et al.,* 2015). No final dos anos de 1930, pesquisadores do MIT também experimentaram projetos de casas solares que incorporavam bombas e dispositivos de armazenamento. A "MIT Solar House I" (Figura 2-45) é reconhecida como a primeira casa solar ativa (DENZER, 2012b).

[55] Conhecida também como "Glass Home of Tomorrow".

Figura 2-44: House of Tomorrow (1933).

Fonte: Barber (2016).

Figura 2-45: MIT Solar House I (1939).

Fonte: MIT Solar Decathlon Team (2018).

A "House of Tomorrow" de George F. Keck e "MIT Solar House I" de Hoyt C. Hottel[56], construídas na década de 1930, demonstraram os ganhos de calor importantes por meio da radiação solar. Os dois edifícios começaram o conceito de eficiência energética em edifícios com base em metodologias científicas de cálculo, estratégias de concepção e construção. O projeto térmico dos componentes e do equipamento, tais como coletores solares, foram as chaves desses edifícios IONESCU *et al.*, (2015). Ao contrário da "MIT Solar House I", a "House of Tomorrow" reflete a preocupação do arquiteto na utilização de materiais e técnicas construtivas modernas, como estrutura metálica independente e fechamento externo em vidro.

- *Década de 1940: Consolidação da arquitetura solar nos Estados Unidos*

Depois da Segunda Guerra Mundial, a preocupação com o esgotamento dos combustíveis fósseis potencializou a necessidade de alternativas energéticas e a urgência para demonstrar a viabilidade econômica da casa solar. Embora a ansiedade sobre a escassez de recursos fosse posterior à guerra, a crise do petróleo nos Estados Unidos, em 1947 e 1948, aumentou esses temores. A produção global de petróleo estava aumentando, mas não chegava aos lares estadunidenses (BARBER, 2016). Nessa época, surgiram discussões sobre a escassez de recursos naturais, preocupações sobre políticas de crescimento e sobre um futuro alternativo – é o princípio do ambientalismo contemporâneo. A casa solar moderna tornou-se importante nessas discussões (BARBER, 2008).

Na década de 1940, foram projetadas e construídas importantes edificações solares nos Estados Unidos, na primeira metade da década predominou edificações passivas como a "Sloan House" (1940); "Solar Park" (1941); "Casa Duncan" (1941) "Jacob Second House" (1944); "Casa Tucson" (1945) e, a partir da segunda metade da década, predominou as ativas como a "Boulder House" (1945), "MIT Solar

[56] Hoyt Clarke Hottel (1903-1998) foi professor no departamento de Engenharia Química do MIT. Hottel foi encarregado do programa de pesquisa de energia solar no MIT do final dos anos 1930 até meados dos anos 1960 (DENZER, 2013).

House II" (1947); Escola Elemental Rosa (1948) "Dover Sun House" (1948) e a "MIT Solar House III" (1949).

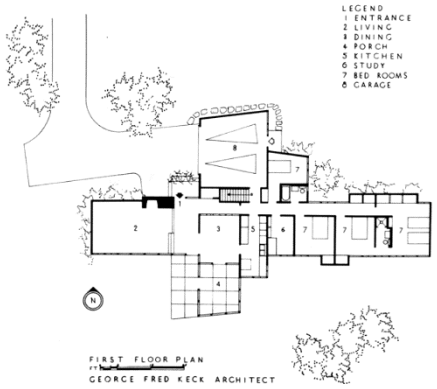
Os anos de 1940 introduziram, também, outra melhoria: toldos reguláveis de lona para proteger as janelas orientadas a Sul (HN). Ao contrário dos toldos reguláveis, os beirais fixos não podiam ser ajustados, corretamente, para a entrada da radiação solar, pois, em estações projetadas para sombrear, poderia haver períodos de baixas temperaturas e a necessidade de permitir o contado da radiação solar com a edificação (BUTTI; PERLIN, 1985).

Utilizando seus conhecimentos adquiridos em suas experiências anteriores, Keck construiu em 1940 a "Sloan House" utilizando vidro duplo ao Sul (HN) para esquentar a edificação no inverno e grandes beirais para proteger do Sol do verão (Figuras 2-46 e 2-47). O termo "solar house" foi utilizado pela primeira vez em uma matéria no jornal *Chicago Tribute*, para descrever o conjunto de estratégias utilizada na "Sloan House" (BUTTI; PERLIN, 1985).

Figura 2-46: Sloan House, Keck, Chicago (1940).

Fonte: Boyce (1986).

Figura 2-47: Sloan House, Keck, Chicago (1940).



Fonte: Barber (2014).

Como a guerra limitava o consumo de petróleo e gás, os usuários reconheciam o valor do Sol para o aquecimento das edificações no inverno. Com o final da Segunda Guerra Mundial, o mercado da construção civil cresceu, enormemente, nos Estados Unidos. Numerosas indústrias do ramo de casas pré-fabricadas adotaram o projeto solar e, também, muitos arquitetos projetavam casas solares para clientes individuais por todo país (BUTTI; PERLIN, 1985).

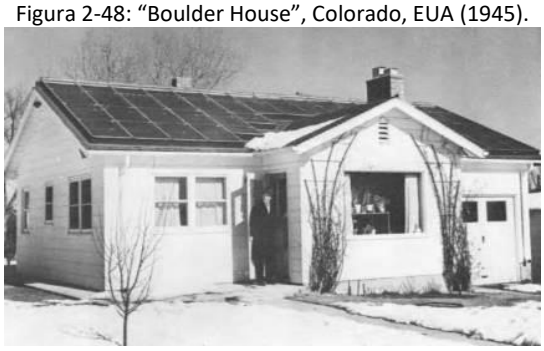
Entre os avanços tecnológicos dos anos 1940, a calefação solar foi trabalhada de formas diferentes por alguns pesquisadores. Com a intenção de aproveitar o calor solar excedente ao longo do dia e armazena-lo para utilização posterior, ao invés de permitir o sobreaquecimento ou perda do calor através das janelas abertas, muitas casas experimentais começaram a utilizar sistemas com coleta e armazenamento da energia solar (BUTTI; PERLIN, 1985). O sistema de armazenamento tem algumas consequências na arquitetura, como a necessidade de espaço para armazenar a energia térmica e, na

maior parte dos casos, a adoção de sistemas ativos para levar a energia coletada até o sistema de armazenamento e para o ambiente.

A “Boulder House”, construída em 1945, por George Löf[57], foi "o primeiro sistema de aquecimento solar de ar" (Figura 2-48) (DENZER, 2012b). Foi a primeira vez em que um sistema solar ativo era integrado a uma instalação de calefação doméstica existente (BUTTI; PERLIN, 1985).

O MIT construiu mais três casas solares ativas na década de 1940: “A MIT Solar House II” (Figura 2-49), “MIT Solar House III” (Figura 2-50) e a “Dover Sun House” (Figura 2-51). A “MIT Solar House II” foi concluída, em 1947, e os seus coletores de calor foram localizados não no telhado, mas na parede Sul (HN). O projeto foi liderado por Hoyt Hottel e tinha o objetivo de ser econômico. Por isso, combinaram em um só elemento as funções de captação, armazenamento e distribuição de calor, utilizando sete diferentes sistemas de “parede de água” (BUTTI; PERLIN, 1985).

Figura 2-48: “Boulder House”, Colorado, EUA (1945).



Fonte: Denzer (2012b).

Figura 2-49: “MIT Solar House II”, (1947)[58].

Fonte: MIT Solar Decathlon Team (2018).

Figura 2-50: “MIT Solar House III”, (1949).

Fonte: MIT Solar Decathlon Team (2018).

Figura 2-51: Fachada Sul da Dover Sun House, (1948).

Fonte: Butti e Perlin (1985).

[57] George Löf (1913 - 2009) foi um engenheiro e inventor estadunidense, conhecido por suas contribuições para a pesquisa de energia solar. "Ninguém desempenhou um papel mais duradouro no movimento das casas solares do século 20 do que George Löf" (DENZER, 2012b, tradução nossa).

[58] A foto demonstra a parede sul para experimentação dos coletores “parede de água”. Na foto as cortinas isolantes estão fechadas em todas as paredes, menos em uma.

Em 1949, a "MIT Solar House II" foi convertida em Solar III (MIT SOLAR DECATHLON TEAM, 2018) retomando, assim, à utilização de coletores no telhado. A "MIT Solar House III" foi a primeira casa solar habitada por uma família (MIT LIBRARIES, 2018).

A "Dover Sun House"[59] foi desenvolvida na mesma época da terceira experiência do MIT, no final de 1948, em Dover, Massachusets (BUTTI; PERLIN, 1985). A casa possuía 18 coletores verticais na parede Sul do pavimento superior e o sistema de armazenamento[60] ocupava, praticamente, todo segundo pavimento (BUTTI; PERLIN, 1985). A revista *Life Magazine,* em 2 de maio de 1949, proclamou: "A primeira casa aquecida pelo Sol do mundo" (DENZER, 2013; BARBER, 2016, tradução nossa). Em 1948, em Tucson, Arizona, Arthur Brown[61] constrói a primeira edificação pública aquecida pelo Sol, a Escola Elemental Rosa (BUTTI; PERLIN, 1985).

- *Década de 1950: Popularização do ar-condicionado, da lâmpada fluorescente e das casas solares ativas*

Apesar das melhorias tecnológicas, começaram a diminuir o número de construções solares no final dos anos 1940. Com o preço da energia cada vez mais baixo, a principal preocupação era com o custo inicial das construções. Muitas casas solares eram reproduzidas por construtores de forma equivocada, sem se atentarem à orientação solar, criando uma confusão sobre o termo "casas solares". As companhias elétricas e de gás nos Estados Unidos incentivavam o consumo para que pudessem recuperar os investimentos e a população era motivada a comprar eletrodomésticos para consumir mais energia. A crescente popularidade de aquecimento por sistemas mecânicos levou, também, à perda de interesse quase total pela arquitetura solar no final dos anos cinquenta (BUTTI; PERLIN, 1985). Os anos de investigações sobre o aquecimento solar doméstico demonstravam sua viabilidade técnica para climas frios, o único obstáculo era o elevado custo (BUTTI; PERLIN, 1985).

O governo dos Estados Unidos acreditava, no início dos anos 1950, que a energia nuclear, que julgavam ser limpa e segura, era a solução energética do futuro, espalhando essa crença com entusiasmo a todo o mundo (Figura 2-52). O átomo prometia uma fonte energética centralizada com reduzido aporte de mão de obra e baixo custo de combustíveis. Na Europa, o eminente esgotamento das reservas de carvão e a provável dependência futura do petróleo do Oriente Médio fez com que alguns países europeus vissem na energia nuclear a alternativa possível. Na época, os problemas dos resíduos

[59] Também chamada de "MIT Solar House VI" ou de "Talkes House" no artigo de Hartley Howe na revista *Popular Science* de 1949 (Howe, 1949). O projeto foi desenvolvido pela Dr. Maria Telkes (1900-1995) em parceria com a arquiteta Eleanor Raymond (1887-1989), sendo reconhecido como um projeto exclusivamente feminino (DENZER, 2013). Quem patrocinou o projeto e construção da casa também foi uma mulher, a Amelia Peabody (1890-1984).

[60] Utilizava o Sal de Glauber como material de mudança de fase (PCM - *Phase Change Material*) para armazenar e liberar o calor. Esse material funde a 32°C e armazena calor com sete vezes mais eficiência que a água. Em períodos quentes, o sal derretia e absorvia calor, resfriando o ar. Quando a temperatura diminuía, o sal resfriava, mudava de fase e recristaliza, liberando o calor armazenado. Sal de Glauber ou sal *mirabilis* é o sulfato de sódio anidro ($Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$).

[61] Arthur Thomas Brown (1900 - 1993) foi um arquiteto estadunidense, entusiasta da arquitetura solar.

nucleares eram desconsiderados (BUTTI; PERLIN, 1985). A primeira crise internacional do petróleo, em 1956, causada por problemas de abastecimento pelo Canal de Suez, no Egito, leva a um aumento súbito do preço do petróleo e novas preocupações sobre a questão energética global.

Figura 2-52: Anúncio da energia nuclear em revista (1956).

Fonte: Butti e Perlin (1985).

Anteriormente à década de 1950, a maior parte dos edifícios de altura média e alta utilizavam estratégias passivas de iluminação e ventilação, como nos casos do *Chrysler Building* (1928) e do *Empire State Building* (1930) construídos em Nova Iorque. Na maioria das edificações projetadas, a partir da década de 1950, a luz elétrica era a principal fonte de iluminação, ao mesmo tempo em que o ar-condicionado começa a se popularizar (KEELER; BURKE, 2010). Os avanços nos sistemas de refrigeração e de iluminação, como o uso do ar-condicionado e da lâmpada fluorescente, levaram a grandes mudanças nas edificações. Na década de 1950, era comum encontrar lâmpadas fluorescentes em edificações comerciais, consumindo menos energia e gerando menos calor que as lâmpadas incandescentes, produzindo o mesmo fluxo luminoso. No final de 1940 e início de 1950, o aparelho de ar-condicionado populariza-se em edifícios altos e, nas décadas de 1960 e 1970, propaga-se, definitivamente, nas edificações (KEELER; BURKE, 2010). Um dos edifícios altos pioneiros a utilizar o esse equipamento é o *Seagram Building* (1958), em Nova Iorque, de Mies van der Rohe.

A combinação da utilização do ar-condicionado e da lâmpada fluorescente alterou, drasticamente, o formato das edificações. Na primeira metade do século XX, os prédios altos tinham planta baixa bastante estreita, além de pé-direito alto para permitir uma iluminação natural difusa e profunda. As janelas podiam ser abertas para possibilitar a ventilação natural e cruzada. A chegada do equipamento de ar-condicionado e da lâmpada fluorescente permitiu a construção de edificações maiores, menos estreitas, com menor pé-direito que, por sua vez, exigiam mais energia para funcionar e reduziram a conexão entre os usuários e o exterior da edificação (KEELER; BURKE, 2010). Para Lamberts, Dutra e Pereira (2014), os sistemas de climatização e iluminação elétrica passaram a ser largamente utilizados, dando ao projetista uma posição cômoda perante à adequação do edifício ao clima.

Durante os anos de 1950, os arquitetos e engenheiros solares construíram uma segunda geração de edifícios condicionados, mediante os sistemas ativos de aquecimento solar. No final dos anos 1950, o sistema sazonal de armazenamento de energia foi um dos temas mais importantes na área de edifícios (IONESCU *et al*., 2015).

Em 1956, James Hunter[62] e George Löf projetam a "Denver House" (Figura 2-53), a qual tinha um sistema de aquecimento solar que funcionou, continuamente, por cinquenta anos. Segundo alguns críticos, a “Denver House” foi a primeira casa estadunidense a ter equipamentos de aquecimento solar como opcional que não ditam e não distorcem o projeto da casa (GRISWOLD, 1958; DENZER, 2012b).

Outra edificação inovadora desse período foi o “Solar Building”, construída em 1956, em Albuquerque, no Novo México (Figura 2-54), que é considerado o primeiro edifício comercial com aquecimento solar ativo no mundo (LOGAN, 2005). Mais tarde, em 1959, foi construída a “MIT Solar House IV”, localizada em Lexington, Massacusetts (Figura 2-55) (MIT LIBRARIES, 2018).

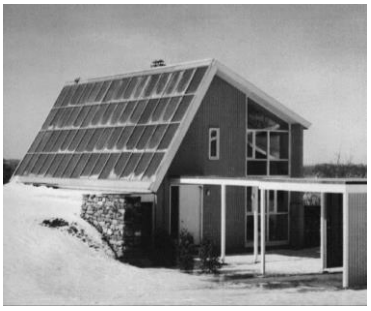
Figura 2-53: "Denver House" (1956).

Fonte: Denzer (2012b).

Figura 2-54: “Solar Building” (1956).

Fonte: Gilman (1974).

Figura 2-55: “MIT Solar House IV” (1959).



Fonte: Barber (2016).

As tecnologias na área da construção continuavam avançando rumo à possibilidade de maior eficiência energética. Em 1954, a tecnologia fotovoltaica foi revelada pela primeira vez, quando Daryl Chapin, Calvin Fuller e Gerald Pearson[63] inventaram a primeira célula solar que convertia energia do Sol para energia elétrica (BARBER, 2013). Nessa mesma década, os vidros simples do início do século XX evoluíram para vidros duplos fundidos (LOFTNESS; HAASE, 2013).

- Década de 1960: Predomínio da arquitetura solar passiva

A década de 1960 começou com uma grande prosperidade econômica dos países ricos e com grandes avanços tecnológicos. Até 1961, o carvão era a principal fonte primária de energia no mundo, quando foi ultrapassado pelo petróleo (FARIAS; SELLITTO, 2011). Um marco importante na questão energética

[62] James M. Hunter (1908 – 1983), arquiteto estadunidense, interessado em pesquisa arquitetônica, especialmente em projeto solar ativo.
[63] Daryl Chapin (1906 – 1995) e Gerald L. Pearson (1905 - 1987) eram físicos enquanto Calvin Souther Fuller (1902 – 1994) foi um físico químico. Todos eram estadunidenses.

mundial foi a fundação da Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEP), em 1960, pelos cinco principais países produtores de petróleo: Arábia Saudita, Irã, Iraque, Kuwait e Venezuela. Nessa década, também, iniciou uma grande revolução comportamental, revolução sexual, protestos juvenis, experiências com drogas, surge o feminismo, os hippies, contracultura, protestos contrários à Guerra Fria e à Guerra do Vietnã. Alguns movimentos ambientalistas ganham força e, em 1961, foi fundada, na Suíça, a *World Wide Fund for Nature* (WWF, "Fundo Mundial para a Natureza") por um grupo de cientistas preocupados com a devastação da natureza. No final da década, o homem chega à Lua.

Nos anos de 1960, os computadores permitiam o processamento de dados de carga térmica das edificações e, com isso, novos métodos de quantificação de conforto térmico surgiram, auxiliando no desempenho energético dos edifícios. Fanger[64] teve grande contribuição na quantificação da carga térmica necessária ao conforto térmico. O modelo de Fanger continua sendo um dos modelos de conforto mais utilizados nos dias atuais (IONESCU *et al*., 2015). Nessa década, começa o uso da informática para fins comerciais e da Arpanet, que se tornaria o embrião da Internet.

Na década de 1960, os irmãos Olgyay (OLGYAY, 1963) foram os primeiros a criar um procedimento sistemático que possibilitou a adaptação de uma edificação às necessidades humanas com relação às condições climáticas. Olgyay desenvolveu sobre uma carta psicométrica um diagrama bioclimático, em que mostra a zona de conforto humano em relação à temperatura e umidade do ar, velocidade do vento, radiação solar e resfriamento por evaporação. Em 1963, o termo bioclimático foi usado pela primeira vez por Victor Olgyay. Em 1969, Givoni[65] concebeu uma nova carta bioclimática da edificação, baseada na de Olgyay, em sua publicação "*Man, climate and architecture*" (GIVONI, 1969).

Segundo Loftness e Haase (2013), na década de 1960, o petróleo era abundante e barato, a energia renovável não era um tema de importância popular e muito pouco aconteceu quanto a projetos arquitetônicos passivos. No entanto, alguns bons exemplos de arquitetura passiva podem ser percebidos como a St. George's School de Wallasey (1962) e a aplicação do conceito de parede Trombe (1967) em uma edificação.

Construída em 1962, a St. George's School de Wallasey, foi o primeiro edifício solar na Grã-Bretanha (Figura 2-56). A escola foi projetada para que condições térmicas fossem alcançadas sem o uso de aquecimento convencional (ativo), somente usando ganhos solares diretos, calor do sistema de iluminação e dos usuários (DAVIES, 1986). Os vidros da fachada Sul (HN) são duplos e podem ser abertos e fechados pelos próprios usuários para o controle da temperatura interna (VALE; VALE, 1978).

[64] Povl Ole Fanger (1934 - 2006), professor e pesquisador dinamarquês, é o principal representante da linha analítica de avaliação das sensações térmicas humanas. Suas equações e métodos têm sido utilizados mundialmente e serviram de base para a elaboração de normas internacionais importantes, fornecendo subsídios para o equacionamento e cálculos analíticos de conforto térmico e conhecidos hoje como PMV (*Predicted Mean Vote*) e o PPD (*Percentage of Dissatisfied*).

[65] Baruch Givoni é um arquiteto israelense, um dos mais reconhecidos especialistas em arquitetura bioclimática do mundo.

O desenvolvimento da "parede Trombe" foi outro bom exemplo de aplicação de conceitos da arquitetura solar passiva na Europa. O edifício piloto original foi construído no Centro Nacional de Pesquisadores Científicos (CNRS), em 1967, no sul da França e, mais tarde, desenvolvido com uma versão ventilada da parede em 1974 (Figura 2-57) (MAZRIA, 1979; LOFTNESS; HAASE, 2013). A parede Trombe foi patenteada, em 1881, pelo seu inventor, o engenheiro estadunidense Edward Morse, e popularizada, em 1964, pelo engenheiro francês Félix Trombe e o arquiteto Jacques Michel (HOYLE, 2011; AGRAWAL; TIWARI, 2003). A parede era revestida com vidro ou outro material que permitisse que a radiação do Sol (ondas curtas) passasse para a alvenaria, mas inibia a rerradiação do calor (ondas longas) para fora. Como resultado, a parede Sul (HN) acumula calor durante o dia e libera, gradualmente, para o interior da casa à noite. Uma desvantagem substancial desse sistema é a perda de visão para o exterior (JONES; BOUAMANE, 2012).

Figura 2-56: Fachada Sul da "St. George's School de Wallasey" (1974).

Fonte: Davies (1986).

Figura 2-57: "Michel–Trombe House", Odeillo, França (1967).

Fonte: Loftness e Haase (2013).

- Década de 1970: A crise do petróleo, predomínio das casas passivas e o início do superisolamento

A década de 1970 representou importantes avanços na área da computação que permitiram o desenvolvimento de programas para estudo energético das edificações. Entre os programas, destacam-se: DEROB (*Dynamic Energy Response of Buildings*), NBSLD (*National Bureau of Standards Load Determination*) e BLAST (*Building Loads Analysis and Thermodynamics*), e mais tarde, DOE-2 (*Department of Energy*). BLAST e DOE-2 foram desenvolvidos com investimentos feitos em universidades pelo Departamento de Defesa e pelo Departamento de Energia dos EUA respectivamente (CRAWLEY *et al*., 2001).

Em 1973, o preço do petróleo no mercado mundial subiu, exponencialmente, o que aconteceu novamente em 1979. Com o iminente risco de esgotamento das fontes de energia e a crise do petróleo de 1973, houve um crescimento das preocupações ambientais e do interesse público pelo baixo consumo energético das edificações. Na busca da redução do consumo energético, os sistemas solares

ativos, caros e complexos, foram abandonados em favor de sistemas solares passivos (PARKER, 2009), os quais, gradualmente, foram integrados aos sistemas de isolamento térmico.

Com o aumento dos preços da energia, os sistemas de água quente solar voltaram a aparecer nos Estados Unidos (JONES; BOUAMANE, 2012). Preocupados com a falta de abastecimento de petróleo, os Estados Unidos criaram um programa nacional para reduzir a dependência estrangeira. Em resposta à crise, o governo estadunidense criou, em 1975, a Administração de Pesquisa e Desenvolvimento Energético (*Energy Research and Development Administration* - ERDA) e o Instituto de Pesquisa de Energia Solar (*Solar Energy Research Institute* - SERI). Junto a isso, o Departamento de Habitação e Desenvolvimento Urbano (HUD) realizou uma competição nacional com subsídios para a construção das casas solares. Nesse mesmo período, muitos físicos atômicos se tornaram físicos de construção solar em renomados laboratórios dos Estados Unidos (LOFTNESS; HAASE, 2013). Segundo Costa (2008), a crise levou à seguinte questão: “continua-se a construir edifícios que dispendem grandes consumos energéticos, ou volta-se à primitiva abordagem de construção com o clima?”.

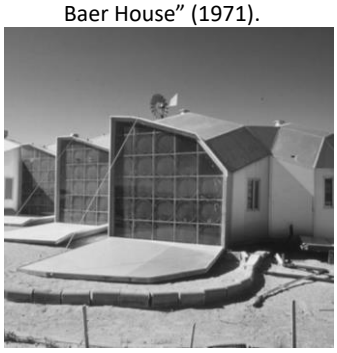
Durante às décadas de 1970 e 1980, a eficiência energética não era uma preocupação dominante na academia, a qual ocupava-se com discussões relativas ao movimento moderno e pós-moderno. Nesse contexto, enquanto a crise energética aprofundava-se, o enfraquecimento dos dogmas modernos abria espaço para uma liberdade projetual, a qual, muitas vezes, distanciava-se de questões trabalhadas pelo movimento moderno, como a utilização de elementos de controle solar. Da mesma forma, a localização dos edifícios, a partir de critérios de orientação em relação ao Sol era muitas vezes desconsiderada e alheia ao consumo energético (MASCARÓ; MASCARÓ, 1985). Grande parte dos professores de arquitetura e engenharia, nas universidades, não adotava o uso solar e o consumo energético como questões significativas de projeto (LOFTNESS; HAASE, 2013).

A partir da década de 1970, há uma evolução da preocupação mundial em relação às consequências da atual forma de desenvolvimento e com a velocidade da deterioração e do esgotamento dos recursos naturais. Convenções internacionais como a Conferência das Nações Unidas sobre o Ambiente Humano (Estocolmo, 1972) passam a ser realizadas e metas definidas para a desaceleração do consumo de recursos naturais. Do mesmo modo, grupos ambientais como o Greenpeace (Canadá, 1971) são criados. As preocupações energéticas e ambientais só aumentaram com os acidentes na usina nuclear estadunidense de *Three Mille Island*, em 1979.

A primeira metade da década de 1970 é dedicada à arquitetura passiva, com o mínimo de uso de tecnologia ativas, com influência dos movimentos culturais e sociais da contracultura da década de 1960. As experiências iniciais buscavam ganhos solares diretos por meio de fachadas envidraçadas e ganhos solares indiretos com uso de massa térmica para aquecer e resfriar os ambientes.

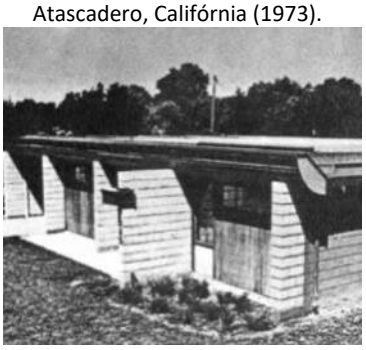
Três bons exemplos de edificações que empregaram tecnologias passivas com o uso de massa térmica são a "Steve Baer House"[66] construída em 1971, "Roof Pond System"[67] construída em 1973, e a "MIT Solar House V" construída em 1978 (Figuras 2-58, 2-59 e 2-60). As três edificações utilizam um princípio semelhante de massa térmica da água para armazenar o calor em períodos quentes e liberá-lo nos períodos frios.

Figura 2-58: Exterior da "Steve Baer House" (1971).



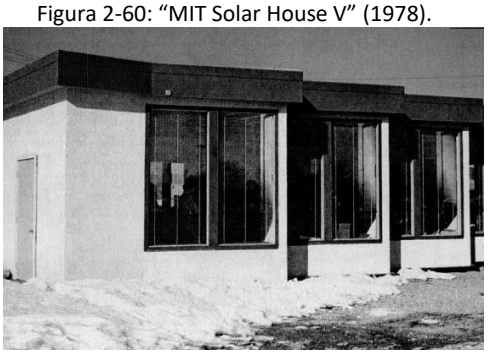
Fonte: Denzer (2013).

Figura 2-59: "Roof Pond System", Atascadero, Califórnia (1973).



Fonte: Cornoldi e De Llorens (1982).

Figura 2-60: "MIT Solar House V" (1978).



Fonte: Stepler (1978).

Na Europa, as primeiras regulamentações sobre isolamento térmico foram introduzidas após a crise de petróleo de 1973. A França, o primeiro país a ter uma regulamentação térmica, em 1974, tratava inicialmente de isolamento e da ventilação das residências e, posteriormente, incorporou outros fatores como aportes solares (GAUZIN-MULLER, 2011). Em 1975, a *American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers* (ASHRAE), implantou a primeira norma de eficiência energética para projetos e construções de novas edificações, a ASHRAE Standard 90, elaborada como parte do programa dos EUA de incentivo à eficiência energética (CARLO, 2008).

Na segunda metade da década de 1970, aumentou o interesse pelo superisolamento e, consequentemente, o uso das tecnologias que o viabilizavam, como janelas com vidro triplo e sistemas de ventilação ativos com baixo consumo de energia (trocador de calor). Nesse sentido, uma série de edificações e pesquisas foram desenvolvidas e testadas tendo como base estes conceitos.

Em 1976, uma equipe da Universidade de Illinois desenvolveu e promoveu o superisolamento com o projeto "Lo-Cal House"[68] (Figura 2-61), provando que consome apenas um terço do calor de uma edificação convencional (SHURCLIFF, 1988). O conjunto das estratégias adotadas pelo projeto Lo-Cal foi chamado de casa superisolada, sendo creditada ao professor Wayne Shick[69] a criação do termo (HOLLADAY, 2010). No entanto, o superisolamento pode ser creditado com o início do projeto Lo-Cal

[66] Também conhecida como "Solarchitecture House" e "Zomeworks house".
[67] Também conhecida como "Atascadero Residence".
[68] Também conhecida como "Illinois House" (SHURCLIFF, 1981).
[69] Wayne I. Shick (1919 - 2007), foi professor de arquitetura e pesquisador da Universidade de Illinois em Champaign, é reconhecido internacionalmente como o pioneiro da pesquisa da casa superisolada.

House, em 1974. Segundo Shick, o ano de 1974 foi o responsável pelo “boom” do superisolamento (RUBY, 1981). Depois que Shick publicou, em 1976, seu conceito de superisolamento, outros grupos de pesquisadores começaram a utilizar o mesmo conceito (FINGERLING, 1996).

O projeto “Lo-Cal House” influenciou a construção da “The Saskatchewan Conservation House”[6], em 1977 (Figura 2-62), no Canadá, a primeira edificação a demonstrar, publicamente, a validade do superisolamento (BESANT; DUMONT; SCHOENAU, 1979; RUBY, 1981; PARKER, 2009), e a construção da “Leger Superinsulated House”, em 1979 (Figura 2-63), a qual motivou a construção de casas superisoladas nos Estados Unidos e também na Europa (SHURCLIFF, 1988).

Figura 2-61: “Lo-Cal House” (1976).

Fonte: Shick e Jones (1976).

Figura 2-62: “The Saskatchewan Conservation House” (1977).

Fonte: Ionescu *et al*. (2015).

Figura 2-63: “Leger House”, EUA, fachada sul (1979).

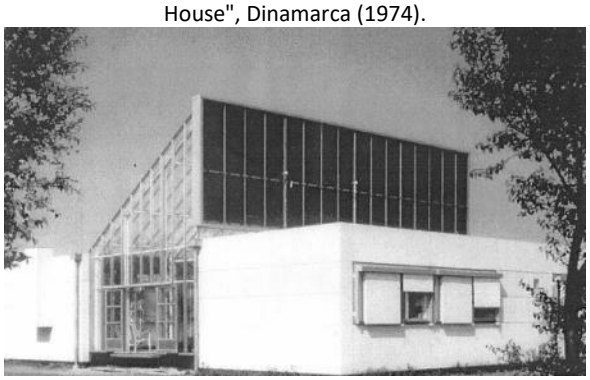
Fonte: Ingersoll (1980).

Em 1974, Esbensen e Korsgaard[70] construíram na Universidade Técnica da Dinamarca a "DTU Zero Energy House"[71] (Figura 2-64) e lançaram o termo "Zero Energy House" (ESBENSEN; KORSGAARD, 1977). A edificação não só introduziu o termo "casa de energia zero", mas, pela primeira vez, também definiu a pretensão de realizar um edifício sem requisitos de energia de aquecimento ativo. Segundo Fingerling (1996), essa foi a primeira casa formulada sem necessidade de aquecimento ativo. Embora tivesse o nome de energia zero, o edifício visava somente atingir o balanço zero em energia de climatização (PACHECO, 2013). No mesmo, ano a “*Philips Experimental House*”[4] (Figura 2-65) construída na Alemanha, utilizou sistemas passivos e ativos, isolamento térmico, janelas com alta tecnologia e sistemas de ventilação mais eficientes (FINGERLING, 1996).

[70] Vagn Korsgaard (1921 - 2012) foi engenheiro civil, professor na DTU (Universidade Técnica da Dinamarca); Torben Esbensen, professor e engenheiro na DTU.

[71] A edificação também é conhecida na literatura por “Nullenergihuset” (Casa de Energia Zero).

Figura 2-64: Vista para o Sudoeste da "DTU Zero Energy House", Dinamarca (1974).



Fonte: Fingerling (1996).

Figura 2-65: "Philips Experimental House", Alemanha, vista do sul (1974).

Fonte: Fingerling (1996).

- *Década de 1980: Início da certificação do superisolamento*

Na década de 1980, a área tecnológica, principalmente no campo da computação, continuava avançando. A identificação do buraco da camada de ozônio por climatologistas, em 1985, e o pior acidente nuclear da história na usina nuclear da cidade de Chernobyl, na União Soviética (atual Ucrânia), em 1986, aumentaram as preocupações dos ambientalistas. As convenções internacionais relativas à desaceleração do consumo de recursos naturais iniciadas na década passada tiveram continuidade, entre elas, a Convenção de Viena para Proteção da Camada de Ozônio, em 1985, e o Protocolo de Montreal, em 1987.

Em 1980, um grupo de pesquisadores da Universidade da Califórnia afirma que o superisolamento é tecnicamente exitoso e economicamente viável. O grupo também contribuiu com ideias sobre as exigências de renovação do ar no interior das edificações e com a eficácia de trocadores de calor (SHURCLIFF, 1988).

Logo, no início da década de 1980, em 1982, é criado o R-2000, programa canadense de certificação que visava à eficiência energética das edificações tendo como um dos principais requisitos o superisolamento. Em 1984, o governo federal do Canadá lançou uma campanha massiva para incentivar os construtores e o público a adotar o superisolamento por meio desse programa. Em 1987, o governo do estado do Alasca adotou o programa R-2000, promovendo, assim, o superisolamento. Os usuários beneficiavam-se por ter uma certificação de que a casa estava bem isolada e construída e que as contas anuais de aquecimento seriam baixas e os construtores eram beneficiados por receber instruções gratuitas e uma certificação que tinha grande apelo aos usuários/compradores. O programa R-2000 teve amplo apoio da indústria, de instituições privadas e de várias associações de construtores (SHURCLIFF, 1988).

A partir de 1986, segundo FINGERLING (1996), os preços da energia caíram novamente e a eficiência energética não era considerada um problema. Entretanto, além da questão econômica, a preservação

ambiental está cada vez mais incluída na questão energética. Praticamente ao mesmo tempo, no final da década de 1980, o custo da produção de eletricidade por intermédio da energia fotovoltaica diminuiu o preço, tornando-se cada vez mais viável a possibilidade de usar o recurso solar para a geração doméstica (PARKER, 2009).

No final dos anos 1980, ainda, inspirado pelas casas eficientes em energia da década de 1970, Wolfgang Feist[72], em colaboração com Bo Adamson[73] esboçou o conceito "*Passive House*" (IONESCU *et al*., 2015). Na década de 1990, foi construída a primeira casa *Passive House* e, posteriormente, com base nessa construção, o conceito foi definido e padronizado.

Na década de 1980, o interesse por edificações energeticamente eficientes, levou alguns arquitetos, engenheiros e físicos latino-americanos, especialmente ligados a universidades, a desenvolver edificações com tecnologias passivas, assim como aconteceu nos Estados Unidos e na Europa até então. Há dois exemplares notáveis de edificações experimentais passivas na Argentina: Casa Mendoza (1980) e Casa Solar La Plata (1981). No Brasil, nessa mesma época, foram desenvolvidas edificações residenciais passivas desenvolvidas por professores da UFRGS, UFSC que serão abordadas posteriormente.

Dessa forma, em 1980, o arquiteto Enrico Tedeschi [74] desenvolve uma casa experimental em Mendoza[75] que é considerada a primeira casa solar argentina (Figura 2-66) (MITCHELL; BASSO, 2005). Segundo Mitchell e Basso (2005), o objetivo do protótipo foi experimentar sistemas ativos e passivos que funcionaram de forma independente. Vista à experiência exitosa em todo o mundo dos sistemas passivos, decidiu-se não continuar com a implementação dos ativos. Logo depois, em 1981, foi construída também na Argentina a Casa Solar La Plata[76] (Figura 2-67). A construção do protótipo experimental solar surgiu como necessidade para a conclusão do projeto de um conjunto de 30 casas solares do Programa CEASE (Conjunto de Edilício Solar de Alta Densidade) e foi projetado para o clima temperado úmido.

[72] Wolfgang Feist (nascido 1954) é um físico alemão, físico de construção e professor. Fundou *Passivhaus Institut* em Darmstadt, na Alemanha, e é considerado um pioneiro do conceito *Passive House*. Junto com Bo Adamson, em 1988 cunhou o termo *Passive House*.

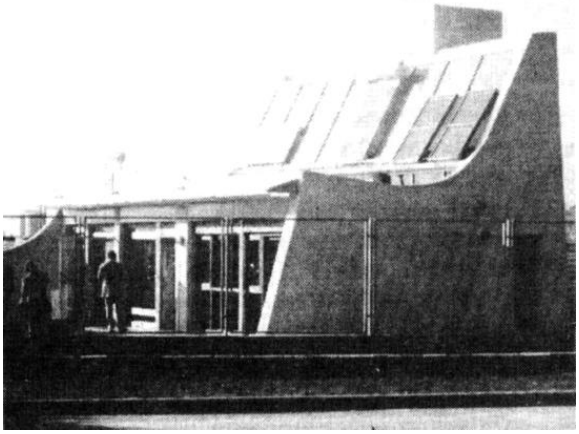
[73] Bo Adamson (nascido 1925), sueco, é um engenheiro e pesquisador de edifícios. Junto com Wolfgang Feist, em 1988 cunhou o termo *Passive House*.

[74] Enrico Tedeschi (1910 –1978) foi um arquiteto e urbanista, escritor professor e pesquisador ítalo-argentino.

[75] Também conhecida como Casa Solar Experimental Enrico Tedeschi ou Casa Tedeschi. A edificação tem um esquema funcional simples, com zonas de estar diurno e noturno orientados à norte e de serviço a sul. Nos dormitórios há um sistema de parede trombe, portas janelas para ganho de calor direto. Também possui sistema de isolamento térmico com isopor. Toda a frente norte é protegida, durante as noites de inverno, com cortinas de enrolar de madeira. Na zona de serviços há um desnível na cobertura que garante ganhos diretos de calor solar. Sobre esta zona há diferentes painéis experimentais para aquecimento de água (MITCHELL; BASSO, 2005).

[76] Rosenfeld, Guerrero e Ravella (2009) chamam de Protótipo Experimental de La Plata. A Casa Solar La Plata (1981) integra estratégias projetuais para minimizar o uso de energia em climatização, tais como: parede de água, água quente solar, isolamento térmico, ventilação cruzada e seletiva, proteção solar, teto ventilado, chaminé solar, secador solar de roupa, resfriamento solar. O projeto foi composto pelo arquiteto Elías Rosenfeld; Jorge Luis Guerrero e a arquiteta Olga Ravella.

Figura 2-66: Casa Tedeschi, primeira casa solar da Argentina (1981).



Fonte: Giovannardi (2016).

Figura 2-67: A Casa solar de La Plata (1981).

Fonte: Rosenfeld, Guerrero e Ravella (2009).

- Década de 1990: Predomínio do conceito Passive House

A década de 1990 é marcada pela popularização do computador, da internet e do comércio eletrônico. Em 1992, ocorre, no Rio de Janeiro, a Eco-92, uma conferência mundial de chefes de estado organizada pelas Nações Unidas para debater os problemas ambientais mundiais. Em 1991, após o incêndio de poços de petróleo do Kuwait, houve uma nova crise econômica e ecológica. Com a diminuição de petróleo no mercado, há a elevação do seu preço no mercado mundial.

Os materiais e técnicas construtivas evoluem de forma ainda mais acelerada. Como, por exemplo, um vidro simples no início do século XX (U = 5,8 W/m^2.K), evoluiu para duas vidraças fundidas na década de 1950 (U = 2,8 W/m^2.K) e na década de 1990 estava disponível em vidros triplos (U = 0,5 W/m^2.K), ou seja, com a capacidade isolante dez vezes superior ao vidro de um século atrás. Como resultado, alguns conceitos que antes se mostraram ineficazes para um dado clima ou tipo de construção podem ser reaplicados e "redescobertos" (LOFTNESS; HAASE, 2013).

O conceito de *Passive House*[77]*,* esboçado no final dos anos 1980 integrou a maioria das teorias e algoritmos de projeto passivo da década de 1990. A primeira casa *Passive House*, "casa passiva Darmstadt-Kranichstein", foi construída em 1991, em Darmstadt, Alemanha (IONESCU *et al*., 2015). Em 1995, F. Feist desenvolveu o conceito *Passive House* e, em 1996, funda o Instituto *Passive House*.

Outro projeto inovador do ponto de vista energético foi o "*Self-Sufficient Solar House*", em Freiburg, na Alemanha. Com projeto iniciado em 1988, e construção finalizada em 1992 (Figura 2-68). É a

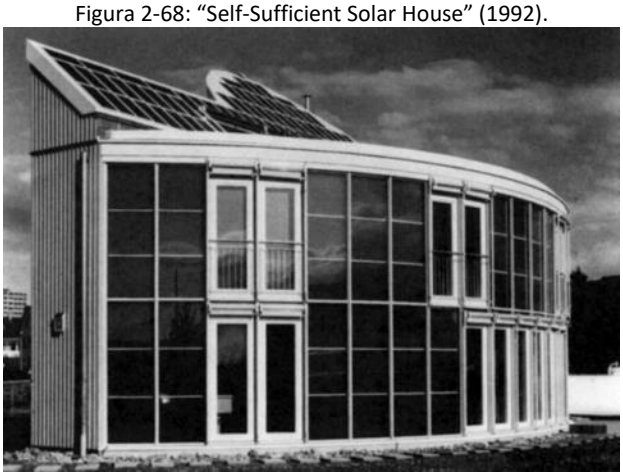
[77] Os termos "Passivo", "Passivhaus" e "*Passive House*" podem originar uma certa confusão. O "projeto passivo" é um termo genérico, e é utilizado para definir uma abordagem estratégica ao projeto que é aberta a interpretação por diferentes pessoas em diferentes localidades e climas, com o objetivo de minimizar o consumo energético para aquecimento, ventilação, iluminação e refrigeração (PASSIVE-ON, 2007). Enquanto o termo "Passivhaus" é utilizado para designar um padrão construtivo que utiliza estratégias passivas e ativas com requisitos claros baseado em cinco estratégias para promover eficiência energética e conforto higrotérmico: isolamento térmico do fechamento; sistema de ventilação ativo eficiente; minimização de pontes térmicas; esquadrias eficientes e bom nível de estanqueidade. Com a internacionalização do conceito "Passivhaus" o termo em alemão deu origem ao termo que é atualmente utilizado: "*Passive House*".

primeira casa autônoma de energia projetada pelo *Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems* (Instituto Fraunhofer para Energia Solar de Freiburg). Uma vez que não são utilizadas fontes de energia convencionais, esta casa funciona sem emitir qualquer poluição (STAHL; VOSS; GOETZBERGER, 1994). Segundo Ionescu *et al*. (2015), devido a um grande isolamento e das tecnologias de energia solar, a casa foi capaz de cobrir as suas próprias necessidades sem a ajuda de fontes de energia externa.

Em 1994, um novo padrão chamado Minergie foi criado, tornando-se um padrão oficial em 1998. Especialmente desenvolvidos para edifícios novos e remodelados, Minergie é um selo de qualidade suíço para edifícios de baixo consumo de energia baseado nas ideias de Ruedi Kriesi[78] e Heinz Uebersax[79]. Também no ano de 1994 foram construídas as duas primeiras casas Minergie. Após três anos, a Minergie Association passou a se chamar Minergie-P. Mais rigoroso do que o padrão inicial, Minergie-P é um correspondente ao padrão *Passive House* (IONESCU *et al*., 2015).

Em 1994, entrou em operação a primeira edificação de energia positiva (*Plus Energie Haus*) chamada Heliotrope (Figura 2-69). A casa, construída em Freiburg, Alemanha, foi projetada pelo arquiteto Rolf Disch[80]. Esta foi a primeira casa na qual a quantidade de energia produzida foi maior do que a consumida, todas elas totalmente renováveis. As tecnologias implementadas no edifício usavam energia inteiramente fornecida por fontes renováveis (IONESCU *et al*., 2015). Outra característica que diferencia o projeto Heliotrope é a forma adaptativa que foi inspirada pelo movimento diurno de uma planta nativa de Freiburg. O movimento de rotação tornou-se uma inspiração importante para o arquiteto como uma estratégia de projeto para otimizar os ganhos solares passivos e energia colhida por sistemas solares ativos (LEE; SPIEGELHALTER, 2012). A estrutura gira para acompanhar o sol, o que lhe permite aproveitar ao máximo a luz e calor solar (LECHNER, 2014).

Figura 2-68: “Self-Sufficient Solar House” (1992).



Fonte: Stahl, Voss e Goetzberger (1994).

Figura 2-69: “Heliotrope” (1994).

Fonte: Lee e Spiegelhalter (2012).

[78] Ruedi Kriesi (nasceu em 1953), engenheiro mecânico, professor e pesquisador suíço.
[79] Heinz Uebersax foi um dos criadores, junto com Ruedi Kriesi, do conceito Minergie.
[80] Rolf Disch (nasceu em 1944), arquiteto e ativista ambiental alemão. Dedica especial atenção ao uso de energia solar em seus projetos.

Na década de 1990, em 1996, contudo, tem início o desenvolvimento do programa computacional *EnergyPlus*, tendo suas raízes em dois outros programas: BLAST (*Building Loads Analysis and Thermodynamics*) e DOE-2 (*Department of Energy*), que foram desenvolvidos por meio de investimentos feitos em universidades pelo Departamento de Defesa e pelo Departamento de Energia dos EUA, respectivamente, a partir do final da década de 1970 (CRAWLEY *et al*., 2001). O programa, que é capaz de fazer análise energética e simulação de carga térmica de construções, revoluciona as pesquisas de eficiência energética em edificações e serve como base referencial para as principais pesquisas realizadas a partir de então.

2.2.4 Século XXI: A Atualidade da arquitetura passiva

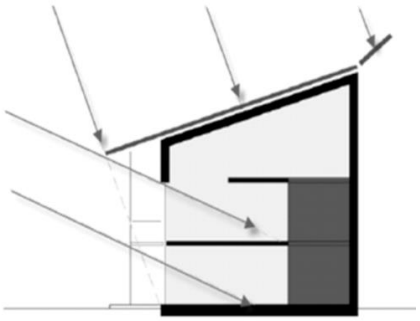
Neste século, a Internet se consolida como veículo de comunicação em massa e armazenagem de informações. Cresce a popularização da banda larga, surge o conceito de computação nas nuvens, a massificação dos serviços de mensagens instantâneas, e a popularização dos celulares inteligentes. Apesar dos grandes avanços tecnológicos do início do século XXI, um novo acidente nuclear volta a preocupar o mundo. Em 2011, um tsunami provoca um desastre na usina nuclear de Fukushima, no Japão, tornando-se o segundo maior desastre nuclear da história. No século XXI, preocupações com eficiência energética são encontradas de forma generalizada em todas as áreas (IONESCU *et al*., 2015).

Em 2004, a cidade solar “Solarsiedlung”, em Freiburg, foi projetada pelo arquiteto Rolph Disch de acordo com o padrão *Plusenergiehaus* (Figuras 2-70 e 2-71). O complexo é composto por 50 casas passivas e um prédio comercial. As casas possuem sistema fotovoltaico fixo que gera excedente de energia. O edifício comercial, conhecido como “Sonnenschiff” ou "Sun Ship", é o primeiro edifício comercial de energia positiva. O complexo é considerado uma cidade/comunidade autossustentada ou com energia positiva (IONESCU *et al*., 2015).

Figura 2-70: Solarsiedlung, edificações residenciais e comerciais com energia positiva (2004).

Fonte: Lee e Spiegelhalter (2012).

Figura 2-71: Esquema demonstrando o controle e o aproveitamento da radiação solar.



Fonte: adaptado de Lee e Spiegelhalter (2012).

As primeiras décadas do século XXI também são marcadas pelo estudo e aplicação do conceito *Passive House* em países de climas quentes (PASSIVE-ON, 2007), inclusive na América Latina.

No contexto atual de procura pela redução dos impactos das edificações ao meio ambiente, destaca-se a iniciativa da União Europeia a qual visa reduzir 90% dos gases do efeito estufa até 2050. A Diretiva do Desempenho Energético de Edifícios (DIRETIVA 2010/31/EU, 2010), estabelece que, a partir de dia 31 de dezembro de 2020, todos os novos edifícios deverão ser do tipo *Nearly zero-energy buildings* (*NZEB*), edifícios com elevado desempenho energético, ou seja, com reduzidas necessidades de consumo energético. O objetivo desta diretiva é melhorar o desempenho energético dos edifícios com base nos requisitos climáticos interiores, na relação custo/eficiência e na sua influência nas alterações climáticas (DIRETIVA 2010/31/EU, 2010). Mais recentemente, a publicação da Diretiva 2018/844/EU pretende acelerar a renovação dos edifícios existentes da União Europeia para que, até 2050, se convertam em um parque imobiliário descarbonizado e com necessidades quase nulas de energia (DIRETIVA 2018/844/EU, 2018).

2.2 SÍNTESE DA ARQUITETURA PASSIVA NO MUNDO

Esse item tem por objetivo realizar uma breve síntese sobre o conteúdo abordado anteriormente relativo a contextualização histórica da arquitetura e a eficiência energética, mais especificamente a arquitetura passiva, no contexto mundial.

A contextualização histórica da arquitetura passiva no âmbito mundial demonstra o seu vínculo íntimo com a disponibilidade dos recursos naturais e energéticos. Na Grécia e Roma Antigas, buscava-se a superação dos problemas energéticos por meio da adoção de estratégias passivas nas edificações, aproveitando a radiação solar para aquecimento em períodos frios e prevendo elementos de sombreamento para os períodos quentes. Durante à Idade Média, as estratégias passivas deram lugar a edificações voltadas, predominantemente, para a necessidade de defesa, ao mesmo tempo em que o Teocentrismo inibia o desenvolvimento de novas tecnologias construtivas. Com o Renascimento, o Antropocentrismo é evidenciado e retoma-se o classicismo na arquitetura, há avanços significativos em todas as áreas e as estratégias passivas podem ser observadas em muitas edificações, como nas obras de arquitetos como Palladio.

Depois da Revolução Industrial, o uso de materiais como o ferro, o concreto armado e o vidro, redefinem a relação das edificações com o clima, permitindo fechamento mais leves, a entrada da luz natural e da radiação solar na totalidade da fachada. Há, também, uma verdadeira revolução na área energética, com a exploração do carvão, do petróleo e com a descoberta da energia elétrica. Entretanto, esse desenvolvimento é apoiado em bases energéticas insustentáveis e não renováveis.

No século XX, a arquitetura procura soluções passivas para solucionar os crescentes problemas energéticos e ambientais mundiais. Na primeira metade do século XX, são realizadas inúmeras

pesquisas nos Estados Unidos e na Europa quanto ao desenvolvimento de arquitetura solar passiva e ativa. Em períodos de eminente escassez energética, os estudos relacionados à arquitetura passiva eram intensificados, enquanto que, em períodos de abundância de energia, as estratégias passivas eram negligenciadas. Entretanto, o grande consumo energético provocado pelas edificações dependentes de meios artificiais, somada à crise de energia da década de 1970, faz com que alguns arquitetos conscientes da situação retomem as preocupações com a eficiência energética. Aumenta o interesse por estratégias que utilizam o superisolamento em edificações, que culmina, no final da década de 1980, com o desenvolvimento do conceito *Passive House* na Europa. Nas décadas seguintes, o conceito *Passive House* se consolida, internacionalmente, e é utilizado como norma por muitos países.

No século XXI, enquanto os tratados ambientais como Rio+10, Rio+20 e Acordo de Paris ganham força, muitos países adotam exigências cada vez mais rígidas quanto à redução dos gases do efeito estufa e o desempenho energético das edificações. Nesse sentido, cresce o estudo da aplicação das estratégias do conceito *Passive House* em climas de temperaturas mais elevadas que a Europa, inclusive na América Latina e no Brasil.

2.3 ARQUITETURA PASSIVA NO BRASIL

Este breve texto apresenta, de forma cronológica, um histórico da adaptação das edificações ao clima brasileiro através do uso de estratégias passivas de conforto ambiental. Para nortear essa parte da revisão da literatura, foi utilizado para cada período diferentes referenciais que auxiliaram na estruturação da pesquisa.

2.3.1 Pré-História Brasileira

- Primeiros registros da arquitetura passiva no Brasil

Até os dias atuais ainda há controvérsias sobre a época da chegada do homem ao continente Americano. Os mais conservadores admitem que tenha acontecido durante a última grande glaciação, ou seja, em torno de 19 mil anos a.C. No entanto, alguns estudos mais confiáveis chegaram a uma época provável de 44.500 anos a.C. (WEIMER, 2014a).

Um dos primeiros resquícios de moradia em solo brasileiro foi descoberto, segundo Weimer (2012), na Serra da Capivara, no alto sertão piauiense, onde foram encontrados imensos painéis de pinturas rupestres de um longo período que se estende desde o fim da última glaciação (19.000 a.C.) até mil anos antes da era cristã (Figuras 2-72 e 2-73).

Figura 2-72: Registros arqueológicos da Serra da Capivara, com pinturas rupestres (17000 a.C.).

Fonte: Robrahn-Gonzales e Zanettini (2017).

Figura 2-73: Toca habitada na Serra da Capivara, perto de São Raimundo Nonato, alto sertão do Piauí.

Fonte: Weimer (2012).

Na chegada dos portugueses ao Brasil, em 1500, a população indígena brasileira era estimada em 1,1 milhões (STEWARD, 1963), enquanto a população portuguesa em 1 milhão (RODRIGUES, 2010). Pelos poucos registros existentes, sabe-se que os indígenas brasileiros, pela quantidade populacional, diversidade cultural e pela disponibilidade de recursos naturais, apresentavam vastas estratégias construtivas para adaptação climática. Essa diversidade é proporcional à imensidão territorial brasileira e aos diferentes climas presentes. As nações indígenas brasileiras se adaptaram perfeitamente ao clima quente e frio utilizando os recursos disponíveis em cada local.

- Arquitetura indígena no clima quente e frio

Segundo Bittencourt (2004), os primeiros exemplos de arquitetura adequada ao clima no Brasil são provenientes dos indígenas. O autor explica que a maioria das aldeias indígenas brasileiras são circulares e, aparentemente, demonstram pouca preocupação com a orientação solar das unidades habitacionais. Isso pode ser explicado pelo fato dos índios passarem a maior parte do seu tempo ao ar livre ou a sombra de "puxadas" existentes nas casas de algumas aldeias. Portanto, as habitações são principalmente para o uso noturno.

Weimer (2012), comenta que uma das características das ocas[81] é a sua construção integral com materiais vegetais, que são fáceis de encontrar e garantiram conforto higrotérmico. A envoltória vegetal da oca atua como um filtro arquitetônico que bloqueia o ingresso do Sol direto e é permeável ao ar (TEIXEIRA FILHO, 1995). O isolamento térmico é garantido pela espessura da envoltória que, segundo Weimer (2012), pode variar de 10 a 20 cm de espessura, dependendo das necessidades climáticas.

Por sua vez, a abertura central da casa unitária dos Ianomâmis lembra, de certa forma, as clássicas casas de pátio central grega, porém sem priorização de uma orientação solar específica devido ao seu

[81] Oca é como é chamada a típica habitação indígena brasileira, são construídas com materiais vegetais e não possuem divisões internas.

formato circular. A abertura central serve para a saída da fumaça, ventilação natural por efeito chaminé, controle da entrada da radiação solar direta, como se fossem grandes varandas internas, além de servir para a entrada de luz solar (Figuras 2-74, 2-75, 2-76 e 2-77).

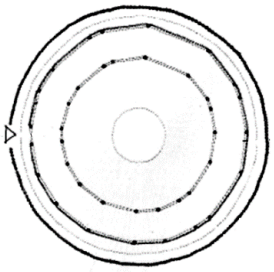
Figura 2-74: Casa unitária dos Ianomâmis, fronteira entre Brasil e Venezuela.

Fonte: Weimer (2012).

Figura 2-75: Interior casa do Ianomâmis.

Fonte: Weimer (2014).

Figura 2-76: Planta da casa do Ianomâmis.



Fonte: Weimer (2012).

Outra estratégia interessante utilizada para o resfriamento do corpo é o uso da rede[82]. Ao dormir, os índios utilizam a rede com trama aberta para aumentar a área de pele em contato com o ar, perdendo com mais facilidade o calor corporal (Figura 2-78).

Figura 2-77: Pátio central de habitação coletiva Ianomâmis, Amazonas.

Fonte: Povos Indígenas no Brasil (2017a). Foto: Carlo Zacquini, 1994.

Figura 2-78: Habitação coletiva Ianomâmis vista de seu interior.

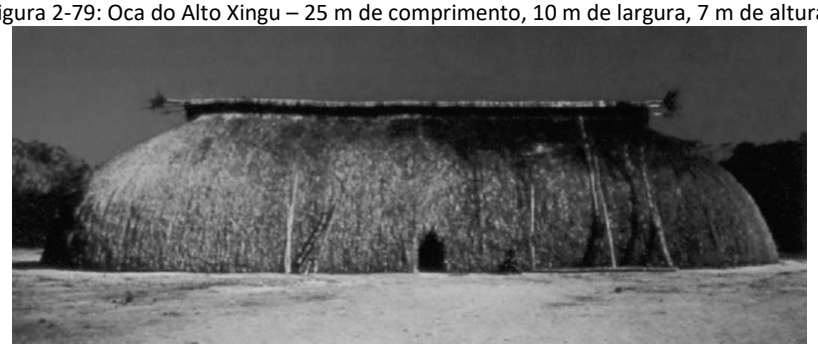
Fonte: Povos Indígenas no Brasil (2017b). Foto: René Fuerst, 1961.

Por outro lado, as ocas das aldeias do Alto Xingu, utilizavam uma abertura no topo de sua cobertura que funciona como fonte de luz, filtrando a radiação solar direta, ao mesmo tempo em que atua como

[82] Chamada de “rede de descanso”, “rede de dormir” ou maca, é um utensílio inventado pelos indígenas, originalmente feito com materiais disponíveis na natureza, como o cipó. Durante o Brasil Colônia, era utilizada para dormir, enterrar os mortos e como meio de transporte, onde os escravos carregavam os colonos em passeios pela cidade ou em viagens. Com a vinda dos portugueses, os colonos adaptaram a rede às suas varandas, passando a utilizar algodão, enfeitadas com franjas. O nome “rede” foi descrito pela primeira vez na carta escrita por Pero Vaz de Caminha, no dia 27 de abril de 1500: descreve como uma rede atada pelos cabos, alta, em que dormiam. Nomeou como rede pelas semelhanças das malhas com as redes de pescar (CASCUDO, 2015).

ventilação por efeito chaminé. Esse sistema com alta eficiência é muito semelhante aos *sheds* que são largamente utilizados atualmente, principalmente em edificações com grandes vãos como as indústrias. As aberturas de acesso das ocas são pequenas, com a porta menor do que a altura de um homem, promovendo o mascaramento solar no interior. Em períodos de temperaturas mais elevadas, a vegetação do fechamento é afastada do chão para aumentar a área de entrada direta de ar, maximizando o efeito chaminé (Figura 2-79).

Figura 2-79: Oca do Alto Xingu – 25 m de comprimento, 10 m de largura, 7 m de altura.



Fonte: Zanini (1983).

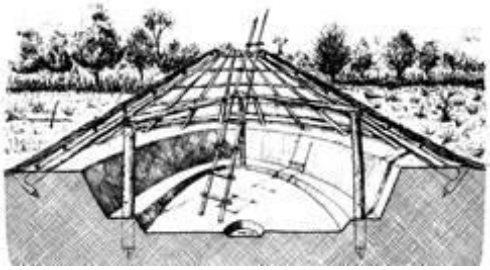
Na Região Sul do Brasil, a habitação subterrânea[83] foi uma adaptação indígena ao clima frio. No Rio Grande do Sul, as aldeias com casas subterrâneas encontram-se em terrenos altos e frios, em áreas onde as geadas intensas são comuns nas madrugadas de inverno e a neve também se faz presente. As construções eram feitas escavando um buraco circular dentro do chão sólido, ou na rocha em decomposição. O telhado era em geral feito com tronco, palha e terra (WEIMER, 2012). Além de proteger dos ventos, os buracos aproveitavam a massa térmica do solo, esquentando o ar nos períodos frios e resfriando nos períodos quentes (Figura 2-80).

Dentro das casas eram acesos fogos para cozimento de alimentos e calefação. Em casas mais fundas, onde o telhado era rente ao chão, com existência de respiros laterais, escavados na parede, que traziam para dentro da casa o ar puro e expulsavam o ar quente e a fumaça. Nas casas menos profundas, a renovação do ar era conseguida por aberturas na parede, entre o telhado e o chão. Habitações semissubterrâneas também eram comuns, com menor profundidade escavada (ROHDE, 1987).

As temperaturas muito variadas entre verão e o inverno levaram os indígenas pampeanos (guaicurus) do Rio Grande do Sul e Uruguai, por sua vez, a desenvolver uma técnica construtiva composta de painéis desmontáveis, chamada *toldos* (Figura 2-81). Inicialmente, esses toldos eram de material vegetal, posteriormente foi substituída por couro. Os painéis eram ajustados de acordo com as necessidades climáticas de cada época (WEIMER, 2012).

[83] Essas habitações eram chamadas de “buracos de bugre” e consistiam em construções semienterradas encontradas do Rio Grande do Sul ao sul de Minas Gerais, algumas com mais de 3.000 anos. Essas construções recebiam apenas cobertura vegetal.

Figura 2-80: Algumas soluções de utilização dos "buracos de bugre" apresentadas por arqueólogos.



Fonte: Weimer (2014a).

Figura 2-81: Três abrigos indígenas pampeanos[84].

Fonte: Weimer (2012).

2.3.2 Período pós chegada dos europeus ao Brasil (século XIV a XIX)

- Séculos XVI: Primeiras experiências portuguesas no Brasil

Portugal inicia, em 1500, a conquista da América e, em 1530, inicia a colonização do Brasil. O governo português deu início à ocupação da costa brasileira por intermédio da fundação de povoados, vilas e cidades e a colonização fez-se com o estabelecimento de uma economia monocultora, baseada no trabalho escravo, que procurou atender aos interesses do mercado europeu (SOUZA, 2012). Hoje em dia, restam poucos exemplares de edificações do século XVI no Brasil, uma vez que boa parte das edificações mais antigas foram destruídas ou muito alteradas.

Nos primeiros séculos da colonização, a arquitetura derivada da cultura branca limitou-se ao litoral (LEMOS, 1979). A arquitetura litorânea foi firmada, principalmente, com construções de pedra e de cal; contudo, no sertão, as edificações foram mais simples e até mesmo precárias, prevalecendo as construções rústicas marcadas pela presença e influência indígena.

No início da colonização, segundo Lemos (1993), os portugueses não tinham orientações sobre as condições ideais de construção, pois as exigências climáticas e naturais eram diferentes daquelas encontradas em Portugal; o território, nesse caso, era imenso e os recursos naturais não eram conhecidos. Os colonizadores produziam uma arquitetura com características cada vez mais original, embora sempre subordinada aos usos e costumes da metrópole Portugal. Apesar dessa dependência, a arquitetura civil foi a expressão mais livre e descompromissada, procurando antes atender as necessidades básicas mediante o improviso criativo e da influência de hábitos indígenas. A diversidade das manifestações arquitetônicas, no Brasil Colonial, pode ser explicada pelo fato de os portugueses virem de diferentes regiões de Portugal, distintas entre si também na arquitetura. Além disso, viagens anteriores ao trópico indiano e o contato com as suas arquiteturas podem explicar um pouco os tipos de construções adotadas. Pode-se afirmar que não ocorreu no Brasil Colonial a reprodução pura e simples de tipo arquitetônicos de Portugal, mesmo porque era outra estrutura social, outro clima e

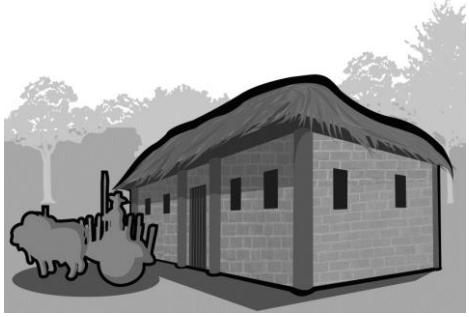
[84] A esquerda, um paravento de capim; ao centro um toldo de couro sendo montado em uma versão de inverno, e a direita, o mesmo toldo de couro em sua versão verão.

outros materiais de construção disponíveis (BICCA; BICCA, 2008). Marianno Filho (1943), comenta que, durante o século XVI, os colonizadores portugueses tiveram o bom-senso de apoiar-se na experiência indígena para a solução dos problemas arquitetônicos. Primeiramente, os colonizadores utilizaram a habitação chamada de "tejupaba"[85], modelo que dominou todo o século XVI e parte do século XVII nas zonas litorâneas. Outra solução vinculada às necessidades climáticas e à inspiração indígena, adotada pelos portugueses, principalmente durante os primeiros séculos da colonização, foi a utilização de redes.

O clima foi o fator físico o qual mais interferiu na arquitetura brasileira. Com temperaturas bastante elevadas, o primeiro problema era combater o calor e o excesso de luminosidade proveniente de uma insolação intensa (BRUAND, 2012). Da mesma forma, Goodwin (1943), afirma que o clima e as condições naturais foram uma das principais influências na vida e na arquitetura do período colonial. Desde o início da colonização portuguesa, foram priorizadas soluções arquitetônicas, popular ou erudita, de claro vínculo com o rigor climático, para efeitos de sombreamento da edificação. Segundo Rodrigues (1944), as primeiras casas eram simples, adquiriu logo suas características próprias, por muitas causas: o material, o clima, as raças e a condição política.

A princípio, as coberturas das casas eram feitas com materiais vegetais, como a palha, semelhante às moradias indígenas, o que ainda existe em algumas áreas rurais atuais. Havia pouco conhecimento de técnicas construtivas e dos materiais disponíveis em solo brasileiro, fazendo com que, inicialmente, houvesse uma simplicidade das técnicas utilizadas, indicando o primitivismo tecnológico da sociedade colonial. O sistema de cobertura mais comum era o telhado de duas águas, onde uma parte da água da chuva era lançada sobre a rua frontal e a outra sobre o quintal nos fundos (Figura 2-82) (MATOS; BARBOSA; CASTAÑON, 2014).

Figura 2-82: Exemplo de provável edificação residencial do século XVI.



Fonte: Martins (2019).

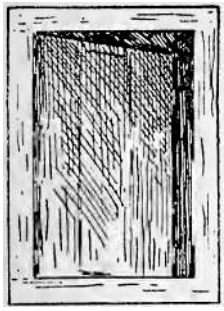
Em um primeiro momento, não havia a preocupação de estabelecimento e formação de povoados fixos. Os povoados existentes eram praticamente nômades e, muitas vezes, as edificações não

[85] Segundo Marianno Filho (1943) tejupaba tem origem de *Teii* – povo, gente e *upab* – lugar, sítio. Durante a longa existência a Tejupaba sofreu inúmeras transformações em virtude da influência da cultura branca e posteriormente da cultura negra.

possuíam fechamento externo, somente telhado, não sendo necessário o uso de esquadrias (MIOTTO, 2002). Posteriormente, os primeiros jesuítas chegam ao Brasil no ano de 1549, necessitando estabelecer povoamentos fixos para a catequização dos índios. Para isso, construíram moradias com sistema construtivo baseado na taipa que não permite o uso de grandes aberturas. Nesse momento, as janelas possuem somente uma folha de madeira que abre para o interior do ambiente, denominada "escuro" (Figura 2-83) (RABBAT, 1988).

A necessidade de adaptação ao clima brasileiro levou ao aumento na dimensão das aberturas, possibilitando maior ventilação e iluminação dos ambientes, apesar de manterem as mesmas características tipológicas. Então, surgem as janelas que aproveitam a estrutura das casas, sendo em alguns casos geminadas com outras janelas ou portas (Figura 2-84) (MIOTTO, 2002).

Figura 2-83: Janela com escuro.



Fonte: Rodrigues (1944).

Figura 2-84: Janelas geminadas.

Fonte: Rabbat (1988).

Outro exemplo de adaptação à realidade climática do primeiro século de colonização foi a casa-grande[86] e a senzala[87]. A casa-grande inicialmente era erguida visando à segurança e não à estética, assimilaram elementos típicos das habitações indígenas, como grandes espaços sem divisão, semelhante às ocas coletivas. Ao longo dos séculos XVII e XVIII, as preocupações dos senhores de engenhos com a segurança foram se dissipando (FREYRE, 2006).

> A casa-grande de engenho que o colonizador começou, ainda no século XVI, a levantar no Brasil - grossas paredes de taipa ou de pedra e cal, coberta de palha ou telha-vã, alpendre na frente e nos lados, telhados caídos em um máximo de proteção contra o Sol forte e as chuvas tropicais - não foi nenhuma reprodução das casas portuguesas, mas expressão nova, correspondendo ao nosso ambiente físico […]. (FREYRE, 2006, p. 35).

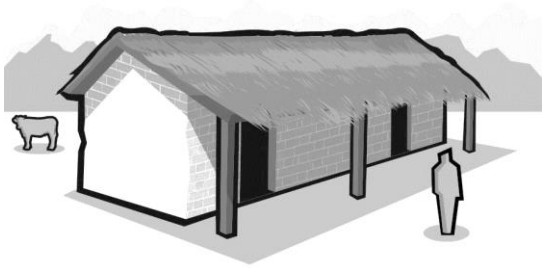
Embora não haja remanescentes de senzalas nos séculos XVI, XVII e XVIII, é possível que os exemplares existentes possuam características semelhantes aos que o precederam (WEIMER, 2014b). Desse modo,

[86] Casa-grande era a casa da família do proprietário das grandes propriedades rurais do Brasil Colonial.

[87] Eram grandes alojamentos destinados à moradia dos escravos nos engenhos e fazendas do Brasil Colonial e imperial dos séculos XVI a XIX. Segundo Günter Weimer, as senzalas brasileiras tiveram origem nas sanzalas africanas (escrito com a letra a) (WEIMER, 2014b).

é possível supor que muitas das senzalas do século XVI utilizavam varandas em pelo menos uma de suas faces para proteger da radiação solar intensa (Figura 2-85).

Figura 2-85: Provável configuração da senzala no século XVI.



Fonte: Martins (2019).

Quanto ao uso de energia no início da colonização, as principais fontes de energia no Brasil Colonial dos três primeiros séculos, utilizadas principalmente nos engenhos de açúcar do nordeste brasileiro, foram a energia hidráulica, por meio da roda d'água, a energia eólica, a tração animal, principalmente de bois, a mão de obra escrava e também eram utilizados lenha para alimentar as fornalhas para cozimento do caldo da cana (BICCA; BICCA, 2008). Os primeiros escravos africanos chegaram ao Brasil em 1538, e sua mão de obra foi abundantemente explorada em diversas atividades. Por muito tempo, as principais fontes de energia para iluminar foram velas de cera, candeeiros e lamparinas que queimavam diferentes tipos de óleo animal (peixe, baleia e lobo marinho) e vegetal (mamona e coco). As velas de cera eram utilizadas para a iluminação de edificações residências, comerciais e religiosas. O óleo de baleia era o combustível mais utilizado para iluminar as ruas das cidades, sendo, depois da lenha, da água, da tração animal e da mão de obra escrava, a fonte de energia mais importante do período colonial (MEMÓRIA DA ELETRICIDADE, 2017).

- *Século XVII e XVIII: Arquitetura portuguesa e a influência árabe*

O século XVII caracteriza-se pelo ciclo açucareiro e pelos grandes latifúndios de cana-de-açúcar, principalmente no nordeste do país. A arquitetura correspondente é a colonial (MIOTTO, 2002). Com o estabelecimento de vilas e cidades, os colonos passaram a edificar casas, igrejas e edifícios públicos seguindo os modelos construtivos portugueses. Os edifícios importantes para a sociedade colonial foram projetados pela tradição erudita, enquanto as moradias e edifícios mais simples seguiam a tradição popular, constituída por elementos com influências oriundas dos romanos, muçulmanos, dentre outros (SOUZA, 2012).

Marianno Filho (1943) comenta que, durante os séculos XVII e XVIII, há uma impregnação do caráter oriental (muçulmano) na "arquitetura brasileira". Segundo Marianno Filho (1943), os elementos de

caracterização muçulmana, geralmente, eram temas de composição popular, fora da influência do governo português. A arquitetura popular era mais numerosa que a erudita. Entre a influência muçulmana, pode-se destacar os elementos que auxiliaram na adaptação climática das edificações como os muxarabis, gelosias, rótulas, pátio interno e a telha colonial[88].

Segundo Marianno Filho (1943), enquanto em Portugal e na Espanha os atributos externos da arquitetura popular eram, em grande parte por motivos decorativos, no Brasil, esses elementos justificavam-se plenamente em virtude da violenta ação dos raios solares, resultando em uma variedade infinita de soluções.

O clima quente dos trópicos, a matéria-prima abundante e os conhecimentos prévios, tornaram a taipa e o adobe as técnicas construtivas mais utilizadas durante todo o período colonial (MARIANNO FILHO, 1943; MELLO, 1973). As paredes geralmente eram construídas em taipa de pilão[89] ou adobe. As paredes internas variavam entre 12 e 22 centímetros de espessura e as externas variavam de 30 a 120 centímetros (MATOS; BARBOSA; CASTAÑON, 2014).

A arquitetura em terra auxiliou os colonos na obtenção do conforto ambiental. O barro cru possui a capacidade de absorver e perder a umidade de maneira mais rápida que a maioria dos materiais de construção. Além da umidade, o barro armazena calor durante a exposição aos raios solares e perde calor, lentamente, quando a temperatura externa diminuía. Portanto, as edificações construídas com barro possuíam um microclima agradável a maior parte do tempo e eliminavam o calor armazenado ao longo do dia durante à noite (PISANI, 2007).

Entretanto, em regiões onde a chuva era intensa, os colonos utilizaram o fogão à lenha instalado nas cozinhas do interior das moradias, permitindo que os pisos de terra batida permanecessem secos e fazendo com que a umidade do solo não atingisse as paredes. Nas moradias mais abastadas, eram construídos assoalhos de madeira assentados em falsos porões que separavam as casas do solo. Para a proteção das paredes externas das chuvas, geralmente, as casas eram construídas sobre patamares de pedra (PISANI, 2007).

Diante das chuvas intensas, eram utilizados grandes beirais nos telhados, para proteção das paredes. Nesse sentido, um elemento interessante que contribuiu para proteção da chuva e também para proteção solar, o beiral em cachorrada[90] (MENDES; VERÍSSIMO; BITTAR, 2011a).

[88] Segundo Marianno Filho (1943) as telhas conhecidas por romanas, de calha ou coloniais tem origem árabe.

[89] A taipa de pilão recebe esse nome porque a matéria-prima é inserida em uma estrutura de madeira, o taipal e socada com um grande pilão até ficar totalmente comprimida (MATOS; BARBOSA; CASTAÑON, 2014).

[90] É chamado de cachorro os elementos que são a extensão dos caibros e que suportam o beiral. O conjunto desses elementos é chamado de cachorrada. Esse nome se dá pela tradição de esculpir cabeças de cachorro com função simbólica de proteção da casa.

A telha de barro era feita, a princípio, pela mão de obra escrava e foi utilizada nos edifícios mais abastados. A telha colonial, ou capa canal, também tem características térmicas importantes, pois facilita a saída de ar quente por convecção, renovando o ar e melhorando o conforto e bem-estar. Nesse sentido, segundo Montenegro (1984), a fabricação manual produzia pequenas falhas e irregularidades que possibilitava maior saída de ar quente do que a telha industrializada atual.

As janelas desse período apresentavam uma grande variedade de soluções para adaptação ao clima quente e também para manutenção da privacidade. Inicialmente, as janelas possuíam uma ou duas folhas de abrir, não possuindo sistema de controle da ventilação. Dificilmente era utilizado vidro nesse período. Em substituição ao vidro, algumas vezes se encontrava a mica ou malacacheta, um sílico-aluminata de potassa, ferro ou magnésio, no formato de lâminas delgadas e translúcidas ou transparentes, provenientes da região de Goiás (MIOTTO, 2002). Em geral, os "escuros" abriam para o interior e, muitas vezes, não possuíam sistemas que garantiam a privacidade interna (Figura 2-88).

Uma das versões de janelas utilizadas pelos bandeirantes, em São Paulo, tem seu fechamento composto de balaústres[91] de seção quadrada, posicionados em diagonal, possibilitando ventilação permanente com o resguardo do ambiente em relação à luz do Sol e possuindo o "escuro" para vedar a claridade, quando necessário (MIOTTO, 2002). O balaústre[92] também conferia maior segurança às aberturas, prevenindo de invasores externos mesmo quando as janelas estavam abertas (Figura 2-89).

Outros elementos muito utilizados nas aberturas nesse período são as rótulas, gelosias e muxarabis, todos eles de forte influência muçulmana e que continham treliças de madeira que filtravam a ventilação, a luz solar, e garantiam a privacidade interior além de proteger da chuva.

O termo "rótula"[93] possui diferentes designações, porém, em todas elas, é formada por uma treliçado de madeira e caracterizavam-se por duas folhas de abrir, situadas externamente ao vão, com dobradiças fixadas pelo lado externo (Figura 2-90). Esse sistema de vedação, colocado sobre as janelas existentes, tinha a função de uma persiana, na medida em que possibilitava a ventilação permanente do ambiente; quando fechadas, controlando a luminosidade do local. As janelas mantinham internamente sua forma original (RABBAT, 1988).

Enquanto as gelosias[94], segundo Miotto (2002), são como uma espécie de "caixote", sobreposto às janelas, acima do pavimento térreo, formando estruturas que aproveitam os balcões das janelas para sustentação (Figura 2-91). É constituída por treliçado de madeira, semelhante às rótulas. A metade

[91] Pequena coluna ou pilar que forma junto com outros elementos iguais, dispostos em intervalos regulares, uma balaustrada (LIMA e ALBERNAZ, 1998).

[92] Algumas janelas com balaústres, apresentam muita semelhança com os brises utilizados a partir do século XX.

[93] Rótula é o nome popular dado as "adufas árabes" (MARIANNO FILHO, 1943). Segundo o autor, o nome "rótula" deve ter surgido pela articulação presente no elemento em referência a articulação tíbio femoral do esqueleto humano (MARIANNO FILHO, 1943).

[94] A origem da palavra "gelosia" vem do francês *jalousies* ou do inglês *jealous*, significando "ciúmes", uma vez que evita que quem está atrás da janela seja visto por quem está fora, era usado nos quartos das esposas para que não tivessem contato visual direto com outros homens.

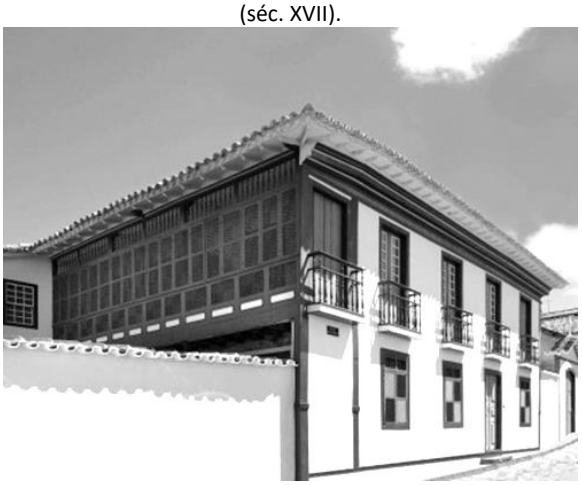
superior do caixote é composta por folhas de abrir, fixadas em sua parte superior. Possibilita a ventilação constante dos ambientes, com pouca entrada de luz, e protege o ambiente interior da visualização externa.

O muxarabi[95] é um balcão bem saliente apoiado, quase sempre, em cachorros de pedra, abrangendo dois ou três lanços contínuos de janelas (Figuras 2-86 e 2-87). Em alguns casos, ocupava quase a fachada inteira da edificação, em cuja parte superior o telhado era apoiado. A função do muxarabi é controlar a passagem de luz excessiva, o fluxo de ar, reduzir a temperatura no interior do compartimento, e assegurar a privacidade, uma vez que, por meio dele, é possível ver o exterior, mas pouco do interior.

Figura 2-86: Muxabis de uma rua central do Rio de Janeiro (final do séc. XVIII).

Fonte: Marianno Filho (1943). Aquarela de J. Wasth Rodrigues.

Figura 2-87: Muxarabi corrido da Casa Chica da Silva, Diamantina MG (séc. XVII).



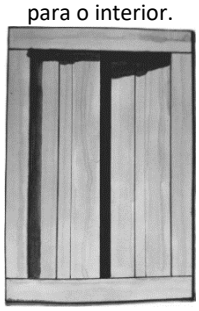
Fonte: Lemos (2012). Foto de Victor Hugo Mori.

Marianno Filho (1943) destacou que nas casas mais pobres os proprietários não tinham condições de construir adufas com sarrafos de madeira, portanto, utilizaram a tecnologia indígena, revestiam-nas de “taquara” ou “uru”. Esse tipo de esquadria ficou conhecido popularmente em todo o território nacional como “urupemas”[96] e, segundo Freyre (2004), ainda era muito utilizado no início do século XX nas casas rurais nordestinas, conhecidas por “mocambos” (Figura 2-92).

[95] Segundo El-Shorbargy (2010) e Ficarelli (2009) palavra muxarabi tem seu nome derivado originalmente da palavra árabe "bebida" (em árabe sharab) e referido "a um lugar para beber" ou “um lugar para armazenar bebidas”. Já Lemos (2012) comenta que significa exatamente “local onde é refrescado o pote de água”. Pinto (1958) comenta que a palavra muxarabi significa o sítio das bebidas, o local onde se punham as bilhas a fim de refrescar a água. Maxrab quer dizer, em árabe, "chafariz" e maxrabia significa "moringa" ou "quartinha". A origem comum é o verbo xariba, "beber". Em português, aparecem as variações muxarabi, mucharabi, muxarabiê, etc. Fletcher (1945) informa que a origem dessa palavra é “sharâb = a draught”, ou seja, um enxadrezado.

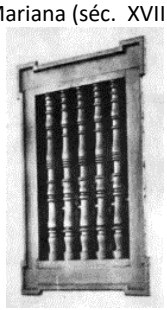
[96] As urupemas, de significado proveniente do termo indígena uru – treliçado de palha. Segundo Marianno Filho (1943) as urupemas também eram chamadas de “peneiras” pelo povo.

Figura 2-88: Janela colonial com dois escuros com abertura para o interior.



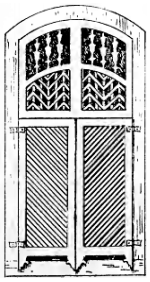
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Figura 2-89: Janela com balaústre na Igreja da Sé de Mariana (séc. XVIII).



Fonte: Marianno Filho (1943).

Figura 2-90: Rótula em São Paulo, Parnaíba.

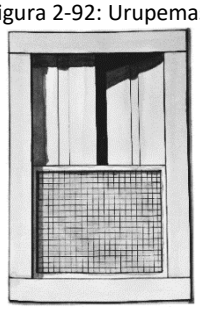


Fonte: Rodrigues (1944).

Figura 2-91: Gelosia, São Paulo, (séc. XVIII).

Fonte: Marianno Filho (1943). Desenho de A. Pacheco.

Figura 2-92: Urupemas.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Durante os séculos XVII e XVIII, também era muito difundido o uso de varandas e alpendres. Lemos (2012), afirma que o alpendre sombreador das paredes da moradia brasileira veio da Índia, precisamente do bangalô, a construção rural com a totalidade do telhado prolongado para fora da edificação, destinado a fazer sombra para proteger do Sol e aproveitar a brisa.

A varanda surge, no Brasil, como principal elemento filtrante do exterior, selecionando apenas o que interessa à intimidade da família patriarcal, além de ser um elemento de proteção contra o sol, contra a chuva, posto de vigilância, descanso ou contato com o Sol, intrinsecamente associado às tradições (KOWALTOWSKI; SKUBS; WATRIN, 2003).

Debret (1940), comenta que é muito natural que, com uma temperatura alta e sob um Sol forte, o brasileiro tenha adotado a varanda nas suas construções. Por isso, encontra-se até nas habitações mais pobres. Um exemplo ainda existente é a pequena Igreja de São Miguel, em São Paulo de 1622, outro é a Casa do bandeirista Padre Inácio, São Paulo, século XII; e a fazenda de Ilhabela, São Paulo século XVIII (Figura 2-93, 2-94 e 2-95). Nos núcleos bandeirantes, todas as igrejas urbanas eram alpendradas (LEMOS, 2004).

Figura 2-93: Igreja de São Miguel, São Paulo (1622).

Fonte: Lemos (2012). Foto: Victor Hugo Mori.

Figura 2-94: Casa do Padre Inácio, São Paulo: varanda da fachada principal (séc. XVII).

Fonte: Lemos (2012). Foto: Victor Hugo Mori.

Figura 2-95: Varanda da fazenda de Ilhabela, São Paulo (séc. XVIII).

Fonte: Bicca e Bicca (2008).

Assim como no século XVI, nos séculos XVII a XIX, as varandas eram muito presentes também nas casas-grandes e senzalas. Enquanto que, na casa-grande, a varanda desempenhava um papel de amenizador climático, vigia e filtro social, na senzala tinha como principal função proteger a edificação do rigor da radiação solar direta (Figura 2-96).

Figura 2-96: Varanda da Senzala do Engenho Matas, Cabo Santo Agostinho, Pernambuco (séc. XIII).

Fonte: Weimer (2014b).

Nesse período, as varandas também eram encontradas no sul do Brasil, como nas Missões Jesuíticas de São Miguel, no Rio Grande do Sul, onde todas as edificações do conjunto eram avarandadas (hospital, cabildo (prefeitura), colégio, casa missioneira e laterais da igreja) e na Fazenda Capão Alto, no Paraná (Figuras 2-97 e 2-98).

Figura 2-97: Varanda nas Missões Jesuíticas de São Miguel (séc. XVII).

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Figura 2-98: Fazenda Capão Alto, Capão Alto – PR (séc. XVIII).

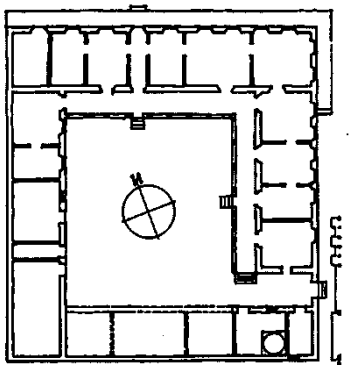
Fonte: Bicca e Bicca (2008).

Maragno (2010) comenta que no final do período colonial, o espaço das varandas inicialmente existente nas casas rurais permaneceu nas construções suburbanas e trocou sua morfologia nas urbanas, principalmente enquanto seu tamanho relativo, o que, de alguma maneira, afetou seu uso e seu desempenho ambiental.

O pátio interno também foi utilizado nas edificações brasileiras desse período, embora com menor intensidade que no restante da América Latina. O uso do pátio interno foi uma herança muçulmana[97] utilizada pela colônia brasileira para obtenção de conforto no interior. Era um espaço conveniente às necessidades religiosas e culturais, a qual apresenta soluções para os problemas relativos ao clima; por ser um elemento eficaz na circulação do ar por convecção, além de local adequado ao cultivo de plantas e árvores frutíferas que, associadas a fontes de água, criavam um microclima agradável para adaptação climática e conforto ambiental (MATOS; BARBOSA; CASTAÑON, 2014). Souza (2012) comenta que o pátio interno era encontrado em edifícios públicos, religiosos e particulares. Exemplos do pátio interno podem ser encontrados em diferentes climas brasileiros, como nas Fazendas Colubandê e Capão do Bispo no Rio de Janeiro (séc. XVIII), nas Missões Jesuíticas de São Miguel no Rio Grande do Sul (séc. XVII) e na Estância Arvorezinha, Piratini-RS (séc. XVIII) (Figura 2-99).

Figura 2-99: Pátio interno da Estância Arvorezinha, Piratini (séc. XVIII).

Fonte: Bicca e Bicca (2008).



Fonte: Luccas (2006).

No que se refere ao uso de energia, a partir do século XVIII, a energia humana, tração animal, energia hidráulica e da lenha até então utilizada, principalmente, nas atividades dos engenhos, também foram fundamentais para o desenvolvimento da atividade mineradora no interior do país.

- Século XIX: Tecnologias construtivas industrializadas influenciam a arquitetura

A vinda da Corte Portuguesa para o Rio de Janeiro, em 1808, foi um marco decisivo para a arquitetura brasileira, pois resultou em uma série de providências, dentre elas, a chegada de profissionais qualificados e, principalmente, novos materiais e produtos industrializados (LEMOS, 1979).

A substituição do trabalho escravo pelo trabalho remunerado, e o início da imigração europeia, favoreceram o aperfeiçoamento das técnicas construtivas (REIS FILHO, 2006). A arquitetura da segunda metade do século é caracterizada pelo aprimoramento dos recursos técnicos relacionados

[97] Embora os portugueses utilizaram os pátios internos devido a influência muçulmana, é importante lembrar que o pátio interno era utilizado em solo brasileiro pelos índios anteriormente a vinda dos colonizadores portugueses, como exemplo a casa dos Ianomâmis.

aos componentes da edificação e a incorporação dos benefícios recentes da sociedade industrial (MIOTTO, 2002).

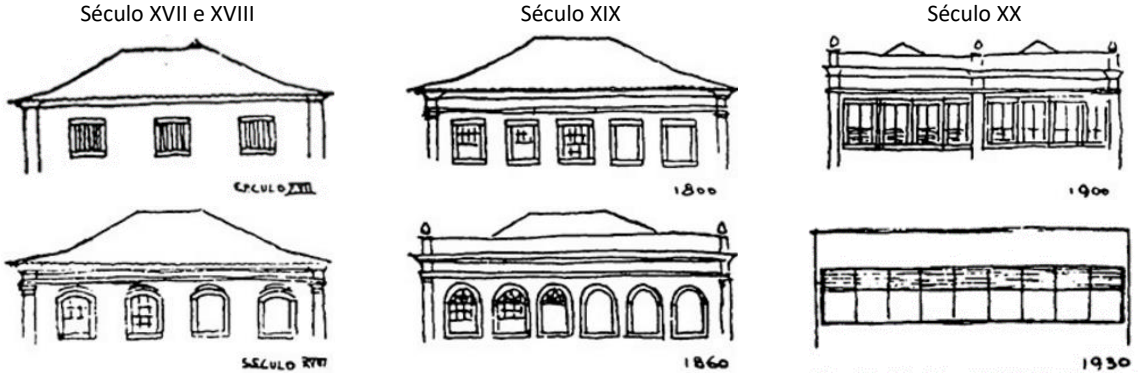
Holanda (1976) comenta que a ruptura da tradição construtiva ocorrida no século XIX trouxe prejuízos ao edifício quanto à amenização dos extremos climáticos. Segundo o autor, ainda na década de 1970, não havia sido desenvolvido um conjunto de técnicas as quais permitissem construir tendo em vista o desempenho da edificação e, a regra era a adoção de materiais e técnicas construtivas estrangeiras, sem a indispensável filtragem necessária para o clima brasileiro.

No começo do século XIX, a arquitetura tradicional brasileira entrou em uma fase de declínio que culminou na vinda da Missão Artística Francesa e na fundação da Academia de Belas Artes no Rio de Janeiro, em 1816. A partir de então, apropriações ecléticas de variados tipos passam a predominar, impedindo a evolução da arquitetura genuína. A arquitetura, caldeada durante os três primeiros séculos da colônia, estaria, portanto, imersa no esquecimento.

> [...] a partir do meado do século XIX, a arquitetura aqui perdeu por completo o seu caráter tradicional, a sua razão de ser dentro do quadro nacional, sem um estilo definido, sem uma lógica, sem um destino; entre as vilazinhas do arrabalde, as grandes casas urbanas, as igrejas ou os edifícios monumentais, não se descortina mais uma forma, um tipo característico, que exprima uma feição do caráter nacional, da resplandecente natureza do país, da sua tradição étnica ou histórica (SEVERO, 1916, p. 52).

Paralelamente às novas técnicas construtivas baseadas no uso racional da alvenaria, possibilitaram vãos maiores, os vazios passaram a se igualar aos cheios (RABBAT, 1988), e as paredes começaram a ficar mais esbeltas. O uso racional da alvenaria, aliado ao avanço da produção de componentes como esquadrias, propiciou casas com vãos mais próximos e cada vez maiores, como demonstra as fachadas da arquitetura brasileira desenhadas por Lúcio Costa, do século XVII ao XX (Figura 2-100) (COSTA, 1995).

Figura 2-100: Evolução dos fechamentos: A trajetória da casa brasileira segundo Lucio Costa.



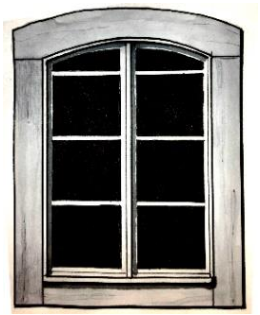
Fonte: adaptado de Costa (1995).

A importação de materiais industrializados possibilitou, segundo Reis Filho (2006), a utilização de vidros simples e coloridos em substituição das velhas urupemas e gelosias. Os vidros coloridos conferiam ao espaço interior um encanto especial, assegurando, ao mesmo tempo, grande luminosidade (REIS FILHO, 2006).

Por meio da importação, grande parte das janelas existentes são reformadas e adaptadas à novidade, possuindo, além dos escuros ou rótulas, folhas de vidro de abrir ou guilhotina (Figuras 2-101 e 2-102) (MIOTTO, 2002). Segundo Marianno Filho (1943), a adoção das janelas guilhotina marca, historicamente, o definitivo declínio da influência muçulmana, nas primeiras décadas do século XIX. As tradicionais treliças de madeiras[98], protetora dos interiores, foram substituídas, por ordem real, por caixilharias de vidro miúdo, devassando a intimidade dos lares, prejudicando a ventilação cruzada e inundando de luz, nem sempre desejável (MENDES; VERÍSSIMO; BITTAR, 2011b).

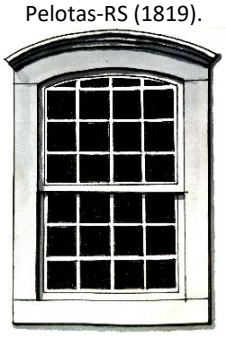
Neste contexto, surgem as janelas com venezianas, utilizadas para a iluminação e ventilação dos ambientes, possuindo em sua parte interna folhas de vidro tipo guilhotina e, externamente, duas folhas de veneziana de abrir, tipologia utilizada até os dias atuais (Figura 2-103) (MIOTTO, 2002). Permitem privacidade, com interiores agradáveis, com sombra e ventilação permanente (CORONA; LEMOS, 1998; BITTENCOURT; CÂNDIDO, 2008). O principal inconveniente é a obstrução da visibilidade para o exterior. Segundo Reis Filho (2006), o aparecimento das venezianas na segunda metade do século XIX coincide com o aperfeiçoamento dos hábitos higiênicos. O uso de vidro em janelas com escuros ou rótulas, folhas de vidro de abrir, guilhotina e veneziana são adotadas nas edificações residenciais, comerciais e institucionais em todo território brasileiro.

Figura 2-101: Janelas com folhas de vidro, Porto Alegre-RS (séc. XIX)[99].



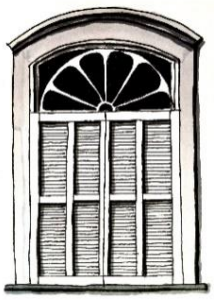
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Figura 2-102: Janela em guilhotina com vidros, Fazenda da Palma, Pelotas-RS (1819).



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Figura 2-103: Janela com vidro e veneziana, Casarão Mendonça, Pelotas-RS (séc. XIX)[100].



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

[98] Em 1809, um ano após a Família Real aportar no Brasil, D. João VI determina a retirada dos muxarabis e adornos que compunham as fachadas das casas e sobrados coloniais, por achar uma afronta ao reino de português (MATOS; BARBOSA; CASTAÑON, 2014). O tempo definido para retirada dos muxarabis era de 8 dias e quem era contra a retirada era taxado como retrógrados, anti-progressista e não civilizado (MARIANNO FILHO, 1943). Havia também o medo que nos pequenos vãos das treliças de madeira se pudesse fazer uso de arma de fogo (PINTO, 1958). A Inglaterra tinha um interesse especial nesse procedimento, visto que era o país apto a fornecer, com exclusividade, os vidros planos para as janelas (MIOTTO, 2002). Freyre (1948) comenta que o comércio de vidro com os ingleses teria justificado a extinção dos enxadrezados das janelas. O Brasil tinha um vasto mercado que justificava a perseguição estético-policial-higiênica para substituir o xadrez de madeira pelo vidro de janelas "modernas" industrializadas pelos ingleses (PINTO, 1958).

[99] Rua Riachuelo, 643. Centro Histórico de Porto Alegre-RS.

[100] Esquina da Rua 7 de Setembro com Rua Gonçalves Chaves, Pelotas-RS.

Na virada do século XIX, a fusão do ecletismo e do *art-nouveau* transforma o alpendre ou corredor alpendrado em varanda de gosto historicista (Figura 2-104). Os ornamentos de referências históricas criam efeitos estéticos nem sempre adequados ao clima. Nesse período, a varanda está presente tanto nas grandes mansões, como nas casas de subúrbios (KOWALTOWSKI; SKUBS; WATRIN, 2003). Segundo Reis Filho (2006), nos alpendres eram desenvolvidos boa parte da vida das residências no Brasil e, nos locais de clima quente, eram os locais mais ventilados, de temperatura mais amena.

Na Região Sul do país, de clima subtropical, as varandas e os pátios internos foram muitos empregados, especialmente, em áreas rurais. Exemplos podem ser encontrados na Residência-Sede da Charqueada São João (1810), localizadas em Pelotas-RS e Fazenda das Almas (séc. XIX), em Piratini-RS (Figuras 2-105 e 2-106).

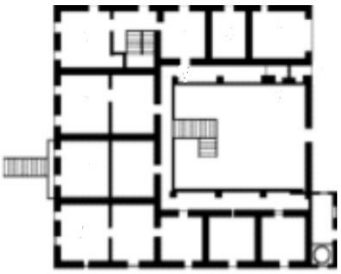
Figura 2-104: Residência do final com corredor lateral alpendrado (séc. XIX).

Fonte: Veríssimo e Bittar (1999).

Figura 2-105: Residência-Sede da Charqueada São João, Pelotas-RS (1810).

Fonte: Bicca e Bicca (2008).

Figura 2-106: Planta baixa da Fazenda das Almas, Piratini-RS (séc. XIX).



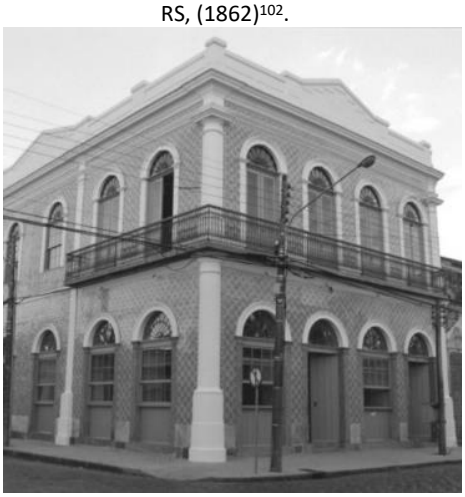
Fonte: adaptado de Bicca e Bicca (2008).

Para o revestimento externo, os colonos portugueses usavam a caiação para pintar as paredes de taipa e adobe, assim como em Portugal, era preferido por causa da cor branca, refletora dos raios solares, o que proporciona maior conforto térmico no interior da moradia (SOUZA, 2012). Segundo Matos, Barbosa e Castañon (2014), a cal de Portugal tinha um valor muito elevado e, praticamente, só no século XIX, passou a ser exploradas como material de construção.

Outro revestimento muito empregado foi o azulejo. O azulejo[101] foi utilizado por diferentes motivos no Brasil, sendo a proteção contra umidade, a reflexão dos raios solares, o impedimento de corrosão, fácil manutenção e durabilidade compensavam seu custo elevado (WANDERLEY, 2006). No século XIX, tornou-se moda usar azulejos na fachada de prédios (RODRIGUES, 1944) de norte a sul do país (Figuras 2-107, 2-108 e 2-109).

[101] Segundo Wanderley (2006, p. 11), o termo azulejo tem vários significados e muitas vezes confusos. Segundo a autora, a maioria das definições da palavra admitem a origem árabe, e significa uma placa pintada e vidrada em uma das faces possuindo na outra, fendas ou um tipo de relevo para facilitar o assentamento. A autora comenta que o termo contém a ideia de "pedra lisa e escorregadia" e também a ideia de coloração azul que lhe dá qualidade decorativa.

Figura 2-107: Casa de Azulejos, Rio Grande-RS, (1862)[102].



Fonte: IPHAE-RS (2018).

Figura 2-108: Fachada de azulejos portugueses, Recife -PE (séc. XIX).

Fonte: Cavalcanti (2002).

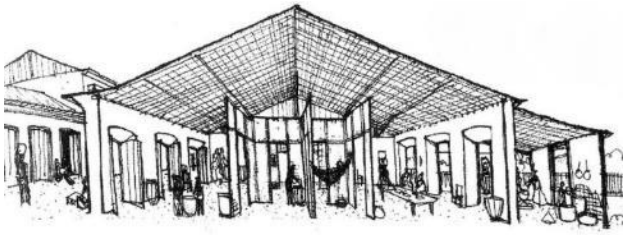
Figura 2-109: Sobrado Português, Porto Alegre-RS (1866)[103].

Fonte: Vettorazzi (2018).

Nesse mesmo século, os antigos beirais coloniais foram substituídos, gradativamente, por cornijas sob as platibandas almofadadas ou balaustradas, dispostas como coroamento das fachadas (Figuras 2-110 e 2-111). Com a melhoria da mão de obra, diminuíam a altura das cumeeiras, deixando as coberturas ocultas atrás das platibandas. A partir da década de 1880, as leis municipais não permitiam o escoamento das águas dos telhados diretamente sobre o passeio, decretando assim o fim das casas com beirais (MENDES; VERÍSSIMO; BITTAR, 2011b).

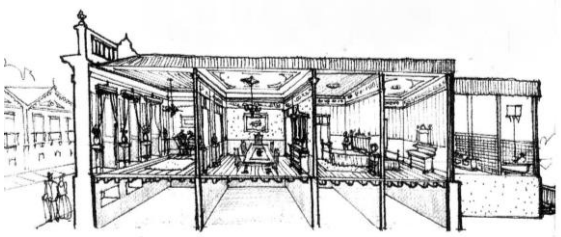
Dessa forma, a substituição dos amplos beirais pelas platibandas no século XIX, eliminou o problema do escoamento das águas sobre os passeios públicos; contudo, ao mesmo tempo, se perdeu um importante elemento arquitetônico de proteção solar das edificações.

Figura 2-110: Residência urbana colonial sem platibanda (séc. XVII, XVIII).



Fonte: Mendes, Veríssimo e Bittar (2011b).

Figura 2-111: Residência urbana no segundo reinado com platibanda (1840/1889).



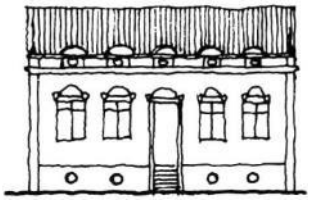
Fonte: Mendes, Veríssimo e Bittar (2011b).

Também, no século XIX, a diminuição dos lotes com as especulações imobiliárias obrigou os proprietários das residências urbanas a utilizarem o pé-direito do porão para abrigo dos escravos e serviçais, aumentando assim seu pé-direito (Figuras 2-112, 2-113 e 2-114). Como a legislação municipal

[102] Rua Marechal Floriano, 103, Rio Grande-RS.
[103] Rua Sete de Setembro, 708, Porto Alegre-RS.

era exigente quanto às proporções das fachadas, o aumento do pé-direito do porão resultou no aumento do pé-direito no andar nobre. Essas modificações contribuíram para o conforto térmico, mesmo que não fosse essa a intenção principal. Com a abolição da escravatura, os antigos porões foram, muitas vezes, alugados para aumentar a renda familiar (MENDES; VERÍSSIMO; BITTAR, 2011b). O porão era ventilado, auxiliando no conforto térmico do primeiro pavimento e, o pé-direito elevado, mantinha o ar quente longe do nível dos ocupantes.

Figura 2-112: Térreo com porão alto.

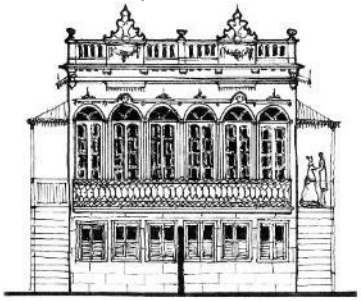


Fonte: adaptado de Reis Filho (2006).

Figura 2-113: Sobrado com porão alto.

Fonte: adaptado de Reis Filho (2006).

Figura 2-114: Residência geminada eclética com porão alto habitável.



Fonte: Mendes, Veríssimo e Bittar (2011b).

Durante o século XIX, três elementos arquitetônicos tiveram grande contribuição no auxílio para melhorar a ventilação das edificações brasileiras: o forro ventilado[104], as bandeiras[105] presentes em portas e janelas externas e internas e o óculo[106] presente nos áticos (Figuras 2-115, 2-116 e 2-217).

Figura 2-115: Forro ventilado: gamela. São Luís, MA (séc. XIX).

Fonte: Figueiredo e Varum Costa (2011).

Figura 2-116: Bandeira fixa vazada em gradil de ferro, São Luís, MA (1835).

Fonte: Figueiredo e Varum Costa (2011).

Figura 2-117: Óculo para ventilação no Chalé em Nova Friburgo – RJ (pós 1870).

Fonte: Mendes, Veríssimo e Bittar (2011b).

[104]O forro ventilado auxiliava na retirada do ar quente interno e na promoção da entrada do ar refrigerado. A circulação do ar proporcionada pelo forro ventilado também auxilia na renovação do ar, eliminando as impurezas e micro-organismo do ambiente interno. Esteve presente nas edificações do século XIX, contribuindo diretamente com o conforto térmico interno.

[105]Elemento que contribui para a ventilação interna e muito presente na arquitetura do século XIX. As bandeiras são elementos arquitetônicos que ficam acima da janela ou das portas externas e internas, podendo ser fixas ou móveis, vazadas ou não. Nas portas internas, quando vazadas, as bandeiras possibilitam a circulação do ar entre os ambientes sem comprometer a privacidade visual. Quando dispostas nas janelas e portas externas, contribuíam com a iluminação natural, ventilação sem comprometer a privacidade interna.

[106]Nas últimas décadas do século XIX o gosto pelo chalé, cujos primeiros exemplares datam a década de 1870, expandiu-se atingindo diversos seguimentos sociais (MENDES; VERÍSSIMO; BITTAR, 2011b). Uma característica interessante quanto ao conforto ambiental é a presença de óculo ou pequenas janelas nos frontões triangulares, que permitiam a ventilação do forro e a retirada do ar quente do ático.

Assim como na arquitetura, o século XIX apresentou avanços significativos em relação à utilização e à produção de energia. Nos engenhos, a utilização de lenha para alimentar fornalhas provocava grande desmatamento, sendo substituída pelo bagaço de cana e, posteriormente, pelo uso da máquina a vapor (BICCA; BICCA, 2008) que promoveu o aumento da produção. A eletricidade surgiu no Brasil, no Rio de Janeiro, em 1879, com o início da iluminação interna da Estação Central da Ferrovia D. Pedro II, atual Central do Brasil. A primeira iluminação externa pública, também surgiu no Rio de Janeiro, em 1881, na atual Praça da República. O ano de 1887 marca o início do funcionamento da primeira usina hidrelétrica do país, em Portão de Ferro, na cidade de Diamantina (MG). No mesmo ano, começou a funcionar a primeira usina do Rio Grande do Sul, a termelétrica Velha Porto Alegre, e tornou Porto Alegre a primeira capital brasileira a contar com iluminação pública elétrica. Em 1889, entrou em operação, em Juiz de Fora, Minas Gerais, a maior usina hidrelétrica da época, a Usina Hidrelétrica Marmelos, a primeira usina de maior porte no Brasil. Três anos mais tarde, em 1892, foi inaugurado, na cidade do Rio de Janeiro, a primeira linha de bondes elétricos instalada em caráter permanente no país (MEMÓRIA DA ELETRICIDADE, 2017). Ainda no final do século XIX, em 1888, foi assinada a Lei Áurea decretando o fim escravidão.

2.3.3 Século XX

- Décadas de 1900 a 1930: A busca de uma identidade nacional

O início do século XX foi marcado por vários movimentos na arquitetura brasileira baseados, em grande parte, na reprodução das tendências arquitetônicas europeias desvinculadas com as preocupações de adaptação aos climas do país e que não apresentavam novidades significativas. Reis Filho (2006) afirma que a arquitetura brasileira do início do século traria poucas transformações de importância e, o despertar para modificações bruscas, livres de saudosismos e do "preciosismo sem sentido", ocorreram por ocasião da Primeira Guerra Mundial.

Dois outros movimentos ganham força no cenário nacional, o neocolonial[107] e o modernismo. O neocolonial era enraizado na tradição da arquitetura brasileira do período da colonização e, o modernismo, representa uma ruptura com o passado e o desenvolvimento de uma nova arquitetura ligada à realidade tecnológica e social do mundo da época. Os dois movimentos tinham em comum a procura por uma arquitetura com identidade própria, genuinamente brasileira, valorizando, sobretudo, a cultura e a realidade climática local.

[107] José Marianno Filho defendia a tese de que os estilos provenientes de outros países enfraqueceram a expressão da "raça brasileira". Ele não gostava da denominação "Arquitetura Neocolonial Brasileira", preferia "Arquitetura Tradicional Brasileira".

A arquitetura neocolonial teve um caráter de resgate da identidade nacional e estava intimamente vinculado ao clima, através do uso de elementos arquitetônicos difundidos na arquitetura colonial brasileira como: varandas, muxarabis, gelosias, grandes beirais, pátio central, azulejos, dentre outros (Figuras 2-118, 2-119 e 2-220). Entretanto, a procura de soluções arquitetônicas do passado vinculadas às novas necessidades da época, fizeram o movimento perder força. A arquitetura neocolonial iniciou, em 1914, e terminou por volta do final da década de 1930, enquanto a arquitetura moderna ganhava espaço.

Figura 2-118: Casa do Arquiteto – Guarujá – Ricardo Severo (1922).

Fonte: Bruand (2012).

Figura 2-119: Pavilhão das Pequenas Indústrias – Nestor de Figueiredo e San Juan (1922).

Fonte: Bruand (2012).

Figura 2-120: Casarão dos Bica – Porto Alegre – Arq. Fernando Corona (1929-1937)[108].

Fonte: Vettorazzi (2018).

De uma forma geral, os fatos que contribuíram para alavancar a arquitetura moderna brasileira deram-se, inicialmente, em São Paulo, com a Semana de Arte Moderna[109] de 1922 e com as obras de Gregori Warchavchik, 1927-1930 e, posteriormente, com a reforma da Escola Nacional de Belas-Artes, 1930-1931 e a definição do projeto do prédio do Ministério da Educação e Saúde, 1936-1943, no Rio de Janeiro.

A primeira manifestação do Modernismo na arquitetura brasileira aconteceu em São Paulo, na obra de Warchavchik – com a Casa Modernista da Rua Santa Cruz (Figura 2-121). Posteriormente, em 1929 e 1930, é construída a Casa Modernista da Rua Itápolis (Figura 2-122). Mesmo se tratando de experiências iniciais ainda em busca de um caráter próprio e de uma identificação com o local, a nova arquitetura possuía elementos de adaptação climática como o uso da cor branca, que reflete os raios

[108]Reúne características da arquitetura neocolonial com adaptações ecléticas. Localizado na rua Santo Inácio 295, no bairro Moinhos de Vento.

[109]A Semana de Arte Moderna provocou um espírito de luta contra a aceitação aos valores estabelecidos, faltava somente achar a solução apropriada para a arquitetura. Posteriormente, em 1928, o Movimento Antropofágico representa esse espírito inovador da época. Escrito por Oswaldo de Andrade, tinha como proposta que o artista brasileiro assimilasse a estética das vanguardas artísticas europeias, e criassem a partir disso uma arte brasileira moderna sem perder a sua identidade nacional. "Antropófago" do grego *anthropos* = "homem" *phagein* = "comer". Remetia aos índios antropófagos, que comiam a carne humana dos europeus para adquirir os seus conhecimentos. De forma semelhante, a antropofagia modernista, propunha a deglutir a cultura estrangeira e adaptá-la ao Brasil. Referência ao conceito simbólico de assimilação cultural, expresso no manifesto de Oswald de Andrade de 1928.

solares, elementos de sombreamento das janelas e varandas que possibilitavam o sombreamento da edificação.

Figura 2-121: Casa Modernista da Rua Santa Cruz de Gregori Warchavchik (1927-28).

Fonte: Bruand (2012).

Figura 2-122: Casa Modernista da Rua Itápolis de Gregori Warchavchik (1929-30).

Fonte: Bruand (2012).

No que se refere à energia, até a primeira década do século XX, foi construído no país um grande número de pequenas usinas elétricas, principalmente hidrelétricas e em menor escala termoelétricas, sendo a energia empregada, predominantemente, na iluminação pública e particular, nos bondes utilizados para o transporte coletivo e para as indústrias. Em 1903, foi aprovada a primeira lei sobre o uso de energia elétrica no país (MEMÓRIA DA ELETRICIDADE, 2017).

- *Décadas de 1930 a 1960: Arquitetura moderna brasileira e a adaptação ao clima*

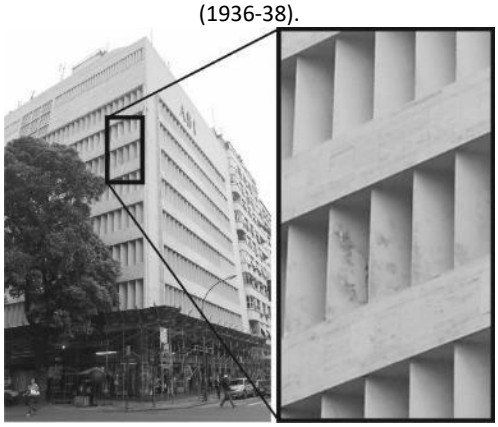
Segundo Prado (2006), a chegada da arquitetura moderna ao Brasil, entre os anos 20 e 30 do século XX, relaciona-se à capacidade de alguns arquitetos em adaptar o vocabulário formal da nova arquitetura que estava sendo proposta na Europa aos países de climas quentes. O entendimento dos princípios de adaptação ao clima estudados a partir da tradição vernacular brasileira aliado ao domínio das novas tecnologias construtivas, como o concreto armado e o vidro, tornou possível a criação de uma arquitetura moderna tropical, genuína e pertinente, que apontava, simultaneamente, para o passado e futuro. Neste sentido, a arquitetura gerada pela primeira geração de arquitetos modernistas brasileiros é exemplar, tornando-se referência no mundo todo (PRADO, 2006). As soluções desenvolvidas por essa geração de arquitetos tinham como estratégia de projeto a preocupação de projetar com o clima, adotando sistemas de condicionamento passivo; principalmente o *brise-soleil,* o qual foi aprimorado e alvo de inúmeras composições e soluções distintas na arquitetura moderna brasileira (GUTIERREZ; LABAKI, 2005). Dessa forma, Goodwin (1943) afirma que, embora os primeiros ímpetos modernos tenham chegado ao Brasil por importação, o país logo achou o caminho próprio, contribuindo com a nova arquitetura com as inovações destinadas a evitar o calor e a luz.

O uso sistematizado e em grande escala de elementos de controle solar, de forma a minimizar os efeitos climáticos sobre as edificações passaram a ser recorrentes nas estratégias usadas pelos

arquitetos, constituindo umas das características mais marcantes da arquitetura brasileira. As releituras e adaptações de elementos como o muxarabi e do *brise-soleil*, produziram uma grande variedade de interpretações no uso de elementos de controle solar (GOLDMAN, 2010).

As primeiras aplicações do sistema de *brise-soleil* nas edificações brasileiras aparecem na cidade do Rio de Janeiro e foram soluções de placas verticais fixas, como no edifício da ABI (Associação Brasileira de Imprensa) dos irmãos Roberto em 1936-38 e móveis na Obra do Berço de Oscar Niemeyer em 1937 (Figuras 2-123 e 2-124). Em 1933, Le Corbusier recomendava *brises-soleils* móveis no projeto não executado em Barcelona (GOODWIN, 1943), sendo a Obra do Berço o primeiro exemplo de integração do *brise-soleil* móvel em edificações. Já Peixoto (2002) afirma que a ABI "é o primeiro edifício do mundo a ter construído um quebra-sol moderno" e que a resolução formal dos *brise-soleil* que caracterizam a fachada são de geometria moderna e inovadora. Bruand (2012) e Goodwin (1943) comentam que, embora Le Corbusier tenha sistematizado os brises, os responsáveis pela aplicação prática e pela definição final foram os arquitetos brasileiros. Bruand (2012) diz que as soluções de brise, no Brasil, de tão engenhosas e variáveis, extrapolaram a finalidade puramente prática, transformando-se em meio de expressão plástica que marcou profundamente a arquitetura brasileira.

Figura 2-123: Edifício da ABI, irmãos Roberto (1936-38).



Fonte: Vettorazzi (2013a).

Figura 2-124: Edifício Obra do Berço, Oscar Niemeyer (1939).

Fonte: Goodwin (1943). Foto: G. E. Kidder Smith.

O edifício do Ministério da Educação e Saúde[110,111], projetado em 1936 e construído entre 1937-43, no Rio de Janeiro, pelo grupo de arquitetos Oscar Niemeyer, Affonso Reidy, Jorge Moreira, Carlos Leão e Ernani Vasconcelos, com consultoria de Le Corbusier e liderados por Lúcio Costa, é o primeiro e mais representativo exemplar da arquitetura moderna a aplicar os cinco princípios de Le Corbusier num

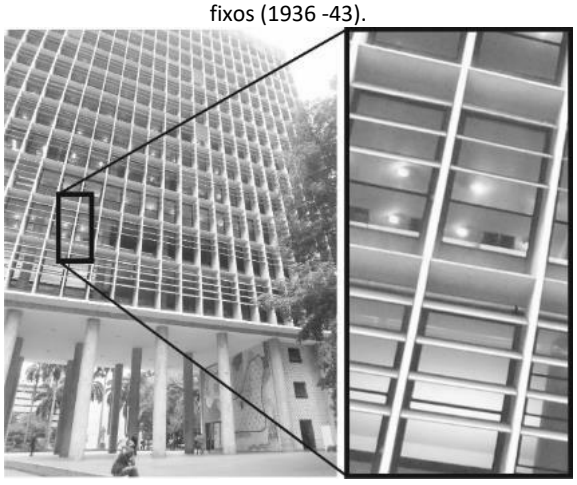
[110] "O Ministério é tomado por uma solução exemplar de linguagem formal moderna e internacionalmente válida, mas com sabor brasileiro, respaldada pela autoridade da história da arquitetura enquanto tradição construtiva racional e nacional, dela derivando sua emblematicidade expressiva" (COMAS, 2010b, p. 89). É considerado um dos prédios mais significativos do século XX, no Brasil e no mundo (COMAS, 2010b).

[111] Atual Edifício Gustavo Capanema ou Palácio Capanema. Originalmente foi projetado para ser o Ministério da Educação e Saúde e posteriormente foi sede do Ministério da Educação e Cultura (MEC).

edifício de grandes dimensões (FRAMPTON, 1997). Foi nessa obra que ocorre a primeira aplicação do brise em um edifício de grande porte (Figura 2-125) (FRAMPTON, 1997). Goodwin (1943) descreve os brises do Ministério da Educação e Saúde como "sistema de defesa contra o sol, absolutamente inédito na arquitetura". A repercussão do projeto do Ministério foi tão positiva que Wisnik (2001) comenta que "é como se o mundo se curvasse diante do Brasil, da sua arquitetura".

Outra inovação do prédio do Ministério da Educação e Saúde foi o uso da pele de vidro[112] (Figura 2-126). Costa (1995) afirma que ainda não havia em Nova Iorque nenhum arranha-céu com pele de vidro, todos surgiram depois. O mesmo afirma Wisnik (2001), que a pele de vidro foi utilizada pela primeira vez como uma nova configuração de fachada pelo prédio do Ministério da Educação e Saúde e que viria a tornar-se o protótipo dos arranha-céus que caracterizariam a prosperidade estadunidense, na segunda metade do século XX, e que apenas se realizaria em Nova Iorque, em 1952, com o edifício Lever, de Skidmore, Owings & Merrill e Gordon Bunshaft. Assim sendo, o projeto do Ministério da Educação e da Saúde que, tão pertinentemente utilizou os elementos de controle solar da nova arquitetura, também apresentou a inovação da pele de vidro que, ironicamente, serviu como referência no desenvolvimento de edificações envidraçadas em todas as partes do mundo, a maioria delas de forma desvinculada ao clima e despreocupadas com as questões energéticas.

Figura 2-125: Ministério da Educação e Saúde: Fachada noroeste protegido com brises horizontais móveis e verticais fixos (1936 -43).



Fonte: Vettorazzi (2013a).

Figura 2-126: Ministério da Educação e Saúde: Fachada sudoeste com vidros expostos, sem proteção (1936 -43).

Fonte: Vettorazzi (2013a).

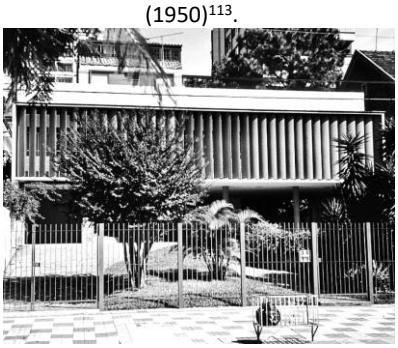
Em 1938-39, a criatividade e o conhecimento técnico na aplicação de elementos de controle solar dominada pelos arquitetos brasileiros são expostos ao mundo no Pavilhão do Brasil na Feira Internacional de Nova Iorque de Lúcio Costa e Oscar Niemeyer. O projeto utiliza o sistema de brise misto na fachada sul, que lembram muito cobogó que fora utilizado pela primeira vez em 1935.

[112]O termo "pele de vidro" ou "cortina de vidro" muitas vezes é utilizado na língua inglesa e francesa (COSTA, 1995). Lucio Costa utiliza o termo *curtain-wall* e *mur rideau* e Guilherme Wisnik (WISNIK, 2001) utiliza os termos *curtain wall* e *pan de verre*.

Além de Lúcio Costa e Niemeyer, as experiências com uso de elemento de controle solar continuaram com força até final da década de 1950, em projetos de arquitetos como Affonso Reidy, Rino Levi, Vilanova Artigas e Oswaldo Bratke, o dos irmãos Roberto.

Na Região Sul do país, mais especificamente em Porto Alegre, há inúmeros exemplares da utilização de elementos de controle solar pela arquitetura moderna desse período, como é o caso da Residência Casado D'Azevedo (1950), dos arquitetos Carlos Alberto de Holanda Mendonça, da Residência Cândido Norberto (1952), e do edifício do Palácio da Justiça (1953), projetados por Carlos Maximiliano Fayet e Luiz Fernando Corona (Figura 2-127, 2-128 e 2-129).

Figura 2-127: Casa Casado D'Azevedo (1950)[113].



Fonte: Luccas (2016a).

Figura 2-128: Residência Cândido Norberto (1952).

Fonte: Luccas (2016b). Foto: Marcelo Donadussi.

Figura 2-129: Palácio da Justiça (1953).

Fonte: Vettorazzi (2017).

Outro elemento arquitetônico de adaptação ao clima largamente utilizado pela arquitetura moderna brasileira foi o cobogó[114]. Vieira, Borba e Rodrigues (2012) esclarecem que a patente do produto é de 1929, ou seja, anterior à sistematização dos *brise-soleils* por Le Corbusier em 1933.

A primeira aplicação do cobogó foi em 1935, na Caixa d´Água de Olinda, e foi utilizado em concreto (Figura 2-130). Os cobogós também foram utilizados nas estratégias de adaptação climática de importantes edificações da época, como o Edifício Bristol, no Parque Guinle, projetado em 1954 por Lúcio Costa, e no Complexo do Pedregulho (1947-52), de Affonso Reidy, ambos na cidade do Rio de Janeiro (Figura 2-131). Até 1960, diversas obras de arquitetos brasileiros desvendaram o uso do *brise-soleil* e dos cobogós de maneira eficaz e criativa.

[113]Atualmente a edificação é um estabelecimento comercial e está totalmente descaracterizada. Endereço: R. Comendador Caminha, 60, Bairro Moinhos de Vento, Porto Alegre-RS.

[114]O Cobogó é um elemento vazado que lembra a ideia dos antigos treliçados de madeira presentes nos muxarabis e gelosias, e que pode ser definido como um elemento pré-fabricado vazado desenvolvido inicialmente em concreto e posteriormente de cerâmica e outros materiais construtivos, composto por peças modulares que quando assentadas formam um painel.
O nome cobogó deriva das iniciais dos sobrenomes de seus criadores Amadeu Oliveira Coimbra (comerciante português) Ernest August Boeckmann (cidadão alemão radicado em Recife) e Antônio de Góis (engenheiro) (VIEIRA; BORBA; RODRIGUES, 2012). Porém, alguns arquitetos, como Oscar Niemeyer, chamam de combogó assim como também consta esse nome na patente do produto em 1929. Também é encontrado na literatura como "cambogé". Holanda (1976) comenta que os cobogós são elemento simples, leves, resistentes, econômicos, sem exigências de manutenção e com alto grau de padronização dimensional. Segundo o autor, a racionalização atingida faz do cobogó um componente preparado para a grande produção industrial.

Figura 2-130: Exterior da Caixa d´Água de Olinda (1935).

Fonte: Campusano Santos (2014). Foto: Adriana Freire.

Figura 2-131: Parque Guinle (1954).

Fonte: Fracalossi (2011). Foto: Nelson Kon.

Em relação à produção e o consumo de energia, até 1940 a principal fonte primária de energia no Brasil era a lenha, que respondia por 70% do consumo energético. Após a Segunda Guerra Mundial, a industrialização, o crescimento urbano acelerado e o desenvolvimento dos transportes rodoviários aumentaram o consumo de energia. A eletricidade era usada nas cidades, no setor de serviço e na indústria, e o petróleo e gás nos transportes e indústrias (CARVALHO, 2014). Nesse período, aumenta a preocupação com o petróleo nacional e é criada, em 1953, a Petrobras.

- Décadas de 1960 a 1970: Arquitetura pós Brasília e a desconexão com o clima

Dois marcos fundamentais são evidenciados como uma ruptura da arquitetura brasileira com relação ao projeto com a preocupação em eficiência energética: a construção de Brasília e o edifício Avenida Central, no Rio de Janeiro.

A intensa utilização de elementos de controle solar, como o *brise-soleil* e o cobogó, na arquitetura brasileira interrompeu-se em meados da década de 1950. A partir de 1955, as obras de Niemeyer, um dos grandes entusiastas e pioneiros na aplicação do *brise-soleil*, é marcada por uma transformação que é evidenciada nos projetos para Brasília. Em 1957, Lúcio Costa vence o concurso para o Plano Piloto de Brasília, ao mesmo tempo em que Niemeyer começa a projetar os edifícios da nova capital. A partir de Brasília, para muitos, a obra de Niemeyer apresenta mais intenções formais, esculturais que propriamente adaptação a realidade climática local. Segundo Comas (2010a), no final dos anos 1950, nos palácios envidraçados de Brasília, Niemeyer começou a abandonar a planaridade e o uso do *brise-soleil* que era, até então, presente em sua obra e a influência da arquitetura estadunidense passou a ganhar terreno. Deste modo, o cuidado pragmático das primeiras obras modernas brasileiras que tanto impressionaram arquitetos e críticos em todo o mundo teria se perdido, e a crença na

possibilidade do condicionamento proporcionada pelos sistemas mecânicos de refrigeração passou a predominar (MARAGNO, 2000).

A arquitetura de Brasília é, em grande parte, desprotegida contra o Sol e revestida por vidro, apresenta um grande contraste com a arquitetura de anos anteriores com uso de elementos de controle solar ajustáveis criteriosamente. Essa indiferença ao clima parece decorrer de um desejo de representar as instituições governamentais por formas platônicas puras com painéis de vidro reflexivos (FRAMPTON, 1997). A própria orientação das edificações nas superquadras evidencia a despreocupação com a incidência solar (Figura 2-132). Segundo Campos (1961), Niemeyer deixou-se levar demasiadamente pela inspiração do artista, esquecendo os seus deveres de sociólogo e de economista e, assim, construiu prédios para serem admirados, mas de maneira alguma usufruídos.

Figura 2-132: Superquadra de Brasília (1957).

Fonte: Wisnik (2001).

Figura 2-133: Edifício Avenida Central, Rio de Janeiro, Arq. Henrique Mindlin (1958-61).

Fonte: Revista Acrópole (1961). Foto: José Maoscardi.

Maragno (2000) afirma que a construção no Rio de Janeiro do edifício Avenida Central, uma torre de vidro sem proteção solar, projetado pelo arquiteto Mindlin, em 1958, e construído entre os anos de 1959 e 1961, evidencia o fim do predomínio da corrente europeia corbusiana sobre a nossa arquitetura e o início de uma nova fase de nítida influência estadunidense (Figura 2-133). Bruand (2012) ressalta que o edifício mais fortemente marcado nesse sentido, talvez o único que se prenda a uma inegável origem estadunidense é o prédio Avenida Central, com clara referência a Mies van der Rohe[115].

Segundo Bruand (2012), essa mudança que é, antes de tudo, de ordem técnica, e surgiu com o progresso da indústria e das condições necessárias para o desenvolvimento de uma arquitetura de vidro e aço capaz de oferecer ao movimento racionalista brasileiro uma opção diferente da que deriva

[115] Mies van der Rohe não é estadunidense de origem, mas as condições oferecidas pelo mercado e a indústria dos Estados Unidos possibilitaram a sua obra (BRUAND, 2012).

das teorias de Le Corbusier. O edifício Avenida Central pode ser considerado um dos principais representantes brasileiro da arquitetura do "Estilo Internacional"[116].

Esse mesmo modelo de grandes prismas envidraçados desvinculados com o contexto climático foi reproduzido em todo o país a partir da década de 1960. No Rio Grande do Sul, há dois exemplos emblemáticos onde a orientação solar da implantação das edificações em função do clima e da eficiência energética foi desconsiderada. O projeto de implantação da UFSM[117], em Santa Maria-RS, datado de 1962, foi realizado prevendo as maiores faces das edificações voltadas para o eixo viário principal, deixando seus maiores planos amplamente envidraçadas expostos a radiação solar leste e oeste, enquanto que os menores, com pouca ou nenhuma abertura, a norte e sul. Exemplo parecido aconteceu com a implantação do prédio do DAER, em Porto Alegre, em 1963, onde um grande prisma vertical foi orientado com suas maiores fachadas no sentido leste e oeste, privilegiando provavelmente o paralelismo com a avenida principal, Avenida Borges de Medeiros.

A arquitetura do "Estilo Internacional", com fachadas totalmente envidraçadas e tendências puristas, chegou com força ao território brasileiro, desvinculando as edificações do contexto climático local. Ao que parece, a tendência purista da arquitetura, não admitia muito elementos de proteção solar externos na composição arquitetônica. O uso indiscriminado das fachadas de vidro para o clima brasileiro teve consequências diretas no consumo energético e no conforto ambiental dos usuários. As experiências de adaptação climática arquitetônica dos indígenas brasileiros, da arquitetura portuguesa e da arquitetura moderna inicial, foram dando espaço a uma arquitetura que transfere a responsabilidade do conforto dos usuários aos equipamentos artificiais, com grande consumo energético. O desenvolvimento do aparelho de ar-condicionado por Carrier no início do século XX é apontado por Roth (2007) como a causa de arquitetura mundial "esquecer", temporariamente, os meios passivos de redução dos ganhos de calor, isso até a crise do petróleo de 1973.

- Décadas de 1970 a 1990: Crise do petróleo, projetos bioclimáticos e casas experimentais

Assim como aconteceu nos Estados Unidos e na Europa, o interesse pela eficiência energética na América Latina sempre esteve ligado com períodos de iminente escassez energética. A crise de energia na década de 1970 foi o estopim que faltava para a retomada da consciência da população e de alguns arquitetos. No entanto, enquanto a crise energética se aprofundava, durante as décadas de 1970 e

[116] "Estilo Internacional" ou *International Style* recebeu esse nome pois estava voltado a ideais universais, sem referências locais ou particulares. Alguns valores do Estilo Internacional que começaram a ser discutidos principalmente a partir de 1950: solução genérica e universal para os problemas construtivos, independente de cultura, lugar ou tempo; rompimento com a história da arquitetura; elevação do programa funcional e da estrutura construtiva à posição de únicos referenciais para a geração de formas arquitetônicas; formas geométricas puras (antiornamentais), com emprego de materiais industrializados (modernos ou tradicionais) e elementos como: pilotis, janelas longitudinais, fachadas-cortina, coberturas planas, esqueletos estruturais, etc. (CASTELNOU, 2015).

[117] Muitas das edificações construídas após a implantação original foram orientadas com as faces maiores no sentido norte/sul, minimizando os impactos negativos da radiação solar, porém, se opondo ao plano piloto inicial.

1980 a eficiência energética não era a preocupação dominante na academia que se ocupava com discussões relativas ao movimento pós-moderno. Do mesmo modo, a implantação dos edifícios a partir de critérios de orientação em relação ao Sol era desconsiderada e alheia ao consumo de energia (MASCARÓ; MASCARÓ, 1985).

No Brasil, o interesse por edificações confortáveis e energeticamente eficientes levaram alguns arquitetos, físicos e engenheiros, especialmente ligados às universidades públicas, a desenvolver edificações com tecnologias passivas. De uma forma geral, a maioria dessas edificações tira proveito da boa orientação solar, da massa térmica para aquecimento e resfriamento e da ventilação natural.

Nas décadas de 1970 e 1980, o prof. Ennio Cruz da Costa[118] projetou e construiu duas edificações[119] passivas em Porto Alegre (Figura 2-134 e 2-135). Nas duas edificações é possível verificar a aplicação dos conceitos de casa passiva através do controle da radiação solar indesejada do verão com uso de sacadas e beirais avantajados, também possui parede trombe, ventilação por efeito chaminé e um sistema de dutos enterrados que possibilitam aquecer o ar no inverno e resfriar no verão.

Figura 2-134: Casa Ennio Cruz da Costa, Porto Alegre, (déc. 1970).

Fonte: Da Costa (1982).

Figura 2-135: Parede trombe e ventilação por efeito chaminé (fachada norte) (1987).

Fonte: Vettorazzi (2017).

Após a crise internacional do petróleo na década de 1970, alguns arquitetos brasileiros, conscientes da responsabilidade energética e ambiental da arquitetura, produziram obras de grande relevância. O principal nome nesse aspecto é o João Filgueiras Lima (Lelé)[120]. A maioria das suas obras utilizava elementos pré-fabricados de concreto e metálicos, sempre acompanhadas de um rigor técnico e formal único, conferindo qualidades espaciais e de conforto ambiental mediante estratégias passivas como: ventilação natural por efeito chaminé; controle da radiação solar por meio de *brise-soleils*,

[118]Engenheiro Mecânico, Eletricista e Civil, foi professor catedrático da Escola de Engenharia e da Faculdade de Arquitetura da UFRGS.

[119]As informações da segunda Casa Ennio Cruz da Costa foram coletadas no Edifica POA, Escritório-Geral de Licenciamento e Regularização Fundiária (EGLRF) vinculado à Secretaria Municipal de Gestão de Porto Alegre e *in loco*. A segunda casa Ennio Cruz da Costa localiza-se na Rua Prof. Oscar Pereira, 8754, no Bairro Belém Velho, em Porto Alegre. Atualmente (2018) é sede campestre do Conselho Regional de Enfermagem (COREN).

[120]João Filgueiras Lima, conhecido por Lelé (1932-2014), foi um arquiteto brasileiro que procurava projetar edificações que pudessem ser construídas rapidamente através do uso de elementos pré-fabricados em concreto ou em estruturas metálicas. Adaptava suas edificações de acordo com as características climáticas do lugar, utilizando tecnologias com vistas ao conforto térmico e a eficiência energética.

iluminação natural valorizada, uso de vegetação no entorno e no interior das edificações, massa térmica para resfriamento do ar entre muitas outras.

Apesar de sua vasta produção arquitetônica, Lelé ficou mais conhecido pelos projetos da Rede de Hospitais Sarah Kubitschek. Seu primeiro projeto da rede foi em Brasília, em 1975, construção entre 1976/80, e o último projeto de 2000/2004, no Rio de Janeiro e construção 2004 a 2008 (Figura 2-136 e 2-137). Na rede Sarah, o *shed* é elemento mais emblemático que distingue sua arquitetura e lhe confere um caráter único. Através da variação volumétrica dos *sheds*, conforme a localização geográfica do hospital da rede, Lelé controla a entrada e saída da luz natural, da radiação solar e da ventilação, ao mesmo tempo em que outorga uma volumetria singular a cada hospital da rede.

Figura 2-136: Hospital Sarah de Brasília (1975-80).

Fonte: Montero (2006). Acervo CTRS.

Figura 2-137: Hospital Sarah do Rio de Janeiro (2000-2008).

Fonte: Grunow (2009).

As décadas de 1970 e 1980 também tiveram ações as quais conduziram, posteriormente, à normatização e à etiquetagem das edificações em relação à conservação de energia, mesmo que isso tenha ocorrido, efetivamente, somente décadas depois. Nesse sentido, em 1973, no mesmo ano da crise internacional do petróleo, foi criado o Inmetro. Em 1984, foi criado o Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE), coordenado pelo Inmetro, responsável por fornecer informações sobre o desempenho dos produtos. Por fim, em 1985, foi criado o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica, Procel, com a missão de articular o setor elétrico e a sociedade, visando fomentar a eficiência energética e o uso racional de energia (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2014).

No ano de 1983, foi dado um importante passo na implementação das disciplinas de conforto ambiental nos cursos de Arquitetura e Urbanismo do país. O MEC, juntamente com a CAPES, realizou o curso intitulado "Controle Ambiental em Arquitetura"[121] para professores de arquitetura de 11 universidades federais brasileiras. O curso teve como objetivo divulgar e fomentar o desenvolvimento de disciplinas de conforto ambiental nos cursos de Arquitetura e Urbanismo. A partir do curso, o termo "Controle do Ambiente" passou a ser utilizado como "Conforto Ambiental".

[121]Os quatro professores tutores foram Márcio Villas Boas (UnB), Lúcia Mascaró (UFRGS), Luis Carlos Chichierchio (USP) e Paulo Cardoso da Silva (UFC).

A crise internacional do petróleo também impulsionou o investimento do governo brasileiro em novas formas de geração de energia. Ampliavam-se os estudos do álcool como alternativa ao petróleo e, em 1975, foi criado o Proálcool (Programa Nacional do Álcool) (CARVALHO, 2014). Nas décadas de 1970 e 1980, o governo brasileiro investe massivamente na construção das Usinas Nucleares Angra I (1972), Angra II (1976) e Angra III (1986), e, em 1975, inicia a construção da maior usina hidrelétrica da época: Hidrelétrica de Itaipu.

- *Década de 1990: Avanços dos programas computacionais, normatização e na implementação de laboratórios de conforto*

No âmbito internacional, a Eco-92, o Protocolo de Kyoto e a crise do petróleo, impactaram no desenvolvimento de políticas públicas que conduziam a conscientização da necessidade de maior eficiência energética das edificações brasileiras (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014). Enquanto que, na década de 1990, há poucas novidades em relação à produção de energia no Brasil e no desenvolvimento efetivo de projetos arquitetônicos passivos, há importantes avanços nas discussões sobre a implementação da eficiência energética e do conforto ambiental nas edificações. O consumo de eletricidade passou por um significativo crescimento entre os anos de 1994 e 1998, após o lançamento do Plano Real[122]. A partir de 1994, o poder aquisitivo dos brasileiros aumentou, ao mesmo tempo em que os preços dos eletrodomésticos diminuíram, gerando maior aquisição desses aparelhos e impactando, diretamente, no consumo elétrico residencial (BRASIL, 2007).

Durante essa década, foram tomadas medidas para a implantação e o desenvolvimento de laboratórios de conforto ambiental em universidades para suporte à graduação e à pós-graduação, pesquisa e extensão. Também foram desenvolvidos programas computacionais nacionais que auxiliam na elaboração de projetos arquitetônicos passivos, além da realização eventos e encontros acadêmicos que conduziram, nas décadas posteriores, a normatização quanto ao desempenho relativo ao conforto ambiental e energético de edificações.

No Brasil, no final da década de 1980 e principalmente na década de 1990, o desenvolvimento e a utilização de programas computacionais como apoio no desenvolvimento de projetos com eficiência energética e conforto térmico começaram a se proliferar. Nesse sentido, se destacou a Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). Na UFSCar, o professor arquiteto Mauricio Roriz[123] desenvolveu vários programas computacionais a partir de 1989 até seu falecimento em 2014. Entre 1989 e 2000, dois de

[122]Plano Real foi um programa brasileiro com o objetivo de estabilização e reformas econômicas, iniciado em 1994 e que determinou o lançamento de uma nova moeda, o real. Foi a mais ampla medida econômica já realizada no Brasil e tinha como objetivo principal o controle da hiperinflação.

[123]Maurício Roriz (1944 – 2014), arquiteto, professor e pesquisador. Teve participação fundamental no Zoneamento Bioclimático Brasileiro e na criação das Normas ABNT NBR 15220 e 15575 sendo criador da atual Base de Dados Climáticos dos Municípios Brasileiros e de longa série de programas computacionais livres (INFOHAB, 2018).

seus programas ganharam destaque: ARQUITROP [124], em 1989, e Luz do Sol: Radiação solar e iluminação natural[125], em 1994.

Por outro lado, o LabEEE, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações da Universidade Federal de Santa Catarina, também desenvolveu alguns programas, como Analysis 1.5 em 1996, para avaliação bioclimática de projetos a partir de cartas bioclimáticas e avaliação das condições de conforto térmico, segundo a ISO 7730. No entanto, o laboratório dedicou-se, na segunda metade da década de 1990, à utilização de diversos programas de simulação energética de edificações existentes, dentre o VisualDOE2.6, que é uma interface gráfica do DOE-2.1E para sistema operacional Windows.

Na década de 1990, foram dados os primeiros passos para a normatização energética das edificações. Embora o Inmetro, o PBE e o PROCEL existissem há, aproximadamente, trinta anos, durante muito tempo não se encarou como prioridade a eficiência energética das edificações e sua grande contribuição para o consumo total nacional. No início da década de 1990, o cenário começou a agir mais intensamente, sendo que no ENTAC, Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, de 1993, impulsionado pelo 1° Encontro Nacional de Normalização Ligada ao Uso Racional de Energia e ao Conforto Ambiental em Edificações de 1991 realizado na cidade de Florianópolis-SC, foram propostas uma lista de medidas que, anos mais tarde, se tornariam a base para as diretrizes de projeto em âmbito nacional. Grande parte destes apontamentos transformaram-se nas cinco partes constituintes da NBR 15220 de 2005, vigente até hoje.

Duas partes do proposto pelo ENTAC de 1993, no entanto, tiveram um tratamento um pouco diferente: desempenho térmico e energético de edifícios residenciais e desempenho térmico e energético de edifícios comerciais. Essas duas partes culminaram, posteriormente, na publicação do RTQ-C e do RTQ-R. Esses documentos contêm a metodologia para analisar as edificações e enquadrá-las em níveis de eficiência energética de “A”, mais eficiente a “E”, menos eficiente. Este nível de eficiência é comprovado mediante a emissão da ENCE (Etiqueta Nacional de Conservação de Energia) e depende do tipo de análise feita na edificação.

A década de 1990 também foi marcada por passos importantes para o desenvolvimento de laboratórios de Conforto Ambiental nos cursos de Arquitetura das universidades brasileiras. Um desses primeiros passos foi a publicação da Portaria Nº 1.770, de 21 de dezembro de 1994, a qual visava fixar as diretrizes curriculares e o conteúdo mínimo do curso de graduação em Arquitetura e Urbanismo estabelecendo em seu Art. 4º as Matérias Profissionais, estando entre elas, a disciplina de Conforto

[124]Ganhou o segundo prêmio no Concurso Nacional Pirelli de Conservação de Energia Elétrica, promovido pelo PROCEL - Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica - Eletrobras - São Paulo (SP) – 1989.

[125]Ganhou o prêmio de Melhor Software Tecnológico no concurso promovido pelo MEC, com apoio IBM e FENASOFT - Brasília (DF) - dezembro de 1994.

Ambiental. Em seguida, o Art. 5º definiu que as matérias profissionais como a de Conforto Ambiental, tem como exigência, para sua oferta, a utilização de laboratórios e equipamentos correspondentes (BRASIL, 1994).

O "Roteiro das Informações a serem Fornecidas pelas Instituições de Ensino Superior, para a Abertura e Funcionamento de Cursos"[126], por sua vez, documenta as diretrizes para o Laboratório de Conforto como espaço de experimentação, pesquisa e ensino dentro da estrutura do Curso de Arquitetura e Urbanismo.

Em consequência, alguns Laboratórios de Conforto Ambiental foram criados em todo país a partir de meados da década de 1990. Em 1996, foi criado na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) o Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE). Desde sua criação até a atualidade, o LabEEE é a principal liderança da produção acadêmica, no Brasil, sobre assuntos relativos à energia na edificação e as suas respectivas normatizações. Dois anos mais tarde, em 1998, foi criado o Laboratório de Conforto Ambiental, LabCon, da Faculdade de Arquitetura na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS (LABCON, 2017).

Entre os projetos passivos desenvolvidos no Brasil nessa época, destaca-se a continuação dos projetos da Rede Sarah iniciados por Lelé na década de 1970. Em 1994, é construído o Hospital da Sarah de Salvador, evidenciando-se na sua volumetria o uso de *sheds* para prever ventilação e iluminação natural (Figura 2-138). De forma oposta, há o crescente predomínio estético de fachadas envidraçadas com amplo uso de sistema de ar-condicionado, principalmente, em edificações corporativas e comerciais, como, por exemplo, o Shopping Brasília, projetado por Ruy Ohtake em 1997 (Figura 2-139).

Figura 2-138: Hospital da Rede Sarah, Salvador (1994).

Fonte: Fracalossi (2012b).

Figura 2-139: Shopping Brasília, Brasília (1997).

Fonte: Maciel e Luczyszyn (2014).

[126]Ministério da Educação/Secretaria de Educação Superior/Coordenação das Comissões de Especialistas de Ensino/Comissão de Especialistas de Ensino de Arquitetura e Urbanismo CEAU/Roteiro das Informações a serem fornecidas pelas IES, para a Abertura e Funcionamento de Cursos.

2.3.4 Século XXI: Consolidação dos laboratórios de conforto ambiental, intensificação do uso de programas computacionais e normalizações

O início da primeira década do século XXI marcou a consolidação dos laboratórios de conforto ambiental no país. Em 2003, a Eletrobras através do projeto PROCEL/EDIFICA assinou convênio com 12 universidades para a capacitação de 13 laboratórios [127] de conforto ambiental e eficiência energética. A partir desta parceria, pôde-se investir na compra de equipamentos e em pesquisa para implementação dos laboratórios, capacitando-os para diversos fins. Entre esses laboratórios beneficiados, estão o LabCon da UFRGS e o LabCEE da UFPel.

Durante a década de 2000, também houve avanços significativos no uso e desenvolvimento de programas computacionais. O professor Mauricio Roriz, da UFSCar, continuou o desenvolvimento de programas computacionais até a década de 2010. Entre os programas se destacaram: o *Sunpath* 1.0; ABC: *Architectural Bioclimatic Classification* e o ZBBR (Zoneamento Bioclimático do Brasil).

Assim como a UFSCar, a UFSC também apresentava avanços consideráveis nas simulações computacionais relativas à eficiência energética. A partir de 2001, o LabEEE começou a utilizar, em caráter experimental, o programa *EnergyPlus*. Atualmente, a maioria dos trabalhos de pós-graduação desenvolvidos no LabEEE envolve a utilização de simulação computacional para a análise térmica e energética de edificações (LABEEE, 2017).

Segundo Nicolau e Chvatal (2010), tem-se notado, nos últimos anos, que muitas ferramentas computacionais simples têm sido desenvolvidas. No site do LABAUT [128] e LABEEE há dezenas de programas computacionais brasileiros disponíveis para carregamento. Assim como o Diretório de Ferramentas Computacionais, pertencente ao Departamento de Energia dos Estados Unidos (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2017), apresenta centenas de programas computacionais, muitos deles de acesso livre.

Nas últimas duas décadas, o governo brasileiro tem demonstrado crescentes preocupações com a questão ambiental e energética relacionada às edificações e, tem-se visto um aumento do incentivo na normatização das edificações quanto ao desempenho energético. Deste modo, no ano 2000, é publicado o Decreto Federal n° 3330 que dispõem sobre a redução do consumo de energia elétrica em

[127]Os laboratórios são: PUC/PR (Lab. de Sistemas Térmicos – LST); UFAL (Lab. de Conforto Ambiental e Eficiência Energética – GECA); UFF (Lab. de Conservação de Energia e Conforto Ambiental - LABCECA); UFPel (Lab. de Conforto Ambiental); UFRGS (Lab. de Conforto Ambiental – LABCON); UFMG (Lab. de Conforto Ambiental – LABCON); UFRN (Lab. de Conforto Ambiental – LABCON); UNB (Lab. de Conforto Ambiental e Eficiência Energética – LACAM); UFMS (Lab. de Análise e Desenvolvimento de Edificações - LADE); UFBA (Lab. de Eficiência Energética e Ambiental); UFSC (Lab. de Eficiência Energética em Edificações – LabEEE e Lab. de Conforto Ambiental – LABCON) e UFRJ (Lab. de Conforto Ambiental e Eficiência Energética) (LABEEE, 2018).

[128]Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética Departamento de Tecnologia da Arquitetura da FAUUSP.

prédios públicos da Administração Pública Federal. Com a crise nacional que afetou o fornecimento e a distribuição de energia elétrica no Brasil em 2001, conhecida como "apagão"[129], foi regulamentada, no mesmo ano, a Lei n° 10.295, conhecida como "Lei de Eficiência Energética", que dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia Elétrica, a qual visa à alocação eficiente de recursos energéticos e a preservação do meio ambiente (BRASIL, 2001). A lei estabelece níveis de consumo energético de máquinas e aparelhos fabricados ou comercializados no país e, também, criou o Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética e, especificamente para edificações, criou o Grupo Técnico para Eficientização de Energia nas Edificações no País (GT-Edificações) para regulamentar e elaborar procedimentos para avaliação da eficiência energética das edificações construídas no Brasil, visando o uso racional de energia elétrica (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2014).

Preocupado com a grave crise de abastecimento de energia elétrica que se tornou pública pelos apagões súbitos de energia, o governo brasileiro publica o Decreto Federal n° 4131, de 2002, que dispõem sobre medidas emergenciais de redução do consumo de energia elétrica no âmbito da Administração Pública Federal (BRASIL, 2002).

Em 2003, foi instituído pela Eletrobras e PROCEL o Programa Nacional de Eficiência Energética em Edificações - PROCEL EDIFICA, em que as ações foram ampliadas e organizadas com o objetivo de incentivar a conservação e o uso eficiente dos recursos naturais nas edificações, reduzindo os desperdícios e os impactos sobre o meio ambiente (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2014).

Recentemente, os problemas energéticos brasileiros voltaram à tona, devido ao baixo nível dos reservatórios de água que alimentam as hidrelétricas, sendo necessário o acionamento da geração de energia pelas termoelétricas, impactando no aumento da energia elétrica e no racionamento de água.

Em 2005, foi aprovado a norma de Desempenho Térmico de Edificações - NBR 15220[130], que presenta recomendações quanto ao desempenho térmico de habitações unifamiliares de interesse social, estabelece um Zoneamento Bioclimático Brasileiro e faz recomendações de diretrizes construtivas e detalhamento de estratégias de condicionamento térmico passivo.

[129]O apagão foi uma crise nacional de fornecimento e distribuição de energia elétrica ocorrida entre os anos de 2001 e 2002. No início da crise levantou-se a hipótese de que talvez se tornasse necessário fazer longos cortes forçados de energia elétrica em todo Brasil. Estes cortes forçados foram chamados de "apagões". Nesse período houve campanha por um racionamento de energia.

[130]É dividida em 5 partes: Parte 1: Definições, símbolos e unidades; Parte 2: Método de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações; Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social; Parte 4: Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo princípio da placa quente protegida e Parte 5: Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo método fluximétrico.

Outro passo importante em busca da normatização das edificações, quanto ao desempenho energético, foi a criação da NBR 15575[131], por intermédio de quais edifícios residenciais passaram a ser objeto da regulamentação, no sentido da avaliação de desempenho (ABNT, 2013). Em 2009, foi publicado a primeira versão, em parceria com Inmetro, LabEEE, UFSC, Procel Edifica e Eletrobras, o RTQ-C, um manual com requisitos técnicos da qualidade para nível de eficiência de edifícios comerciais, de serviços e públicos. Mais recentemente, em 2010, foi publicada a primeira versão do RTQ-R, que trata de edificações residenciais (INMETRO, 2012). No início de 2011, foi publicado os Requisitos de Avaliação da Conformidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais – RAC-R (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2014).

Posteriormente, o RAC-C e RAC-R foram unificados em um documento único, publicado em 2013 e denominado Requisitos de Avaliação da Conformidade para Eficiência Energética de Edificações – RAC. A publicação vigente do RTQ-C de 2010 possui, ainda, duas publicações complementares: de 2012 e de 2013 (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2014).

Em 05 de junho de 2014, foi publicada no Diário Oficial a Instrução Normativa que, ao contrário do panorama atual para edificações residenciais e comerciais, torna obrigatória a etiquetagem nos projetos e construções de edificações públicas federais, com área superior a 500 m², novas ou que recebam *retrofit*[132] que altere seus sistemas de iluminação, condicionamento de ar ou sua envoltória. A normativa estipula que estas edificações devem obter, obrigatoriamente, ENCE "A" (BRASIL, 2014).

As primeiras décadas do século XXI também têm sido marcadas pelo desenvolvimento de edificações passivas experimentais, com vistas a eficiência energética e o conforto ambiental, por universidades públicas brasileiras. Destacam-se a Casa Eficiente[133] (2006) da UFSC e a Casa E[134] (2009) da UFRGS (Figuras 2-140 e 2-141).

---

[131] A primeira edição da NBR 15.575 foi disponibilizada em 2007 para consulta pública, com vistas à sua publicação em 2008. A publicação final foi em 2013. É dividida em 6 partes: Parte 1: Requisitos gerais; Parte 2: Requisitos para os sistemas estruturais; Parte 3: Requisitos para os sistemas de pisos; Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas; Parte 5: Requisitos para os sistemas de coberturas e Parte 6: Requisitos para os sistemas hidrossanitários.

[132] A Instrução Normativa nº 2, de 04 de junho de 2014 define "retrofit é qualquer reforma que altere os sistemas de iluminação, condicionamento de ar ou a envoltória da edificação".

[133] A Casa Eficiente, localizada em Florianópolis-SC, é resultado de uma parceria firmada entre a ELETROSUL/Eletrobras/PROCEL e o Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE) da UFSC. O projeto incorpora estratégias de adequação climática, eficiência energética e uso racional da água, as quais foram reunidas em uma edificação residencial que funciona como vitrine de tecnologias e laboratório de pesquisa. As soluções de projeto estão voltadas para o melhor aproveitamento dos condicionantes climáticos locais, tais como orientação solar, controle da radiação através de elementos de sombreamento externos, aproveitamento dos ventos predominantes no verão, ventilação cruzada em todos os ambientes, áreas úmidas e de serviço voltadas a oeste, uso de barreiras contra os ventos de inverno, orientação e inclinação dos telhados para geração de energia e aquecimento solar de água (LAMBERTS *et al.,* 2010).

[134] Inaugurada em 2009, localiza-se no município de Viamão, próxima a divisa de Porto Alegre.Também chamada de Casa Experimental de Energias Renováveis ou *E-House*. Conforme Casa E (2017) a edificação possui "5 Es": Envoltória (envelope *house*); Energias e recursos renováveis; Ecológica; Experimental-demonstrativa e Evolução. A casa é alongada na direção leste-oeste. Possui a fachada norte maior para exposição ao sol e com persiana solar com vidro duplo, a fachada leste e oeste é coberta com vegetação de folhas caducas e o sul é protegido do vento pela vegetação local. HOROWITZ *et al.* (2008) define a casa como "envelope *house*", com envoltória de paredes

Figura 2-140: Casa Eficiente da UFSC (2006).

Fonte: Lamberts *et al*. (2010).

Figura 2-141: Casa E da UFRGS (2009).

Fonte: Casa E (2017).

Exemplos atuais de despreocupação com a eficiência energética na arquitetura brasileira são percebidos em edificações corporativas e também na maioria das construções populares financiadas pelo Programa Minha Casa Minha Vida (PMCMV) do governo federal. Nos dois casos, o predomínio do uso das mesmas soluções construtivas em regiões com diferentes características climáticas do país, evidencia o descompromisso dos projetos com estratégias passivas (Figuras 2-142 e 2-143).

Figura 2-142: *Trend City Center*, Porto Alegre (2015).

Fonte: Vettorazzi (2018).

Figura 2-143: PMCMV em Uberlândia-MG: mesma geometria com diferentes orientações.

Fonte: Quapá - FAUUSP (2013).

As primeiras décadas do século XXI também estão sendo marcadas pelo aumento de fornecimento e da diversificação da produção de energia brasileira. Em 2007, o petróleo do pré-sal foi descoberto e, em 2011, teve início a construção da segunda maior usina hidrelétrica do país, a Usina Hidrelétrica do Belo Monte, no Pará. Em 2006, foi inaugurado o segundo maior centro de geração de energia eólica no Brasil, em Osório-RS, e, em 2012, o maior parque gerador de energia eólica da América Latina, o Complexo Eólico Alto Sertão I, Bahia. Em 2017, entra em funcionamento a usina fotovoltaica de Nova Olinda no Piauí, o maior parque solar da América Latina (2018).

externas, sobrepiso e subteto internos duplos, que privilegia a ventilação e o resfriamento, sem descuidar dos curtos períodos de frio relativo.

2.4 SÍNTESE DA ARQUITETURA PASSIVA NO BRASIL

Esse item tem por objetivo realizar uma breve síntese sobre o conteúdo abordado anteriormente relativo a contextualização histórica da arquitetura e a eficiência energética, mais especificamente a arquitetura passiva, no contexto brasileiro.

A arquitetura brasileira possui exemplos notáveis de adaptação ao clima, tanto no período pré-histórico, como após a chegada dos portugueses. Ao chegar ao Brasil, os portugueses[135] utilizaram os conhecimentos construtivos indígenas como forma de adaptação ao clima e pela necessidade de sobrevivência. Posteriormente, a arquitetura portuguesa realizada em solo brasileiro manifestou influência de outras culturas, como a de origem árabe, utilizando elementos de proteção contra os intensos raios solares como: gelosias, muxarabis, rótulas, varandas, amplos beirais entre muitos outros. No século XIX, a vinda da Família Real portuguesa trouxe junto à reprodução das tendências da arquitetura europeia, com maior uso de industrialização e menor vínculo com as peculiaridades climáticas do país, abandonando importantes elementos passivos como o muxarabi e os amplos beirais.

No século XX, as soluções arquitetônicas adotadas pela arquitetura moderna brasileira se destacam no cenário internacional, principalmente, pela criatividade do emprego de elementos de controle solar que faziam com que a arquitetura tivesse caráter intimamente vinculado ao lugar. Entretanto, principalmente a partir década de 1960, muitos arquitetos brasileiros tomam outro rumo apoiados na utilização do vidro e na ampla climatização artificial, despreocupados com as estratégias passivas e com o consumo energético. A partir da crise do petróleo na década de 1970, a questão energética é revalorizada, ganhando maior importância no contexto nacional. São desenvolvidos alguns exemplares de casas passivas experimentais, entre eles as duas casas desenvolvidas pelo Ennio Cruz da Costa (décadas de 1970 e 1980) e, posteriormente, a Casa Eficiente (2006) pela UFSC e a Casa E (2009) pela UFRGS. A partir da década de 1990, são dados os primeiros passos para implementação de laboratórios de conforto ambiental nos cursos de Arquitetura e Urbanismo e também para normatização energética das edificações.

No século XXI, a preocupação com a eficiência energética das edificações aumenta após os apagões de energia e os baixos níveis de água dos reservatórios das hidrelétricas. Ao mesmo tempo, o governo brasileiro busca medidas para diminuir o consumo de energia das edificações, através da consolidação dos laboratórios conforto ambiental nos cursos de Arquitetura e Urbanismo, das normatizações, como

[135]É importante lembrar que a arquitetura brasileira teve, ao longo da história, influências de variadas etnias. Essas influências foram iniciadas pelos índios, depois pelos portugueses e posteriormente, em diferentes períodos e regiões, pelos africanos (desde 1539), alemães (desde 1818), holandeses (desde 1858), italianos (desde 1870), japoneses (desde 1908) entre tantas outras. Em cada cultura arquitetônica trazida ao solo brasileiro é possível identificar soluções criativas peculiares de adaptação da tradição construtiva à realidade climática, tecnológica e de disponibilidade de materiais locais.

a NBR 15220, a ABNT 15575 e também por meio da etiquetagem para avaliação da eficiência energética de edificações.

Durante o século XX, foram realizadas poucas pesquisas aprofundadas sobre edificações passivas para climas quentes, os principais estudos foram realizados para o clima frio da Europa e dos Estados Unidos, e tiveram como objetivo dominante o aquecimento através da radiação solar e o uso do isolamento térmico. Nas últimas duas décadas, o conceito *Passive House*, originalmente concebido para clima frio, vem sendo estudado para sua aplicação em climas quentes. Para os climas brasileiros, há inúmeros exemplos de utilização de elementos passivos na arquitetura; porém, é preciso ampliar os estudos quanto às demandas energéticas e necessidades de conforto atuais da sociedade. Nesse sentido, o conceito *Passive House*, já consolidado e adotado por muitos países de clima frio, surge como uma opção alternativa que pode contribuir com o aumento do conforto e a diminuição do consumo de energia das edificações em países de climas com períodos quentes, como o Brasil.

CAPÍTULO 3. O CONCEITO *PASSIVE HOUSE*

O termo *Passive House* refere-se a um conceito construtivo desenvolvido na Alemanha, em 1988, pelos professores Wolfgang Feist e Bo Adamson, e diz respeito à obtenção de conforto higrotérmico com baixo consumo de energia. Segundo Pacheco (2013), a ideia de Feist e Adamson era a de construir edifícios que praticamente não necessitassem de sistemas ativos de climatização; dessa forma, o aquecimento se daria por meio do calor gerado por cargas internas, ganhos solares por intermédio de janelas e aquecimento do ar de entrada mediante recuperadores de calor. Wassouf (2014) define, resumidamente, o conceito *Passive House* como edificações com consumo energético muito baixo com uso de isolamento térmico muito alto, estanqueidade do ar muito alta e ventilação controlada com recuperação de calor.

Em 1991, o conceito *Passive House* foi aplicado pela primeira vez na construção de uma casa na cidade alemã de Darmstadt, com o objetivo de proporcionar baixo consumo de energia a um custo aceitável para o clima da Alemanha (Figuras 3-1 e 3-2) (IONESCU *et al.*, 2015).

Figura 3-1: *Passive House* de Darmstadt, Alemanha (1991), primeira edificação com conceitos de Wolfgang Feist e Bo Adamson: Fachada Sul (HN).

Fachada Sul (HN)

Figura 3-2: *Passive House* de Darmstadt, Alemanha (1991), primeira edificação com conceitos de Wolfgang Feist e Bo Adamson: Fachada Norte (HN).

Fachada Norte (HN)

Fonte: Feist (2006).

Em 1995, Feist desenvolveu o conceito *Passive House* tendo como base a experiência de construção e de operação da primeira casa construída em Darmstadt. O Instituto *Passive House* foi, assim, fundado em 1996, quando começou a promover um padrão de construção com requisitos claros, definidos basicamente por cinco estratégias:

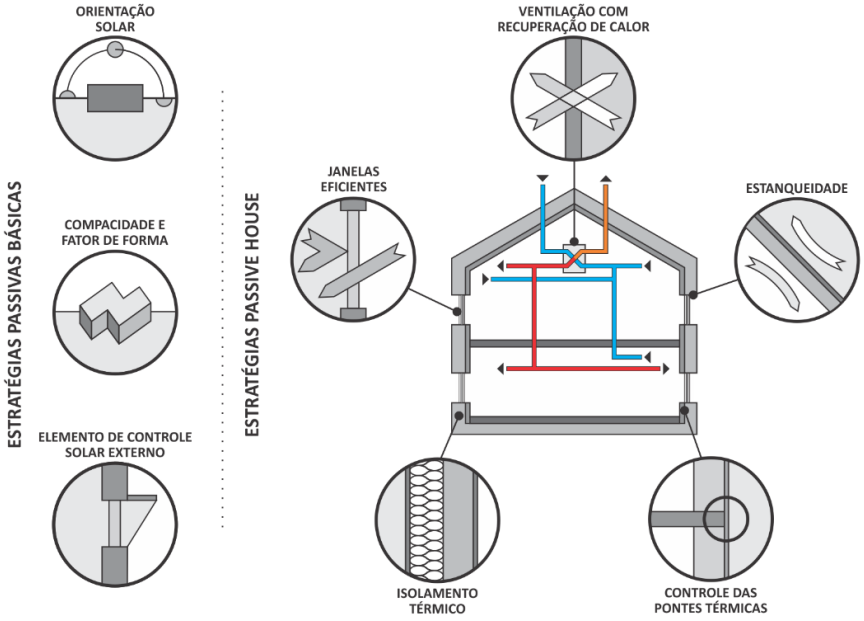
- isolamento térmico do fechamento;
- ventilação mecânica com recuperador de calor;
- correção e minimização de pontes térmicas dos fechamentos e da estrutura;
- janelas eficientes;
- bom nível de estanqueidade.

Segundo Wassouf (2014), além desses critérios, é necessário lembrar-se de algumas estratégias passivas básicas adotadas pela arquitetura residencial ao longo da história e que são indispensáveis ao bom desempenho das estratégias *Passive House,* dentre as quais é destacado as seguintes:

- orientação solar com edificação disposta predominante no eixo leste/oeste;
- cuidados com o fator de forma e compacidade;
- utilização de elementos de controle solar externos.

A Figura 3-3 ilustra tanto as estratégias passivas básicas quanto as estratégias *Passive House*.

Figura 3-3: Estratégias passivas básicas e estratégias *Passive House*.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

As estratégias utilizadas pela *Passive House* não consistem em uma novidade, mas sim em um acúmulo de conhecimentos e na interação entre as suas diferentes estratégias[1], que, até então, não haviam sido pensadas como um todo. Ao percorrer a história das edificações passivas, é possível notar que esse conceito é resultado do somatório de estudos anteriores, os quais tiveram início na década de 1930, com as edificações solares, e culminaram no superisolamento[2] desenvolvido na primeira metade da década de 1970. Analogamente, segundo Kwok e Grondzik (2013), a *Passive House* foi desenvolvida na Alemanha como uma extensão do movimento de "superisolamento" da década de 1970. Segundo

[1] Como exemplo, pode-se citar o seguinte caso: uma edificação com isolamento térmico adequado para a região climática, mas sem controle das pontes térmicas ou da estanqueidade, provavelmente não terá um bom desempenho termoenergético, pois embora o isolamento seja adequado, haverá perdas e ganhos de calor pelas pontes térmicas e pela falta de estanqueidade. Provavelmente, nesse caso, as perdas de calor terão que ser compensadas com maior uso de sistemas mecânicos de condicionamento térmico, garantindo o conforto interno, porém, com maior consumo energético. Todas as estratégias *Passive House* devem ser pensadas em conjunto e não de forma isolada.

[2] Termo criado em 1974 pelo professor Wayne Shick da Universidade de Illinois para designar um conjunto de estratégias utilizadas para obter edificações com baixo consumo energético e conforto higrotérmico. O nome superisolamento foi utilizado para designar o isolamento térmico das edificações acima dos padrões da época. A base do superisolamento é priorizar o isolamento da envoltória da edificação com o uso de materiais com baixa condutividade térmica para evitar as perdas de calor para o meio externo.

esses autores, com a aplicação do conceito, é possível atingir uma redução de 70 a 80% no consumo de energia de calefação e uma redução de 50 a 70% de energia total consumida. O conceito *Passive House* é o mais conhecido internacionalmente e pode ser considerado como a base para a construção de edificações com consumo de energia quase nulo, o que é exigido pela União Europeia para o final da década de 2010 (WASSOUF, 2014).

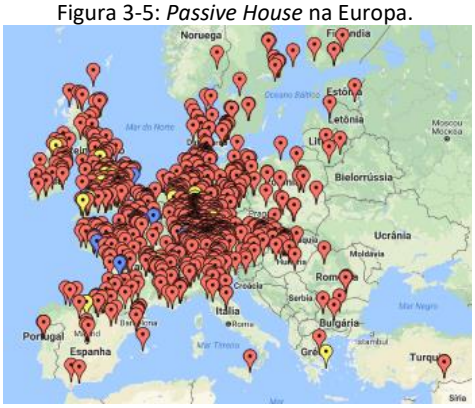
Ao fazer a comparação de custos entre edifícios *Passive House* e edifícios concebidos e construídos segundo métodos convencionais, o Projeto *Passive-On* (2007) verificou uma despesa adicional no valor da construção entre 3 e 10% para países como Portugal, Espanha, Itália, Reino Unido e França (PASSIVE-ON, 2007). Esses valores acrescidos à construção da edificação são viáveis devido ao curto prazo de retorno do investimento com a economia decorrente da diminuição do consumo energético. Devido às diferenças das tecnologias construtivas de cada país e também ao clima, o período de retorno de investimento muda, sendo que, por exemplo, Portugal tem um período de retorno do investimento de 12 anos e a Espanha de 4 a 5 anos. As economias energéticas totais medidas para essas mesmas construções, por sua vez, estão na ordem dos 50 e 90% (PASSIVE-ON, 2007). No Brasil, o estudo desenvolvido por Dalbem *et al.* (2019), para a aplicação do conceito *Passive House* em habitações de interesse social nas Zonas Bioclimáticas brasileiras ZB1, ZB2 e ZB3, demonstrou que o custo de implementação foi entre 39 e 42% superior a uma edificação convencional.

Estima-se que existam cerca de cem mil edificações com aplicação do conceito da *Passive House* por todo o mundo (Figura 3-4) (MARCELINO; GAVIÃO, 2019), sendo a maior incidência na Europa, nas regiões central e ao norte (Figura 3-5) (PHI, 2018). Em alguns países desse continente será assumido o conceito *Passive House* como regulamentação nacional, como é o caso da Dinamarca e da Áustria. Na América Latina, nomeadamente no México e no Chile, alguns autores fazem as primeiras incursões sobre este conceito, entre eles Wassouf (2014).

Figura 3-4: *Passive House* no mundo.

Fonte: PHI (2019b).

Figura 3-5: *Passive House* na Europa.



Fonte: PHI (2019b).

Depois de estabelecido o conceito *Passive House,* foram criadas novas categorias baseadas, principalmente, no controle da demanda de energia primária e na geração de energia renovável. Assim, atualmente, as edificações *Passive House* foram classificadas em diferentes grupos: *classic*, *plus* ou *premium* (Figura 3-6). A *Passive House Classic* é a tradicional, com baixo consumo energético, mas sem geração de energia. Em uma *Passive House Plus,* gera-se energia a partir de fontes renováveis (como a fotovoltaica ou eólica) que equivalem à energia consumida. Em uma *Passive House Premium,* por fim, a energia produzida a partir de fontes renováveis é superior à energia consumida (PASSIPEDIA, 2018).

Figura 3-6: Classificação do conceito *Passive Houses: Classic, Plus* e *Premium.*

a. Classic *b. Plus* *c. Premium*

Fonte: adaptado de Passipedia (2018).

Para o conceito *Passive House*, o lugar assume um papel fundamental, principalmente pela influência das condicionantes climáticas sobre o programa e a construção. Em linhas gerais, serão os condicionantes climáticos que irão guiar o projeto quanto ao modo de utilizar as estratégias do conceito. Mesmo que dois projetos possam ter as mesmas características programáticas, visuais e espaciais, no conceito *Passive House* estes, preferencialmente, não terão as mesmas características construtivas em lugares com climas diferentes; afinal, a definição do entorno construído, dos elementos vegetais, da topografia e a própria orientação e dimensão do lote exercem influência nas características do projeto, na definição de sua composição e de seu caráter.

O conceito *Passive House* não restringe o projeto arquitetônico a diferentes usos e tipologias, independentemente do programa e da volumetria do edifício (Figuras 3-7 e 3-8), podendo, assim, ser adequado a diferentes programas para atender usos habitacionais, escolares, administrativos, industriais, hospitalares, entre outros.

Figura 3-7: Estação de Bombeiros em Heidelberg (Alemanha).

Fonte: Fenercom (2011).

Figura 3-8: Edifício educacional, 2012 (Correia do Sul).

Fonte: PHI (2014).

Apesar das vantagens, um desafio que se coloca para essas edificações de baixo consumo energético, como a *Passive House*, é a questão da flexibilidade no uso do edifício: modificações do leiaute interno dos espaços devem manter o equilíbrio de produção e consumo de energia do projeto original. Se as funções e a forma de uso do edifício se modificam, é necessário redesenhar o sistema como um todo, ou, pelo menos, adaptá-lo (BUTERA, 2013).

O conceito *Passive House* descreve um padrão de desempenho termoenergético e não um método de construção específico. Dessa forma, pode ser aplicado com o uso de diferentes materiais e sistemas construtivos como, por exemplo, na construção em concreto armado, vidro, madeira, estrutura metálica e bambu (Figuras 3-9 e 3-10). Assim, o conceito oferece liberdade projetual, porém, apoia-se em estratégias arquitetônicas que exigirão do arquiteto alguns cuidados específicos para cada situação de implantação.

Figura 3-9: PH em estrutura metálica: Edifício residencial, 2006 (Suíça).

Fonte: Wassouf (2014).

Figura 3-10: PH com revestimento de bambu: Edifício Residencial, 2009 (França).

Fonte: Karawitz Architecture (2010).

3.1 O CONCEITO *PASSIVE HOUSE* EM CLIMAS QUENTES

O conceito *Passive House* foi, originalmente, concebido para o clima frio da Europa Central. No entanto, os bons resultados na redução do consumo energético de climatização em edificações nessa região levaram ao estudo de aplicação do conceito em outros climas (PASSIVE-ON, 2007). A publicação, em 2010, da Diretiva 2010/31/EU, que teve como objetivo central garantir que todos os edifícios novos da União Europeia fossem NZEB, reforçou o interesse da aplicabilidade do conceito *Passive House* para toda a Europa. Desse modo, nas últimas décadas, a adaptação do conceito *Passive House* a diferentes climas tem crescido de forma exponencial, sendo já empregado em países do sul da Europa, tais como: Espanha, França, Inglaterra, Itália, Portugal e Chipre; em zonas subtropicais do mundo, tais como Japão, Coreia do Sul, Nova Zelândia e Xangai (China), e em zonas quentes e secas, como Abu Dhabi (Emirados Árabes Unidos), Las Vegas (EUA), entre outros.

Entre 2005 e 2007, o Projeto *Passive-On*, patrocinado pela União Europeia e coordenado pelo grupo de pesquisa de eficiência em usos finais de energia da Universidade Politécnica de Milão, apresentou propostas de adaptação do conceito *Passive House* ao sul da Europa e a países com clima temperado. Foram objeto de estudo Espanha, França, Reino Unido, Itália e Portugal, sendo que França e Inglaterra foram estudadas como exemplo de países em processo de aquecimento, sofrendo os efeitos da mudança climática (PACHECO, 2013). Os próximos parágrafos apresentam os resultados relativos ao consumo de energia das edificações estudadas pelo Projeto *Passive-On* (2007).

A edificação estudada no Reino Unido com as estratégias *Passive House* teve um consumo total de energia para condicionamento térmico de 13,8 kWh/m^2.a, enquanto que uma edificação típica nessa região tem um consumo de 55 kWh/m^2.a. Na Espanha, estudou-se uma edificação na cidade de Sevilha e outra na cidade de Granada, sendo que o consumo energético total para condicionamento térmico para a edificação de Granada foi de 16,6 kWh/m^2.a (8,7 kWh/m^2.a para aquecimento e 7,9 kWh/m^2.a para refrigeração), havendo uma redução de 76% em comparação com uma edificação típica. Para a cidade de Sevilha, o consumo energético total para condicionamento térmico foi de 24,5 kWh/m^2.a (2,8 kWh/m^2.a para aquecimento e 21,7 kWh/ m^2.a para refrigeração), não atingindo, portanto, os critérios *Passive House*, apesar de ser observada uma redução de 57% do consumo energético.

Em Portugal, a edificação estudada fica localizada em Lisboa; essa edificação teve um consumo energético total de condicionamento térmico de 20,6 kWh/m^2.a (16,9 kWh/m^2.a para aquecimento e 3,7 kWh/m^2.a para refrigeração). Na Itália, os estudos foram realizados nas cidades de Milão, Roma e Palermo. Em Milão, o consumo energético total para condicionamento térmico da edificação foi de 13,6 kWh/ m^2.a (10,4 kWh/m^2.a para aquecimento e 3,2 kWh/m^2.a para refrigeração); em Roma, a edificação teve um consumo total de 12,8 kWh/m^2.a (6,2 kWh/m^2.a para aquecimento e 6,6 kWh/m^2.a

para refrigeração); e, em Palermo, o consumo total da edificação foi de 12 kWh/m^2.a (2,4 e kWh/m^2.a para aquecimento e 9,6 kWh/m^2.a para refrigeração). Conforme os dados indicam, os critérios de *Passive House* foram atingidos nessas cidades.

Na França, as edificações analisadas ficam nas cidades de Carpentras e Nice. A edificação de Carpentras teve um consumo energético somente para aquecimento, de 14,8 kWh/m^2.a; já em Nice, o consumo total é de 23,7 kWh/m^2.a (13,1 kWh/m^2.a para aquecimento e 10,6 kWh/m^2.a para refrigeração). A Tabela 3-1 apresenta um resumo dos resultados de consumo energético para condicionamento térmico encontrados pelos Projeto *Passive-on* (2007).

Tabela 3-1: Projeto *Passive-On*: resumo dos resultados do consumo energético.

Local		**Consumo energético para condicionamento térmico (kWh/m².a)**			**Atende aos requisitos PH**
		Aquecimento (CA)	**Refrigeração (CR)**	**Total**	
Espanha	Sevilha	2,8	21,7	24,5	Não
	Granada	8,7	7,9	16,6	Sim
França	Nice	13,1	10,6	23,7	Sim
	Carpentras	14,8	0,0	14,8	Sim
Reino Unido	-	-	-	13,8	Sim
Itália	Milão	10,4	3,2	13,6	Sim
	Roma	6,2	6.6.	12,8	Sim
	Palermo	2,4	9,6	12,0	Sim
Portugal	Lisboa	16,9	3,7	20,6	Sim

Fonte: Passive-on (2007).

Um estudo da aplicação do conceito *Passive House* em Zonas Bioclimáticas relevantes do mundo, representadas por Ecaterimburgo (Rússia), Tóquio (Japão), Xangai (China), Las Vegas (EUA), Abu Dhabi (Emirados Árabes Unidos) e Singapura, foi realizado, em 2015, pelos pesquisadores Schnieders, Feist e Rongen (2015). Comparando edificações convencionais com edificações com a aplicação do conceito *Passive House* com a mesma geometria, a redução do consumo anual de energia para o condicionamento foi entre 75 e 95%. Os autores afirmam que o conceito *Passive House* pode ser aplicado em qualquer lugar do mundo, sem comprometer a qualidade arquitetônica.

Em 2016, destacam-se dois estudos relevantes, sendo o primeiro realizado por Fokaides *et al.* (2016), o qual monitorou o desempenho da primeira *Passive House* no Chipre, país com clima subtropical do sudeste europeu. Inicialmente, foram verificados problemas de sobreaquecimento no verão; contudo, ao adotar a estratégia de ventilação natural, as condições de conforto melhoraram. Outro estudo, realizado por Figueiredo *et al.* (2016), teve a finalidade de contribuir com a implementação do conceito *Passive House* em Portugal. Os melhores resultados levaram a uma redução de 62% no consumo de aquecimento, 72% no consumo por refrigeração e de 4,4% na taxa de sobreaquecimento nos modelos em que não foi usado sistema de climatização para refrigeração.

Na América Latina, os estudos mais avançados sobre o uso do conceito *Passive House* são realizados no Chile e no México, países nos quais já são encontradas edificações construídas com base nesse conceito, nos anos de 2011 e 2013 (Figuras 3-11 e 3-12). No Brasil, o interesse sobre o tema vem aumentando a cada ano.

Figura 3-11: *Passive House* em Santiago, Chile: Agência do Banco (BCI) (2010-2011).

Fonte: Wassouf (2014).

Figura 3-12: *Passive House*, Cidade do México, México (2013).

Fonte: *Passive House* Data Base (2018).

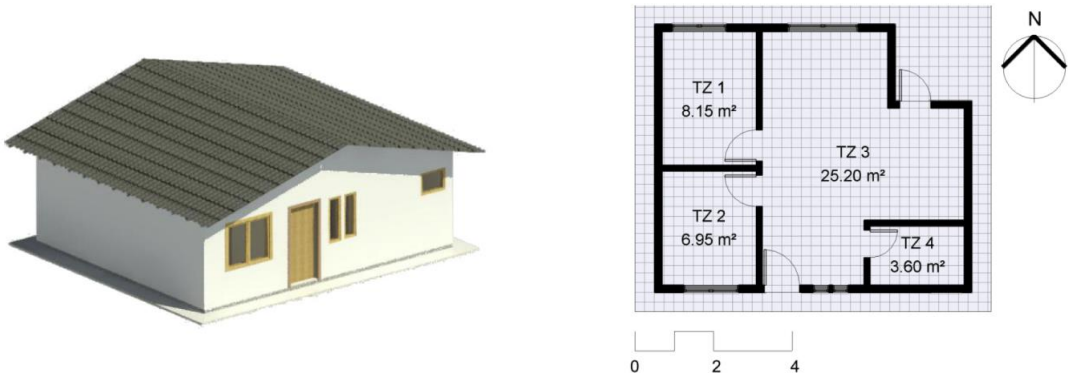
Em 2014, Wassouf, em seu livro "Da Casa Passiva à Norma *Passivhaus* - A Arquitetura Passiva Em Climas Quentes", fez alguns estudos superficiais com simulação estática da aplicação do conceito *Passive House* no Brasil, especificadamente na cidade do Rio de Janeiro. Para a edificação no Rio de Janeiro, os melhores resultados foram alcançados com um isolamento térmico de 4 cm nas paredes, 8 cm na cobertura e sem isolamento na laje do piso. Para diminuir o consumo com condicionamento térmico, foi utilizada ventilação híbrida (exaustão mecânica com entrada de ar natural). No mesmo ano, Tubelo, Rodrigues e Gillott (2014) compararam o regulamento brasileiro, RTQ-R, com o conceito *Passive House*, mediante revisão de literatura, discutindo os benefícios e barreiras para a aplicação do conceito no país. O estudo conclui que são necessárias pesquisas para avaliar os benefícios do conceito *Passive House* no contexto climático brasileiro, principalmente quanto ao aspecto do alto isolamento térmico e à baixa permeabilidade de ar.

Recentemente, o projeto de doutorado "Adaptabilidade do conceito *Passivhaus* para projeto de edificações nas oito zonas bioclimáticas brasileiras – desenvolvimento e avaliação da tecnologia construtiva e da viabilidade econômica" (VETTORAZZI, 2013b) culminou nos primeiros estudos aprofundados da adaptação do conceito *Passive House* ao clima brasileiro, realizados a partir de 2015, em um programa colaborativo entre a Universidade Federal de Pelotas (UFPEL) e a Universidade de Aveiro (UA) de Portugal. Os principais artigos publicados foram: "Discussão do desempenho da envoltória de uma *Passive House* adaptada à zona bioclimática 2 em acordo com o RTQ-R" (DALBEM *et al.* 2017); "*Verification of the Passive House Concept to the South of Brazil Climate*" (DALBEM *et al.*

2016); Aplicabilidade do conceito *Passivhaus* no contexto brasileiro (FREITAS *et al.* 2015) e "Conceito *Passivhaus* aplicado ao clima brasileiro" (DALBEM; FREITAS; CUNHA, 2015). Além desses estudos, há o desenvolvimento de artigos específicos sobre pontes térmicas: "Pontes térmicas em estruturas de concreto armado: análise das condições para formação de fungos filamentosos para zona bioclimática brasileira 2" (FREITAS *et al.* 2017).

Em 2019, foi publicado um estudo sobre a aplicação do conceito *Passive House* em habitações de interesse social nas zonas bioclimática brasileiras ZB1, ZB2 e ZB3, verificando o seu desempenho termoenergético e sua viabilidade econômica (DALBEM *et al.*, 2019) (Figura 3-13). Como conclusão, os autores verificaram que a aplicação do conceito *Passive House* proporcionou uma redução na demanda de energia das edificações, sendo de 88% para a ZB1; 56% para a ZB2; e 62% para a ZB3, com custo de implementação entre 39 e 42% superior em relação às edificações convencionais nas três Zonas Bioclimáticas.

Figura 3-13: Edificação estudada para aplicação do conceito *Passive House*.



Fonte: Dalbem (2019).

Em 2018, foi construída a primeira edificação *Passive House* no Brasil. A edificação, com 80 m², foi inaugurada em 23 de julho de 2018, em Natal-RN, e será utilizada como laboratório e ambiente para cursos (Figuras 3-14 e 3-15). O projeto possui amplos beirais para proteção da radiação solar excessiva e tem sua orientação principal no eixo norte-sul, onde dispõe a maioria das aberturas. A edificação foi construída com um sistema de alvenaria estrutural com isolamento térmico e acústico na superfície interna da parede, além de contar com um sistema de ventilação mecânica com recuperador de calor que controla a umidade. O projeto foi financiado pelo Ministério Federal da Educação e Pesquisa da Alemanha e executado em parceria com o SENAI-RN.

Figura 3-14: *Passive House* de Natal-RN (2018).

Fonte: FIERN (2018).

Figura 3-15: Planta Baixa da *Passive House* de Natal-RN (2018).

Fonte: adaptado de Bezerra (2018).[3]

Com exceção das pesquisas realizadas pela Universidade Federal de Pelotas e da construção da Casa *Passive House,* em Natal-RN, não há estudos aprofundados sobre a aplicação dos conceitos *Passive House* no Brasil. O estudo de adaptação do conceito *Passive House* ao clima brasileiro realizado pela UFPEL (Universidade Federal de Pelotas), em conjunto com a UA (Universidade de Aveiro, Portugal) prioriza, até o momento (2018), habitações de interesse social.

Na adaptação do conceito para edificações sul-brasileiras, os pontos mais discutidos são relativos à necessidade do superisolamento para a nossa realidade climática e à questão relacionada à estanqueidade das aberturas com o uso da ventilação controlada. Por hábitos culturais, os usuários brasileiros utilizam a abertura das janelas para obter ventilação natural, como forma de higienização do ambiente e também para a interação direta do interior da edificação com o exterior. O uso do superisolamento, a estanqueidade das aberturas e a ventilação controlada, além da necessidade de estudo quanto à adaptação termoenergética ao clima sul-brasileiro, podem esbarrar nas restrições financeiras da realidade construtiva local e, sobretudo, na adaptação cultural do usuário. Nesse sentido, é fundamental o estudo das implicações que o projeto com o uso das estratégias *Passive House* pode ter na definição final das edificações.

3.2 ESPECIFICAÇÃO DOS PRINCIPAIS REQUISITOS DAS ESTRATÉGIAS PASSIVAS BÁSICAS E DAS ESTRATÉGIAS DO CONCEITO *PASSIVE HOUSE*

Cada parâmetro do conceito *Passive House* apresenta valores máximos e/ou mínimos que devem ser utilizados para que a edificação atenda às necessidades de conforto e de consumo energético. Entretanto, de acordo com as especificidades de cada clima, esses valores se alteram para se adequar às necessidades termoenergéticas. Para obter a certificação *Passive House* para o clima da Europa

[3] Imagem da palestra "Edifício *Passive House* no Brasil", proferida por Luiz Bezerra, na Casa Passiva Brasil 2018 – II Congresso Internacional e Workshop, em 8 de novembro de 2018.

Central[4], a edificação deve atender aos seguintes requisitos estabelecidos pelo *Passive House Institut* (2016):

a. Aquecimento: não deve exceder 15 kWh/ m^2.a, ou, então, a carga de aquecimento não deve exceder 10 W/m^2;

b. Refrigeração: o consumo de refrigeração não deve ser superior a 15 kWh/ m^2.a, ou a carga de refrigeração não deve exceder 10 W/m^2;

c. Energia primária: a energia total a ser usada para todas as aplicações domésticas (aquecimento, água quente e eletricidade doméstica) não deve exceder 120 KWh/(m^2.a).

d. Estanqueidade: o resultado do teste de pressurização não deve ser superior a 0,6 h^{-1} (renovações de ar por hora);

e. Sobreaquecimento: o conforto térmico deve ser atendido para todas as áreas de permanência durante o inverno, bem como no verão, não ultrapassando 10% das horas do ano a temperatura de 25°C sem uso de refrigeração ativa (*PASSIVE HOUSE INSTITUTE*, 2016).

Para a aplicação do conceito *Passive House* em climas quentes do sul europeu[5], o projeto *Passive-On* (2007) elaborou uma proposta de revisão dos requisitos para certificação, levando em consideração as variações climáticas de cada região (PASSIVE-ON, 2007):

a. Aquecimento: não deve exceder 15 kWh/m^2.a;

b. Refrigeração: não deve exceder 15 kWh/m^2.a;

c. Energia primária: a energia total a ser usada para todas as aplicações domésticas (aquecimento, água quente e eletricidade doméstica) não deve exceder 120 KWh/(m^2.a).

d. Estanqueidade: se a qualidade do ar interior e o elevado nível de conforto térmico forem obtidos por meio de um sistema mecânico de ventilação, os fechamentos externos do edifício devem cumprir o teste de pressurização em não mais do que 0.6h^{-1}. Em localizações com condições de projeto com temperaturas acima de 0°C, o teste de pressurização com um limite de 1,0 h^{-1} é suficiente para atingir o critério de aquecimento;

e. Sobreaquecimento: a temperatura interior não poderá exceder 26°C em um intervalo de tempo superior a 10% das horas do ano (DALBEM *et al.*, 2017).

Os próximos itens tratam das três estratégias passivas básicas e das cinco estratégias *Passive House*: orientação solar; compacidade e fator de forma; elemento de controle solar externo; isolamento

[4] Exemplos de países que adotam esses critérios: Alemanha, Áustria, norte da Itália etc.
[5] Exemplos de países que adotam esses critérios: Espanha, Itália, Portugal e Grécia.

térmico; pontes térmicas; esquadrias eficientes; estanqueidade e ventilação mecânica com recuperador de calor.

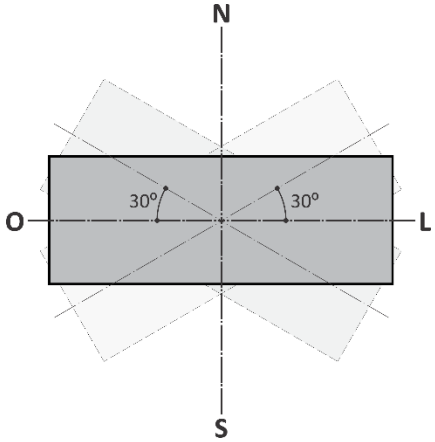
3.2.1 Estratégias Passivas Básicas

- Orientação solar

O primeiro passo para projetar uma *Passive House* consiste em considerar como a orientação de um edifício, e suas várias partes, pode afetar suas perdas e ganhos de energia (LOFTNESS; HAASE, 2013). A orientação solar é um dos fatores mais importantes a ser considerado quanto à eficiência energética das edificações, pois é possível tirar partido da radiação solar no inverno, dispondo as áreas de janelas nas fachadas ao Norte (HS) para permitir o aquecimento da edificação na estação fria. Um edifício com seu comprimento disposto no eixo leste/oeste permitirá expor a maior área superficial do edifício ao norte (HS) durante a estação mais fria. Assim, é possível contribuir para a eficiência energética do edifício, minimizando necessidades de aquecimento e refrigeração no inverno e no verão, respectivamente. A orientação afeta a demanda energética por meio do impacto da radiação solar sobre as vedações externas da edificação.

Desse modo, quando possível, um edifício *Passive House* deve ser orientado ao longo de um eixo principal leste/oeste, com variação não superior a 30 graus do Norte (HS) (Figura 3-16). Isso permite que o edifício tire o máximo proveito de ganhos solares úteis, que são, predominantemente, disponíveis para fachadas voltadas para o Norte (HS) durante os meses de inverno. Um edifício *Passive House* também pode ser construído em um local no qual uma orientação voltada para o norte (HS) não é possível, embora a demanda anual de energia possa aumentar nesse caso entre 30 e 40% (MCLEOD; MEAD; STANDEN, 2011).

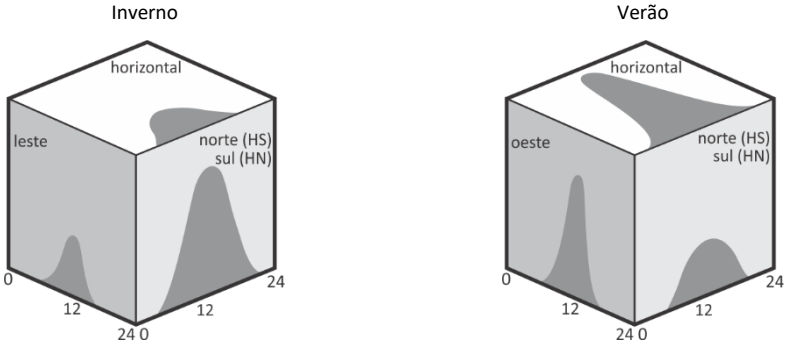
Figura 3-16: Orientação solar *Passive House.*



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

As fachadas leste e oeste de uma edificação recebem menos radiação solar no inverno do que no verão, o que justifica essas fachadas menores. De forma oposta, na fachada Norte (HS) os ganhos solares são maiores no inverno do que no verão (Figura 3-17). Assim, para aproveitar de melhor forma os ganhos de calor nos períodos frios e diminuir os ganhos de calor nos períodos quentes, as fachadas leste e oeste devem ser menores e a fachada norte maior (HS).

Figura 3-17: Impacto da radiação solar em superfícies de um edifício com diferentes orientações.



Fonte: adaptado de Wassouf (2014).

A orientação da edificação reflete no dimensionamento e disposição das aberturas e, também, influencia no programa arquitetônico e na distribuição e organização dos ambientes internos. Um edifício voltado para o norte (HS) costuma ter mais aberturas orientadas nessa direção do que para as demais (WASSOUF, 2014). Nesse sentido, o arquiteto, para atender a essa solicitação de proporção de abertura, deve relacionar a distribuição dos ambientes de acordo não só com as características visuais externas, mas também em relação à trajetória aparente do sol.

Uma edificação bem orientada do ponto de vista termoenergético, portanto, no eixo leste/oeste, deve ter também os seus ambientes internos bem distribuídos em função da orientação solar. Ambientes de permanência prolongada, como dormitórios e sala de estar, têm prioridade para orientação norte (HS) e ambientes transitórios são orientados ao sul, leste ou oeste, servindo também como amortizadores do clima externo. Segundo Loftness e Haase (2013), pode-se melhorar o aproveitamento da radiação solar em uma *Passive House* orientando os dormitórios e salas de estar para o Norte (HS), e espaços de circulação ou de serviço, onde a radiação solar não é necessária, ao Sul (HS). Dessa forma, o programa arquitetônico tem uma relação direta com as características climáticas do lugar.

Além da orientação solar, também devem ser observadas as características do lugar de implantação da edificação relativas ao entorno próximo. Lugares urbanos de altas densidades e com muitas áreas sombreadas são menos sensíveis à questão da orientação solar do que zonas de menor densidade (WASSOUF, 2014). Deve-se observar, ainda, que para além do entorno construído, é necessário considerar também a influência que o relevo e a vegetação exercem no sombreamento da edificação.

A orientação solar também tem consequências na questão construtiva e tecnológica da edificação. Os materiais da envoltória, os fechamentos opacos e transparentes, devem apresentar características térmicas e dimensionais condizentes com a radiação solar recebida em cada orientação, a fim de otimizar a relação de ganhos e perdas com a eficiência energética.

- Compacidade e Fator de forma

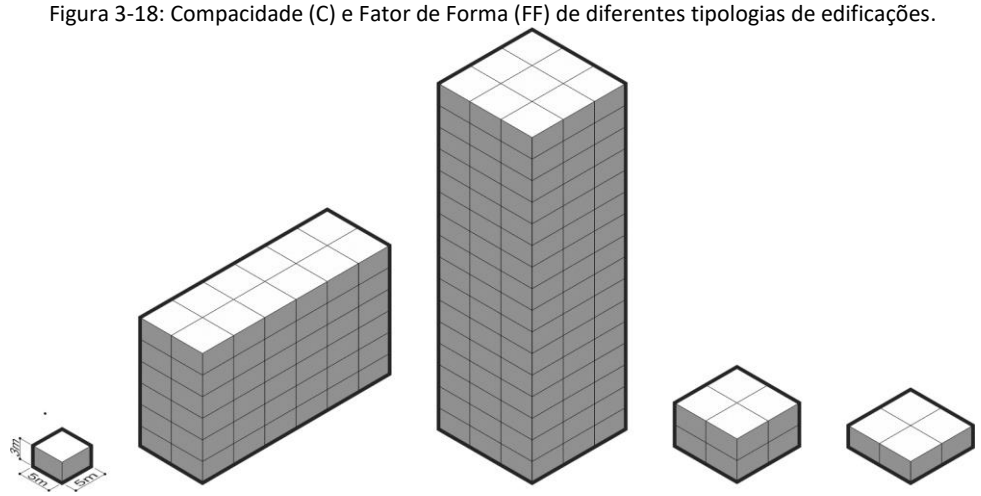
A compacidade[6] de um edifício é o quociente entre a área da envoltória e o volume que esta encerra (Ae/V) (MCLEOD; MEAD; STANDEN, 2011; WASSOUF, 2014). Essa relação tem influência considerável na demanda total de energia. Edifícios com as mesmas características de materiais e orientação solar podem ter demandas de energia significativamente diferentes, simplesmente como resultado de sua relação de compacidade (MCLEOD; MEAD; STANDEN, 2011).

As edificações de grande porte, como hospitais e edifícios comerciais, tendem a ser mais compactas (0,2 a 0,5/m) do que edificações residenciais unifamiliares (0,3 a 0,6/m). Uma residência unifamiliar isolada consegue uma compacidade muito baixa (0,6 a 1/m) (WASSOF, 2014). Para uma *Passive House*, considera-se como razão de compactação favorável a relação de valores menores ou iguais a 0,7/m. Em alguns países europeus, para diminuir a necessidade de isolamento de edificações residenciais de pequeno porte livres em lotes, é exigido uma compacidade menor para atender à demanda de aquecimento de uma *Passive House* (MCLEOD; MEAD; STANDEN, 2011). No entanto, em climas com estações quentes e com muita radiação solar, um edifício menos compacto pode gerar, com determinada configuração, mais sombra própria, podendo reduzir a demanda energética no verão. Nesse caso, a compacidade é questionável. Em climas moderadamente frios, as edificações mais compactas possuem menores demandas energéticas, uma vez que têm menor superfície de contato com o exterior, apresentando, portanto, perdas térmicas menores (WASSOUF, 2014).

Além da compacidade, é importante analisar o fator de forma da edificação. O fator de forma[6] descreve a relação entre a área da envoltória e a área útil interna (Ae/Au). Fator de forma menor ou igual a 3 é um referencial para projetar pequenas edificações *Passive House* (MCLEOD; MEAD; STANDEN, 2011). A Figura 3-18 exemplifica diferentes tipologias de edificações com suas correspondentes compacidades e fatores de forma.

[6] O Manual para aplicação do RTQ-C chama essa relação de Fator de Forma (INMETRO, 2013a). Nesta tese, são utilizadas as definições de Fator de Forma e Compacidade adotados por Mcleod, Mead e Standen (2011), que relacionam esses conceitos com as edificações *Passive House*.

Figura 3-18: Compacidade (C) e Fator de Forma (FF) de diferentes tipologias de edificações.

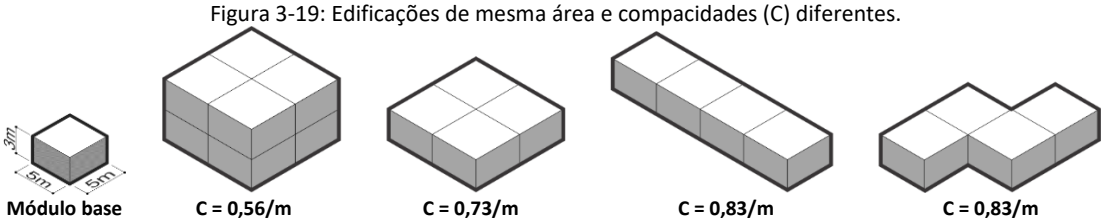


Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Mcleod, Mead e Standen (2011) comentam que o projeto de formas complexas resulta em uma maior área de superfície pela mesma área útil. Essa relação entre área de superfície e área útil afeta as condições de isolamento, uma vez que uma maior área construída trocando calor com o meio externo exige uma energia também maior para equilibrar a temperatura interna.

A relação de compacidade com o lugar influencia no desenvolvimento da relação espacial do programa da edificação. Em um edifício muito compacto, há menor contato de superfícies do perímetro da edificação com o entorno, diminuindo assim a possibilidade de comunicação dos espaços internos e, consequentemente, do próprio usuário com o ambiente externo, com a radiação solar, com a luz natural, e com os demais elementos do entorno. Por outro lado, um edifício com menor compacidade potencializa a possibilidade de integração entre os ambientes interno e externo. A compacidade está, portanto, relacionada com a maneira com que os espaços internos são organizados entre si e relacionados com o ambiente exterior (Figura 3-19).

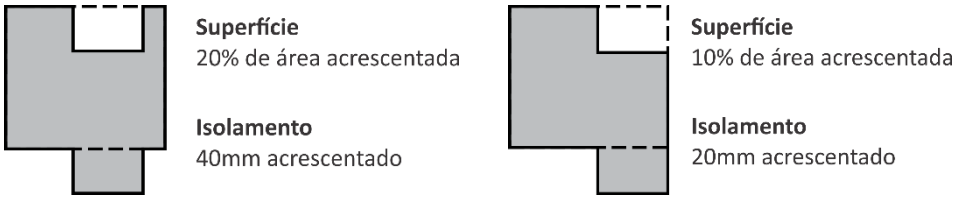
Figura 3-19: Edificações de mesma área e compacidades (C) diferentes.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A compacidade e o fator de forma são determinantes na definição dos materiais construtivos. Quanto mais irregular for a forma e menor a compacidade, maiores serão as possíveis pontes térmicas e, provavelmente, maior terá que ser o isolamento térmico (Figura 3-20) (MCLEOD; MEAD; STANDEN, 2011). As formas irregulares também aumentam o fator de sombreamento que irá impactar no balanço energético anual.

Figura 3-20: Relação entre forma irregular e isolamento térmico.



Fonte: adaptado de Mcleod, Mead e Standen (2011).

Também é necessário levar em consideração os efeitos construtivos, da tecnologia, sobre a compacidade e sobre o fator de forma. Há muitas edificações *Passive House* pouco compactas em razão da aplicação de medidas compensatórias, como a redução do tamanho das aberturas e a instalação de uma maior quantidade de isolamento térmico nas vedações externas do edifício (WASSOUF, 2014). Isso possibilita que a questão compositiva e programática não seja limitada; entretanto, é necessário ter a consciência de que toda decisão projetual está relacionada também à questão da viabilidade financeira da construção.

- Elemento de controle solar externos

Os elementos de controle solar externos são fundamentais em uma arquitetura passiva, para o controle da radiação solar direta nos períodos indesejados, tanto nos fechamentos transparentes como nos opacos. Entre os elementos de controle solar externos mais usuais estão, além dos brises e cobogós, os beirais, as marquises, os toldos, a vegetação, entre outros. Elementos de controle solar têm função importante na relação programática da arquitetura através da possibilidade de exposição seletiva da radiação solar aos ambientes internos. Dessa forma, a orientação e a disposição dos ambientes internos em relação ao exterior podem ser repensadas por meio de alternativas que minimizem os impactos da radiação solar na edificação. Esses itens funcionam como amenizadores climáticos do lugar, filtrando a radiação solar indesejada e tornando os ambientes mais qualificados para as atividades humanas em todos os períodos do ano, modificando sua relação com o ambiente externo, e abrindo novas possibilidade de usos internos do espaço.

O excesso de área envidraçada em uma edificação pode levar a um risco de superaquecimento do ambiente interno no verão. Portanto, um bom sombreamento sazonal é importante para o projeto

Passive House. Para as latitudes da Região Sul-Brasileira, deve-se dar atenção especial para o sombreamento no verão, particularmente nas fachadas norte, oeste e leste. Para o máximo desempenho, a especificação de áreas envidraçadas deve ser ajustada a cada fachada em conjunto com elementos de controle solar externos (MCLEOD; MEAD; STANDEN, 2011).

O beiral do telhado com o comprimento adequado também pode, efetivamente, sombrear as janelas viradas para o Norte (HS) quando a radiação solar é mais alta no verão, e, ainda, permitir o máximo ganho de calor solar no inverno, estação em que a radiação solar é mais baixa. Árvores de folha caduca ou trepadeiras também podem bloquear a radiação solar no verão e admiti-la no inverno (LOFTNESS; HAASE, 2013).

No caso da Região Sul do Brasil, em que o clima apresenta períodos frios e quentes, é necessário controlar seletivamente a radiação solar por meio de elementos como os brises (CUNHA, 2011).

Segundo Cunha (2011), os elementos de controle solar externos, no caso específico os brises, estão diretamente associados aos diferentes programas da edificação. Por exemplo, em edificações residenciais, a radiação solar, em período frio, é desejável no espaço interior, o que pode não ocorrer em tipologias escolares, uma vez que a radiação solar direta pode provocar ofuscamentos e desconforto visual.

Para cada lugar, dependendo das configurações climáticas, latitude, topografia, presença de elementos vegetais e construídos, o brise assume, ou deveria assumir, características próprias quanto ao seu dimensionamento, geometria e proporções, que possibilitam grande variedade de organização formal e que conferem à edificação um caráter intimamente vinculado ao clima do lugar. Juntamente com as possibilidades formais do brise, há uma diversidade de materiais que podem ser empregados em sua composição, os quais possibilitam uma liberdade projetual para a definição do caráter desejado pelo arquiteto.

Como cada orientação possui características diferentes quanto à incidência de radiação solar, o dimensionamento do brise deve obedecer a esse fator para ser projetado de acordo com as necessidades de cada fachada.

Além da relação direta que os elementos de controle solar têm com o lugar, muitas vezes também apresentam uma forte conexão com o material de construção e com a própria estrutura da edificação, possuindo um peso considerável na composição do edifício, valorizando a dimensão tecnológica. O brise reforça o caráter da edificação, de tal modo que a definição do material que o compõe e sua forma final são resultados de diretrizes estruturais iniciais do projeto de arquitetura. Em muitos projetos emblemáticos, nos quais o programa remete à tecnologia, como aeroportos e edifícios

industriais e administrativos, o reforço do caráter tecnológico das edificações é marcado, também, pela valorização dos sistemas de controle solar (CUNHA, 2011).

Elementos de controle solar, como o brise, têm papel importante na arquitetura, reforçando o caráter de integração da edificação com o lugar no qual se insere. No início do século XX, com o desenvolvimento do cobogó e a sistematização dos brises, a arquitetura aliou o domínio das novas tecnologias construtivas ao emprego de elementos convencionais com um novo significado, promovendo, assim, uma associação que apontava, ao mesmo tempo, para o passado e para o futuro.

3.2.2 Estratégias do conceito Passive House

- Isolamento térmico

A envoltória externa do edifício é essencial para manter o conforto interno da edificação e reduzir a necessidade de uso de meios mecânicos para regular a temperatura e a umidade. É o principal intermediador do meio externo, o moderador das variações climáticas externas no interior.

Nas edificações com conceito *Passive House*, a envoltória externa é tratada por meio do isolamento dos fechamentos e pelo cuidado com as pontes térmicas e infiltrações de ar. O superisolamento utilizado pelos edifícios *Passive House* evita que haja perdas de calor em seu interior, isso, consequentemente, evita consumos energéticos excessivos para o seu aquecimento (FENERCOM, 2011). Dependendo do clima externo, os edifícios *Passive House* terão maior ou menor isolamento térmico. Para climas quentes, o isolamento também tem grande importância na redução dos ganhos térmicos por intermédio da radiação solar.

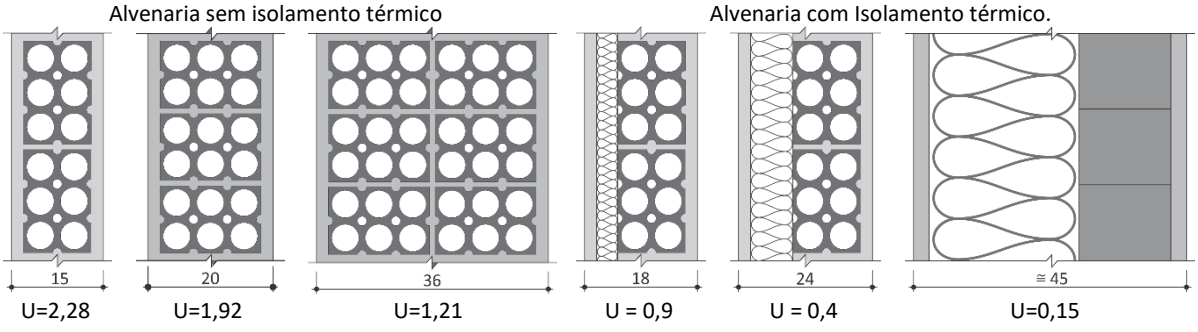
O nível adequado de isolamento térmico garante o baixo consumo energético para aquecimento ou refrigeração do ar. Caso os edifícios sejam pouco isolados termicamente, para as condições climáticas do ambiente, serão registradas temperaturas internas abaixo da zona de conforto; pelo contrário, se o isolamento térmico for muito elevado, ou seja, superior ao necessário para as condições climáticas vigentes na implantação do edifício, as temperaturas internas subirão acima da zona de conforto (PACHECO, 2013). No inverno, as paredes da envoltória exterior reduzem as perdas de calor para o exterior, auxiliando que a temperatura interior se mantenha por mais tempo elevada e, consequentemente, reduzindo as necessidades de aquecimento. No verão, por sua vez, a estrutura envoltória evita que haja transferência de calor do exterior para o interior. É importante destacar que durante os períodos quentes, no verão, o alto isolamento térmico é uma proteção essencial contra o calor, mas para assegurar um elevado conforto térmico ao longo desse período, sombreamento e

ventilação suficientes também são essenciais. Em climas quentes, sempre se aconselha a colocar o isolamento exterior e a ter uma boa inércia térmica no interior (FENERCOM, 2011).

No conceito *Passive House*, todos os componentes de fechamento exterior opaco da construção da edificação (paredes externas, laje do piso e cobertura) devem ser muito bem isolados. Para climas mais frios, é recomendado um coeficiente de transmissão térmica (valor U) de 0,15 W/(m²K), no máximo (MCLEOD; MEAD; STANDEN, 2011). Em climas mais amenos, a transmitância térmica dos fechamentos opacos pode ser próxima a 0,30 W/(m²K) (PASSIVE-ON, 2007). Em clima quente, a transmitância pode variar de 0,15 a 0,45 W/m²K, e, em função da maior incidência solar, as coberturas devem ter maior isolamento térmico do que as paredes (WASSOUF, 2014).

Note-se que o isolamento térmico varia de acordo com as características climáticas do lugar, exigindo a análise das propriedades térmicas específicas de cada elemento construtivo, assim como da espessura mais apropriada dos fechamentos. Uma parede habitualmente utilizada no Brasil, de 15 cm, composta por tijolos vazados e revestimento de argamassa, tem uma transmitância de 2,28 W/(m²K) enquanto que uma parede de 20 cm, com o mesmo material, terá 1,92 W/(m²K) e outra com 36 cm terá 1,21 W/(m²K). Assim, adicionando-se materiais com baixa condutividade térmica, é possível diminuir a espessura dos fechamentos e, também, a sua transmitância. Conforme é demonstrado abaixo (Figura 3-21), a transmitância térmica do fechamento depende das características de condutividade de cada material componente e de sua espessura.

Figura 3-21: Relação do isolamento térmico e espessuras de diferentes composições construtivas.



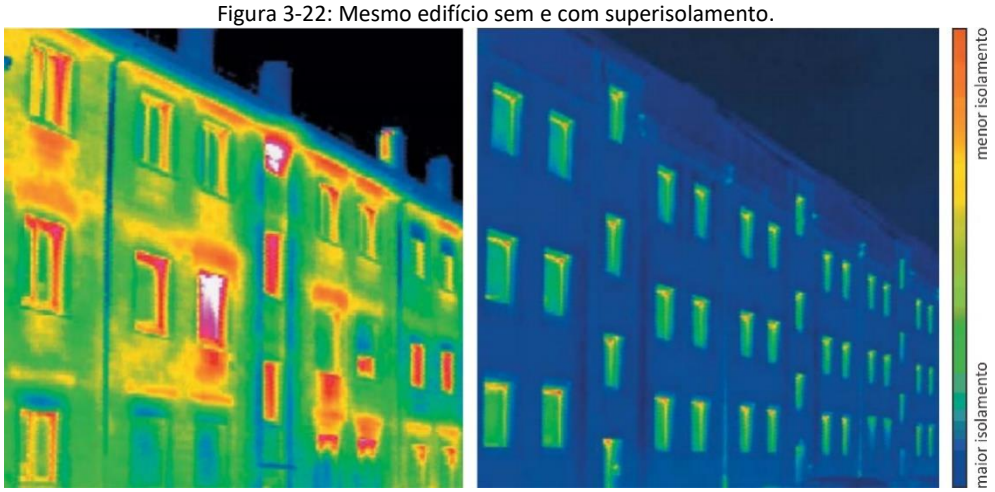
*U = transmitância (W/m²K).

Fonte: elaborado pelo autor, com base em ABNT (2005), Mcleod, Mead e Standen (2011) e PROJETEEE (2019).

O edifício da Figura 3-22 apresenta a termografia[7] de um edifício reabilitado antes e depois da aplicação do conceito *Passive House*. É possível ver com facilidade que com o superisolamento há uma diminuição das perdas de calor pelos fechamentos da edificação.

[7] Técnica de registro gráfico das temperaturas por detecção da radiação infravermelha emitida. Termografia (do grego "*therme*", significando calor; e "*grafia*", escrita).

Figura 3-22: Mesmo edifício sem e com superisolamento.



Fonte: adaptado de Fenercom (2011).

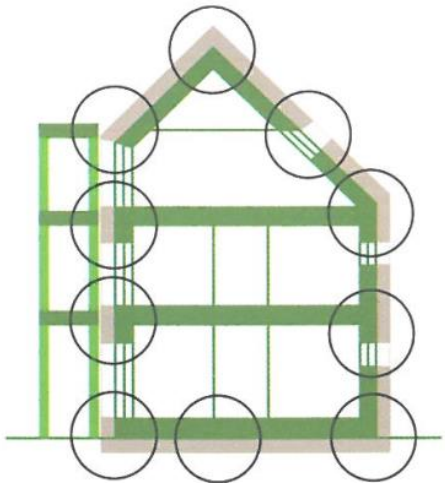
O isolamento térmico não tem influência significativa na questão projetual, mas exibe maiores implicações na questão da constituição construtiva dos elementos de fechamento do que, propriamente, na questão programática da arquitetura. Em relação à questão programática, o isolamento térmico pode exigir, por critérios financeiros, o predomínio de fechamentos opacos sobre os transparentes. A adoção desse critério acaba alterando a relação do espaço interno com o espaço externo, principalmente quanto à permeabilidade e ao diálogo visual.

O isolamento térmico também exerce influência na determinação da geometria da edificação, pois formas mais compactas tendem a ser mais eficientes do ponto de vista energético. Nesse caso, a relação compositiva da edificação com o lugar e, também, a distribuição interna dos ambientes, é pensada em conjunto com a geometria exterior compacta.

- Pontes Térmicas

As pontes térmicas são zonas nos elementos construtivos em que a falta de uniformidade provoca trocas térmicas indesejadas (Figura 3-23). Em média, as pontes térmicas em uma edificação convencional são responsáveis por cerca de 20% do total das perdas de energia (VALÉRIO, 2007), enquanto que em uma *Passive House* esse percentual gira em torno de 4 a 8% apenas.

Figura 3-23: Exemplo de locais com possíveis pontes térmicas em uma edificação.



Fonte: Wassouf (2014).

Há, notadamente, dois tipos de pontes térmicas: pontual e linear. As pontes térmicas lineares são as mais problemáticas e podem ser classificadas em três outras classes: construtivas, quando as vedações mudam de espessura; geométricas, produzidas nas quinas, onde a superfície interna corresponde a uma superfície externa maior; e, por fim, podem ser geradas por mudança de material, quando existe um material pontual ou linear com maior condutividade térmica do que as vedações normais (WASSOUF, 2014).

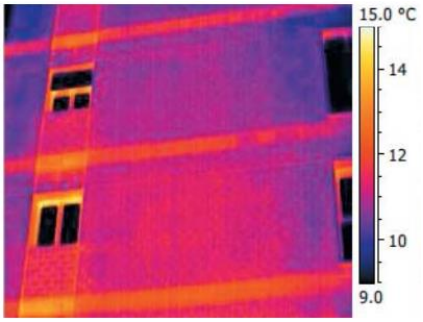
A existência de pontes térmicas na envoltória dos edifícios potencializa um aumento das trocas de calor durante a estação de aquecimento devido a sua menor resistência térmica, podendo originar patologias associadas à diminuição da temperatura superficial (condensações) (FENERCOM, 2011).

As pontes térmicas devem ser evitadas ou reduzidas ao máximo, sendo considerado um valor Psi (Ψ) inferior a 0,01 W/mK, e um meio de diminuir essas pontes em junções geométricas é pelo uso de isolamento externo (MCLEOD; MEAD; STANDEN, 2011). O isolamento deve ser aplicado, continuamente, em toda a envoltória do edifício. Isso reduz, significativamente, as perdas de calor e, também, mantém as temperaturas das superfícies internas iguais à temperatura do ar interior.

As pontes térmicas em climas quentes não têm a mesma relevância que em climas frios. Em locais com temperaturas médias altas, o efeito das pontes térmicas é reduzido e o mesmo ocorre se o gradiente de temperaturas entre o exterior e o interior é pequeno no verão (WASSOUF, 2014).

A Figura 3-24 apresenta várias pontes térmicas no fechamento da edificação, que vão desde as aberturas, a elementos estruturais e englobam até mesmo diferenças de transmissão de calor entre os tijolos e a argamassa de assentamento.

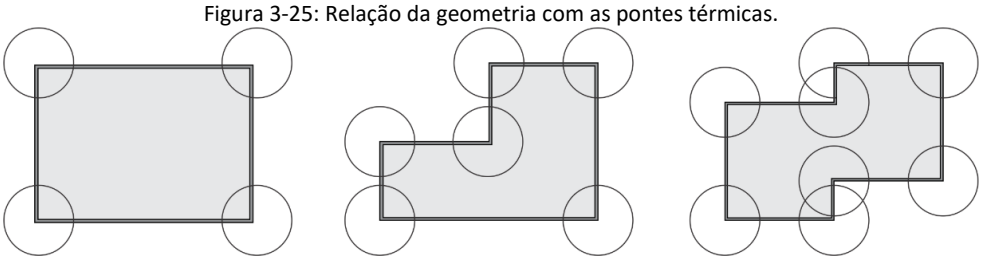
Figura 3-24:Termografia identificando pontes térmicas em uma edificação em Saragoça, Espanha.



Fonte: Fenercom (2011).

Um dos aspectos mais importantes para a minimização das pontes térmicas é a forma do edifício: quanto mais regular e menos arestas o edifício tiver, menor a possibilidade de ocorrência das pontes térmicas, consequentemente, a edificação terá menos perdas de energia (Figura 3-25).

Figura 3-25: Relação da geometria com as pontes térmicas.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A edificação pode ter qualquer forma desde que as pontes térmicas sejam corretamente tratadas, é evidente, porém, que quanto mais irregular for a forma da edificação, mais pontes térmicas necessitarão ser solucionadas e maior o custo da construção. As Figuras 3-26 e 3-27 exemplificam edificações de forma regular e irregular. A possibilidade de haver pontes térmicas é muito menor no primeiro caso (regular) do que no segundo (irregular).

Figura 3-26: Exemplo de forma regular: Edifício de Escritórios, Chile (2011).

Fonte: Monteiro (2012).

Figura 3-27: Exemplo de forma irregular: Edifícios de Apartamentos, Estônia (2006-2012).

Fonte: Duque (2011).

Nesse caso, considerando que o formato da edificação influencia na funcionalidade do projeto arquitetônico, ou pelo menos na maneira pela qual os ambientes se organizam, a adoção de formas mais regulares interferirá no modo com que o arquiteto desenvolve o programa, relacionando a distribuição dos ambientes internos e a relação destes com o exterior, por intermédio de formas mais compactas. Analogamente, um programa mais ou menos compacto interfere nas características compositivas e no caráter final da edificação. As pontes térmicas também têm relação com os aspectos construtivos, pois quanto menos regulares as formas adotadas, maior será a preocupação e a necessidade de uso de materiais específicos que diminuam as pontes térmicas causadas pela irregularidade dessa geometria.

Aliás, conforme mencionado anteriormente, as pontes térmicas em climas quentes não têm a mesma relevância do que em climas frios, ou seja, em climas quentes há maior liberdade projetual quanto à relação de pontes térmicas e à geometria da edificação.

- Esquadrias eficientes

As esquadrias constituem o elemento construtivo termicamente mais frágil das vedações da edificação sendo, por isso, também, o elemento mais estudado. No conceito *Passive House,* as unidades de janela devem ter vidros triplos que devem atingir um valor U de 0,8 W/m²K e 0,85W/m^{2}K quando instalados (MCLEOD; MEAD; STANDEN, 2011). Um benefício dos vidros triplos é que a temperatura da superfície das esquadrias é semelhante às superfícies internas vizinhas. As janelas para clima quente não necessitam ser tão exigentes quanto aquelas utilizadas em clima frio e, no lugar de vidros triplos, pode-se instalar janelas de vidro duplo (WASSOUF, 2014).

A caixilharia desempenha um papel especialmente importante, representando cerca de 30 a 40% da área total da janela. As perdas de calor através de uma caixilharia convencional são entre 1,5 a 2,0 W/(m².K), sendo duas vezes maior do que a zona envidraçada (PASSIVE-ON, 2007).

As esquadrias também devem possuir fator solar[8] maior que 50%, possibilitando o aproveitamento da radiação solar no período de inverno. Em climas mais quentes, a utilização de um vidro duplo com capa de baixa emissividade e a caixilharia com corte térmico são suficientes para cumprir os requisitos mínimos (IPHA, 2014).

Janelas bem isoladas promovem maior conforto térmico e, pelo contrário, as janelas mal isoladas favorecem perdas consideráveis de energia e o consequente aumento das necessidades de aquecimento e refrigeração.

[8] O Fator Solar pode ser definido como o quociente entre a quantidade de energia solar que atravessa a janela e aquela que nela incide. Quanto maior o fator solar, maior é a quantidade de energia que atravessa a janela.

O lugar, nesse caso, o clima aliado ao entorno natural e construído, irá definir quais as características construtivas mais adequadas para a área envidraçada da janela e para a esquadria, principalmente no que se refere às características que conferem maior ou menor ganho e perda de calor interno, como a transmitância térmica e o fator solar. Conforme visto anteriormente, para locais de clima mais frio, a transmitância térmica da janela deverá ser menor do que para locais de clima com temperaturas mais elevadas, logo, deve-se adotar em climas frios vidros duplos ou triplos para diminuir a transmitância e reduzir as perdas de calor interno. Além da questão do tipo de vidro e da esquadria, outro fator construtivo fundamental é a boa instalação da janela nos fechamentos opacos. As janelas devem ser instaladas de forma que não haja pontes térmicas no ponto de encontro da esquadria com a parede. As características térmicas das janelas alteram a materialidade, porém, influenciam pouco, ou até mesmo não influenciam, nas características de visualidade e no caráter final da edificação.

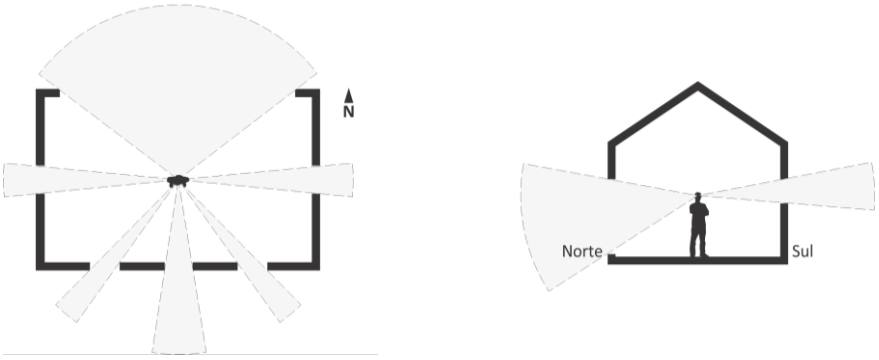
Novamente, o lugar de construção será um fator fundamental para a escolha da proporção de elementos transparentes para cada orientação solar. A orientação da edificação determinará a quantidade, o ângulo e os períodos do ano que cada superfície receberá radiação solar. Assim, cada orientação influi nas características construtivas que devem ser adotadas pela janela (vidro e esquadria) e na alocação de maior ou menor quantidade de elementos transparentes. Um edifício voltado para o Norte (HS) costuma ter, por critérios energéticos, mais aberturas orientadas nessa direção, enquanto que as faces voltadas para o leste e o oeste, preferencialmente deverão conter menor área envidraçada, uma vez que recebem muita radiação no verão e pouca no inverno. A orientação leste e oeste também recebe a radiação solar em um ângulo muito baixo, sendo mais difícil o projeto de elementos de controle solar externos. A orientação solar Sul (HS), apresenta o pior balanço energético, pois recebe pouca radiação solar e apresenta perdas energéticas por transmissão térmica mais elevadas com os elementos opacos. Dessa forma, do ponto de vista energético, uma edificação com essa orientação não necessita de muitas janelas (WASSOUF, 2014). Apenas a distribuição de janelas em um volume dado, por exemplo, colocando-as em outras superfícies ou modificando a área de envidraçamento, já implica em variações térmicas e visuais do microclima interno (RIVERO, 1985).

Cada orientação também determinará as características térmicas da janela; Wassouf (2014) aconselha um fator solar alto na fachada Sul (HS) e baixo no leste e oeste. A fachada leste e oeste é responsável por maiores ganhos de calor no verão do que no inverno; por esse motivo, o baixo fator solar nessas fachadas auxilia na diminuição do ganho de calor interno nas estações mais quentes do ano.

Em relação à questão programática, os cuidados necessários com o dimensionamento para a eficiência energética e a quantidade de abertura por orientação solar alteram a relação entre os ambientes interno e externo, principalmente quanto ao dialogo visual. Desse modo, pensando de forma a evitar

o desperdício de energia e de investimentos financeiros desnecessários para a construção, as visuais mais valorizados serão norte e sul, enquanto leste e oeste, preferencialmente, deveram ter menor área envidraçada ou até mesmo não ter nenhuma (Figura 3-28).

Figura 3-28: Esquema da relação da proporção de aberturas (HS) e integração visual com o exterior.



Planta Corte

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

- Estanqueidade

A estanqueidade dos edifícios é importante pelo fato de que a existência de infiltrações de ar leva também à entrada de água e de umidade pelas mesmas vias. Uma estanqueidade elevada é fundamental em edificações com consumo energético muito baixo. Um edifício muito estanque ao ar, além de permitir uma grande economia energética e proteção acústica (WASSOUF, 2014), tem menos riscos de apresentar condensações produzidas pela convecção quando o ar atravessa as vedações térmicas pelas juntas abertas da edificação.

O vazamento de ar indesejado pode, significativamente, aumentar a exigência de aquecimento do espaço de uma habitação, causando desconforto local devido a correntes de ar. Possivelmente, esse vazamento é capaz também de causar a formação de umidade dentro da estrutura do edifício, o que, eventualmente, reduz o desempenho da edificação e sua vida útil.

A edificação *Passive House* deve ter um resultado de teste de pressão inferior a 0,6 h^{-1} sob pressão de 50 Pa. A estanqueidade pode ser tratada com a aplicação de elementos construtivos que auxiliem na vedação, como a utilização de materiais contínuos ao redor das janelas, portas, penetrações e todas as juntas entre o teto, as paredes e o piso. Para isso, devem ser utilizadas membranas estanques ao ar, compatíveis com cada elemento construtivo, podendo ser de madeira, chapas de alumínio ou membranas de vapor, entre outras opções (MCLEOD; MEAD; STANDEN, 2011). Esses materiais são duráveis, aderentes, de fácil aplicação e, ambientalmente, corretos (LOFTNESS; HAASE, 2013).

Os cuidados em relação à estanqueidade variam de acordo com o clima do lugar. De forma geral, mas não absoluta, a estanqueidade tem mais efeitos no desempenho energético em edificações de climas

frios do que em edificações de climas tropicais (WASSOUF, 2014). Entretanto, o autor lembra que não se pode generalizar as regras, e a estanqueidade pode representar ganhos energéticos importantes em edificações condicionadas, artificialmente, em climas tropicais. A necessidade da estanqueidade das aberturas com o uso da ventilação controlada, sem a possibilidade da abertura das janelas, modifica a relação do usuário com o ambiente externo e pode implicar em uma mudança de hábitos culturais.

- Ventilação mecânica com recuperador de calor (MVHR)

O conceito *Passive House* é especificado com um equipamento de ventilação mecânica com recuperação calor[9] (*Mechanical Ventilation with Heat Recovery*, MVHR). Nesse sistema, um ventilador move o ar fresco do exterior ao interior e outro exaure o ar viciado do interior ao exterior. Os dois fluxos de ar se cruzam sem que haja contato físico entre ambos. O ar é extraído de ambientes úmidos, como cozinhas e banheiros, e o ar fresco é fornecido aos quartos, salas de estar, jantar, etc. (MCLEOD; MEAD; STANDEN, 2011). Em dias de baixas temperaturas, o calor do ar interior é transferido ao ar frio do exterior. Em dias de temperaturas elevadas, se a temperatura do interior é mais fria do que a do exterior, esse frio também é recuperado pelo sistema. Caso contrário, o ar não é aproveitado (WASSOUF, 2014).

O sistema garante a renovação do ar interior, necessária por questões de salubridade do ar interno, para evitar o acúmulo de poluentes internos em concentrações tóxicas (PACHECO, 2013). Esse sistema de ventilação apresenta vantagens quando estão presentes as seguintes condições: clima externo frio ou muito quente; poluição sonora; poluição atmosférica e pessoas alérgicas (pólen, pó) (WASSOUF, 2014). Para edificações residenciais, o fluxo de ar mínimo deve ser entre 20 m^3/h e 30 m^3/h por pessoa no domicílio (PASSIVE HOUSE INSTITUTE, 2016).

Em climas quentes, é possível desligar a ventilação no verão e ventilar o ambiente de maneira natural, desde que seja garantida a eficiência dessa ventilação (WASSOUF, 2014). Em climas quentes e úmidos, pode-se utilizar a recuperação de calor sensível e latente (*Energy Recovery Ventilators*, ERV), que se distingue por trocar não apenas calor, mas também umidade. A redução da umidade do ar de entrada reduz também o calor armazenado no vapor de água (carga térmica latente), o que culmina em uma diminuição do consumo energético em relação à climatização (PACHECO, 2013).

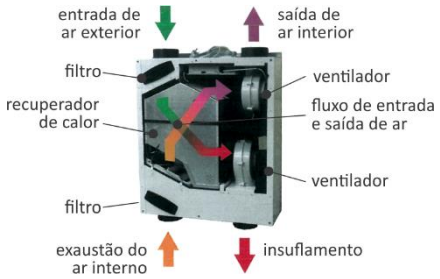
O sistema de ventilação é composto por alguns elementos básicos, dentre os quais destacam-se o recuperador de calor com dois ventiladores e filtros de ar; dutos de entrada do ar fresco; dutos de

[9]Wassouf (2014) comenta que a o sistema também é conhecido como ventilação de “fluxo duplo” e como “ventilação de conforto”.

exaustão do ar viciado e componentes opcionais adicionados, como amortecedores acústicos, entre outros (WASSOUF, 2014).

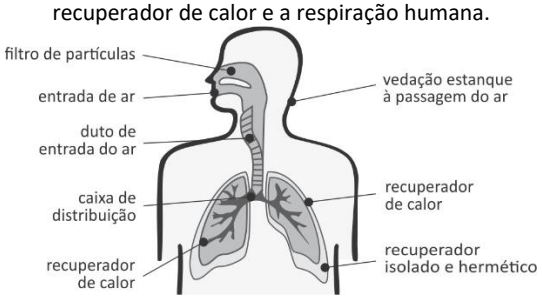
As Figuras 3-29 e 3-30 apresentam, esquematicamente, o funcionamento de um trocador de calor e uma comparação análoga ao sistema respiratório humano.

Figura 3-29: Exemplo de recuperador de calor.



Fonte: adaptado de Wassouf (2014).

Figura 3-30: Analogia entre um sistema de recuperador de calor e a respiração humana.

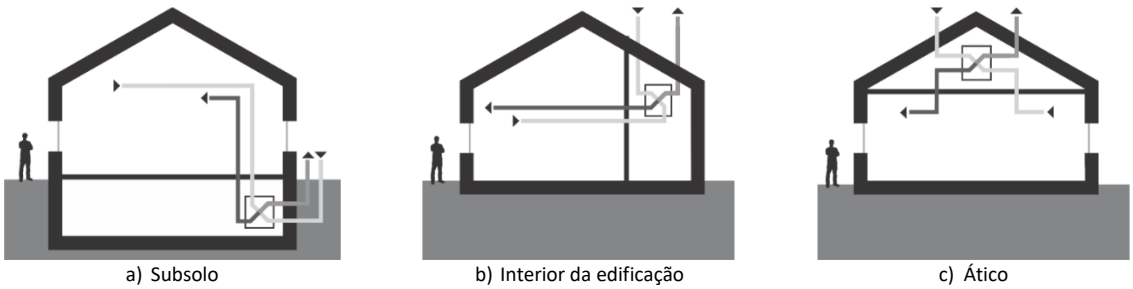


Fonte: redesenhado de Wassouf (2014).

A eficiência de recuperação de calor deve ser maior do que 75% e, idealmente, deve ser especificada por uma unidade certificada pelo *Passive House Institute*. O recuperador de calor não mistura o ar fresco que entra com o ar de exaustão, mas simplesmente troca de calor para reduzir a necessidade de aquecimento.

A presença da ventilação mecânica com recuperador de calor interfere, pelo menos em pequena escala, no programa arquitetônico relacionado à distribuição dos ambientes internos. O recuperador de calor necessita de um espaço físico específico, uma área técnica, com acesso para manutenção que, muitas vezes, tem um ambiente próprio ou pode ser incorporado a algum espaço residual da edificação, de acordo com a área disponível (Figura 3-31). Os dutos de circulação do ar extraído dos ambientes úmidos e insuflados para áreas secas também necessitam de um espaço para sua instalação, porém, na maioria das vezes, são embutidos nos forros e têm pouca interferência no uso da edificação.

Figura 3-31: Exemplo de espaços utilizados para o sistema de ventilação mecânica com recuperador de calor.



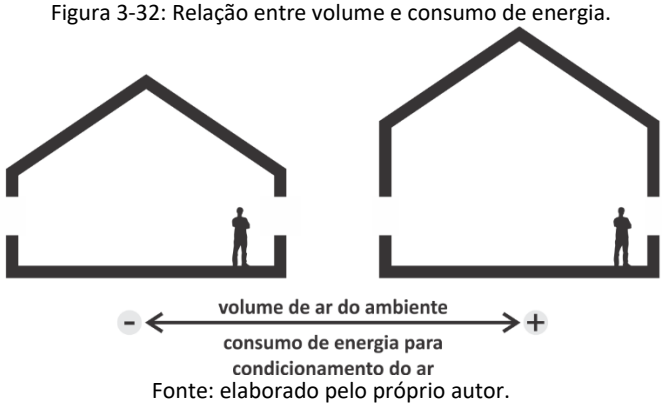
a) Subsolo b) Interior da edificação c) Ático

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Assim como ocorre com um aparelho de ar-condicionado convencional ou um aquecedor elétrico, com o sistema de recuperação de calor, quanto maior o volume de ar do ambiente interno maior será a

energia necessária para manter a temperatura dentro do limite desejado. Dessa forma, considerando a questão da eficiência energética, é necessário pensar no volume de ar interno da edificação, sendo preferível, nessa situação, ambientes com dimensões menores, de tal modo que o uso de pé-direito duplo, por exemplo (Figura 3-32), deve ser criterioso.

Figura 3-32: Relação entre volume e consumo de energia.



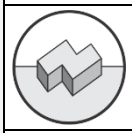
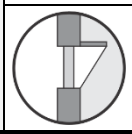
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A questão do uso de ventilação mecânica com recuperação de calor também tem relação com os hábitos culturais do usuário, sendo necessário entender que, em determinados períodos, não é desejável, pela questão energética, proceder à abertura das janelas. Em culturas arquitetônicas da Europa e dos Estados Unidos, acostumadas com sistemas artificiais centrais de condicionamento do ar, é comum o uso das janelas fechadas para manter o calor no interior do ambiente ou para não perder o ar refrigerado em períodos quentes. No caso europeu e estadunidense, o ar é, tradicionalmente, renovado por sistema mecânico, evitando, na teoria, que o ar fique viciado com poluentes, fungos e bactérias. Já na cultura arquitetônica brasileira, há o hábito de abrir as janelas para renovar o ar até mesmo em dias de baixas temperaturas externas. A adoção do sistema de dutos de ventilação com recuperador de calor implica em desenvolver o hábito de abrir as janelas somente quando é benéfico energeticamente. A aplicação desses sistemas representa benefícios na construção *Passive House*, mas isso só é possível se houver a conjugação dos requisitos de isolamento térmico, estanqueidade dos fechamentos opacos, orientação solar e janelas eficientes. Pacheco (2013) comenta que as residências brasileiras buscam abertura e integração com o exterior através de janelas, varandas, sacadas e pátios. Desse modo, a utilização de um sistema com uso de trocador de calor no Brasil implica também em uma mudança de hábitos culturais.

3.3 SÍNTESE DOS REQUISITOS PARA A ARQUITETURA PASSIVA BÁSICA E DO CONCEITO PASSIVE HOUSE

O Quadro 3-1 resume os critérios passivos básicos para os climas frio e quente; o Quadro 3-2 resume os critérios adotados por uma *Passive House* para clima frio e os estudos desenvolvidos para sua adaptação a climas quentes.

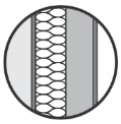
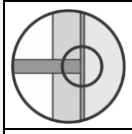
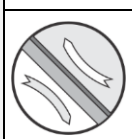
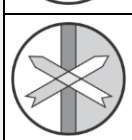
Quadro 3-1: Critérios passivos básicos para clima frio e quente.

Critérios		Clima frio	Estudos para clima quente
		Recomendações	**Recomendações**
Estratégias passivas básicas		Edifício com comprimento no eixo leste/oeste com variação máxima de 30 graus do norte (HS). [1]	Edifício com comprimento no eixo leste/oeste com variação máxima de 30 graus do norte (HS). [1]
		Compacidade ≤ 0,7/m. [1] Fator de forma ≤ 3 para pequenas edificações.	A compacidade é questionável para climas quentes. [1] [2] Fator de forma ≤ 3 para pequenas edificações.
		Horizontal quando a inclinação da radiação solar for alta (norte/sul*), e vertical quando o Sol incidir com ângulos muito baixos (orientação leste e oeste). [2]	Horizontal quando a inclinação da radiação solar for alta (norte/sul*), e vertical quando o Sol incidir com ângulos muito baixos (orientação leste e oeste). [2]

* depende da latitude e do hemisfério no qual a edificação se localiza.

Fonte: [1] Mcleod, Mead e Standen (2011); [2] Wassouf (2014).

Quadro 3-2: Critérios da *Passive House* para clima frio e quente.

Critérios			Clima frio	Estudos para clima quente
			Recomendações	**Recomendações**
Passive House	**Critérios energéticos**	**Critério aquecimento**	15 kWh/(m².a) ou carga de aquecimento máximo de 10 W/m² [4]	15 kWh/(m².a) [3]
		Critério refrigeração	15 kWh/(m².a) ou carga de aquecimento máximo de 10 W/m² [4]	15 kWh/(m².a) [3]
		Critério energia primária	Máximo de 120 kWh/(m².a) [4]	Máximo 120 kWh/(m².a) [3]
	Critérios de conforto	**Temperatura de inverno**	Acima dos 20ºC. [3]	Acima dos 20ºC. [3]
		Temperatura de verão	Não ultrapassar 10% das horas do ano a temperatura de 25ºC sem uso de refrigeração ativa. [4]	Abaixo dos 26ºC. [3]
		Sobreaquecimento	Não ultrapassar 10% das horas do ano a temperatura de 26°C. [4]	Não ultrapassar 10% das horas do ano a temperatura de 26°C. [3]
	Critérios construtivos		U máximo = 0,15 W/(m²K) [1] U usuais no centro europeu = 0,1 a 0,15 W/(m²K) [2]	Transmitância pode variar de 0,15 a 0,45 W/m²K. Em função da maior incidência solar, as coberturas devem ter maior isolamento térmico do que as paredes. [2]
			Psi (Ψ) de ≤ 0,01 W/mK. [1]	As pontes térmicas em climas quentes não têm a mesma relevância do que em climas frios. [2]
			Janelas devem ter vidros triplos. U de 0,8 W/m²K e 0,85W/m²K instalado). [1] Aconselhável Fator Solar de no mínimo 50% e alta proteção solar no verão. [3]	Janelas de vidro duplo de baixa emissão. [2] Aconselhável Fator Solar alto na fachada Sul (HS) e baixo no leste e oeste. [2]
			Teste de pressão de ≤0,6 h^{-1} [2]	≤ 0,6 rph^{-1}. Quando possui condições de projeto com temperaturas acima dos 0°C, o teste de pressurização tem um limite de até 1 h^{-1}, sendo suficiente para se atingir o critério de aquecimento. [3]
			A eficiência do recuperador mínimo exigido pela certificação é de 75%. [2] Fluxo de ar mínimo deve ser entre 20 a 30 m³/h por pessoa no domicílio. [4]	A eficiência de recuperação de calor deve ser maior do que 75%. [2]

Fonte: [1] Mcleod, Mead e Standen (2011); [2] Wassouf (2014); [3] Passive-on (2007); [4] *Passive House Institute* (2016).

CAPÍTULO 4. A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL TERMOENERGÉTICA COMO FERRAMENTA DE PESQUISA

4.1 A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL TERMOENERGÉTICA

As ferramentas computacionais para simulação são importantes instrumentos na verificação e análise de edifícios, seja em relação ao seu comportamento termoenergético ou acústico, de iluminação, entre outros. Segundo Santos *et al.* (2017), a arquitetura necessita dedicar maior atenção para a etapa de projeto, sendo importante que os projetistas disponham de conhecimentos complementares, como o domínio de programas computacionais que simulem as condições termoenergéticas da edificação. Uma das vantagens da simulação computacional é sua versatilidade de utilização nas diversas fases de um projeto arquitetônico, as quais permitem a avaliação de diferentes soluções ainda na fase de planejamento, evitando gastos desnecessários, tanto na construção do projeto, quanto na vida útil da edificação, com a construção já concluída.

O uso de programas computacionais apresenta significativa contribuição no encontro de alternativas de eficiência energética, desde a escolha de um sistema de condicionamento de ar eficiente, de lâmpadas e luminárias de alto rendimento; no projeto de proteções solares; na instalação de um sistema de cogeração, até a análise das contas de energia elétrica de uma edificação (PEREIRA *et al.*, 2013).

A avaliação do desempenho energético de edificações é uma tarefa complexa que envolve grande quantidade de variáveis interdependentes e conceitos multidisciplinares. Através de programas de simulação computacional, é possível avaliar os projetos a partir de suas características dimensionais, seus componentes construtivos, seu sistema de iluminação ou de condicionamento de ar, além de ser possível investigar informações do padrão de uso e ocupação da edificação. Pode-se estimar o consumo de energia, o custo desse consumo e o impacto ambiental provocado pela alternativa de projeto antes mesmo de sua execução (DIDONÉ; PEREIRA, 2010). Todavia, é necessário atentar para o fato de que toda simulação computacional representa uma simplificação da realidade em todos os seus níveis de complexidade, e os parâmetros devem ser adotados de forma criteriosa para que os resultados tenham a maior precisão possível.

Neste sentido, projetos de edificações que fazem uso de ferramentas computacionais para modelagem e simulação tendem a se tornar cada vez mais frequentes, resultando no aumento da eficiência termoenergética e desempenho ambiental das edificações, sejam elas novas ou já existentes (SANTOS *et al.*, 2017).

A pressão por um desenvolvimento mais sustentável da arquitetura, assim como por projetos com um consumo energético quase nulo, impulsionou o crescimento de programas de simulação termoenergética nas últimas décadas e, por esse motivo, a simulação computacional se apresenta como uma tendência a ser cada vez mais explorada (SANTOS *et al.*, 2017). Com o desenvolvimento da informática associado à crise do petróleo da década de 1970, muitos programas computacionais foram (e estão sendo) desenvolvidos para o cálculo de cargas térmicas e avaliação das condições de conforto térmico e desempenho energético de edificações. Nesse quadro, considerando a ampla disponibilidade de programas no mercado, a escolha do programa para um dado projeto vai depender da aplicação a qual se destina (PEREIRA *et al.*, 2013). O *Building Energy Tools Directory*, página da internet mantida pelo Departamento de Energia dos EUA (DOE), reúne informações sobre as principais ferramentas disponíveis, sendo listados mais de 200 programas de simulação (IBPSA-USA, 2018).

Dentre os programas computacionais disponíveis na atualidade, foi escolhido para este trabalho o *EnergyPlus*, uma ferramenta internacionalmente conhecida e utilizada, que possibilita simulações confiáveis de diversas tipologias arquitetônicas, sistemas construtivos e condicionamento de ar (PEREIRA *et al.*, 2013). Além de ser amplamente utilizado por profissionais da área, o programa é classificado como uma ferramenta de referência atual para a simulação térmica. Outro benefício é que o código fonte do *EnergyPlus* está disponível e aberto para consulta, revisão e manipulação, representando uma importante vantagem no que se refere à atividade de pesquisa. Pela ampla utilização, também há muitas pesquisas sendo realizadas com o *EnergyPlus*, facilitando a troca de informações entre pesquisadores (FIGUEIREDO *et al.*, 2018). Além disso, o *EnergyPlus* é validado pela ANSI/ASHRAE Standard 140 (ANSI/ASHRAE, 2014) e atende aos critérios estabelecidos pela NBR 15575-1[1], pelo RTQ-R (INMETRO, 2012b) e pelo RTQ-C (INMETRO, 2013b)[2].

4.2 O PROGRAMA DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL *ENERGYPLUS*

Conforme visto anteriormente (cf. Cap. 2), o *EnergyPlus* é resultado da soma de recursos e características de dois outros programas desenvolvidos nos Estados Unidos entre as décadas de 1970

[1] "Para a realização das simulações computacionais recomenda-se o emprego do programa *EnergyPlus*. Outros programas de simulação poderão ser utilizados, desde que permitam a determinação do comportamento térmico de edificações sob condições dinâmicas de exposição ao clima, sendo capazes de reproduzir os efeitos de inércia térmica e sejam validados pela ASHRAE Standard 140." (ABNT, 2013).

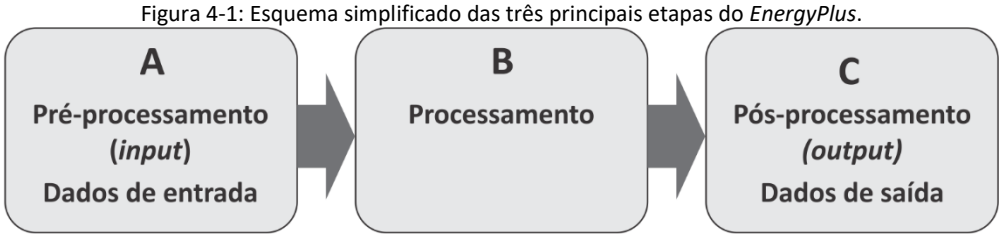
[2] Os critérios estabelecidos pelo RTQ-R (INMETRO, 2012b) e pelo RTQ-C (INMETRO, 2013b), aos quais os programas de simulações computacionais devem atender, estão descritos no item 4.4.1.

e 1980, o BLAST e o DOE-2. O *EnergyPlus* é um programa de simulação de carga de energia e análise térmica de edifícios, que conta com inúmeros detalhes de simulação necessários para verificar se a simulação está funcionando como a edificação real (DOE, 2018b).

Apesar da difusão do *EnergyPlus* na área da simulação computacional térmica e energética, o programa não apresenta interface gráfica amigável. A configuração da simulação é baseada em um sistema de parâmetros e tabelas editáveis, o que dificulta a operação e restringe seu uso. Gomes (2012) explica que a caracterização de um modelo no *EnergyPlus* exige o conhecimento de um grande número de variáveis. A diversidade dos dados de entrada aumenta a precisão dos resultados, mas também pode gerar dúvidas quanto ao preenchimento de parâmetros, além de levar a resultados de simulação errôneos.

Simplificadamente, o funcionamento do *EnergyPlus* é composto por três etapas (Figura 4-1) a entrada de dados (*input*), o processamento e a saída de dados (*output*).

Figura 4-1: Esquema simplificado das três principais etapas do *EnergyPlus*.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Para realizar a simulação com o *EnergyPlus*, é necessário uma série de dados de entrada que descrevem o edifício, como a geometria da edificação, dados climáticos do local do projeto, além da especificação de todos os materiais utilizados, dos equipamentos de condicionamento térmico e de iluminação e, também, informações sobre a configuração do uso e ocupação dos ambientes. Os dados físicos da edificação são inseridos por meio do arquivo de entrada com extensão .IDF (*Input Data File*) e os dados climáticos da localidade são inseridos por um arquivo de dados climáticos com extensão .EPW (*EnergyPlus Weather File*).

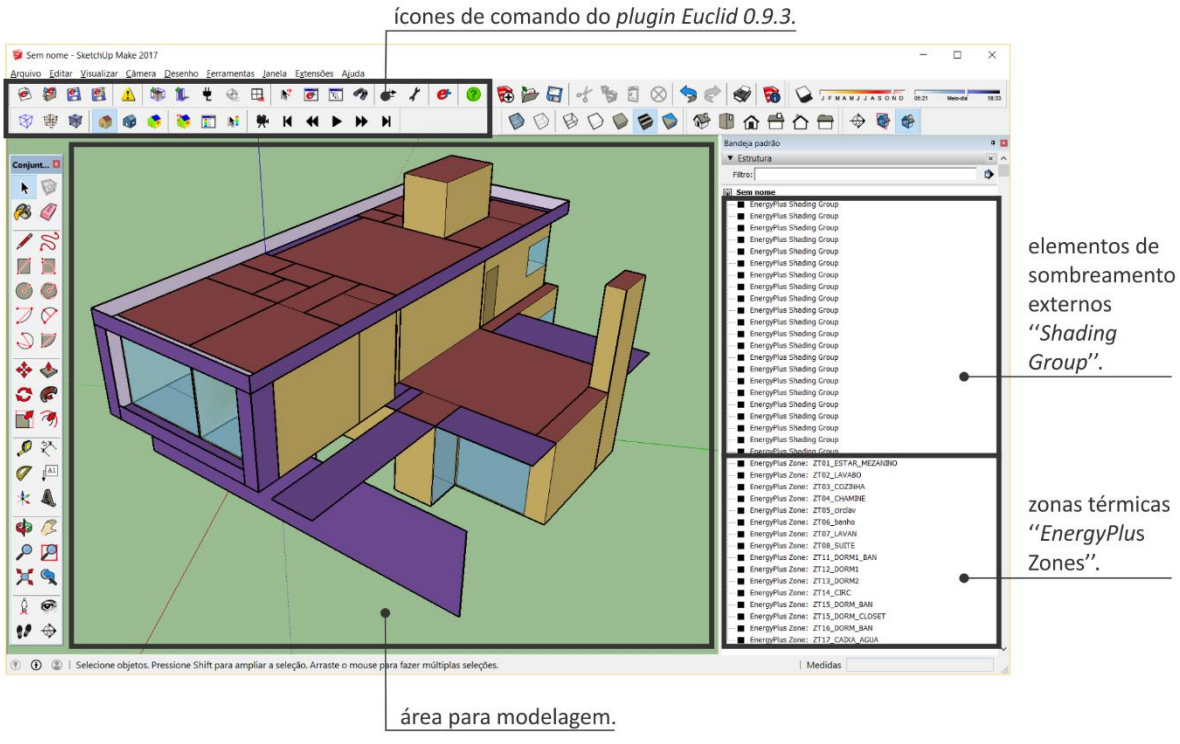
Os dados climáticos das cidades brasileiras são disponibilizados no site do LabEEE[3], no site oficial do *EnergyPlus*[4], no site do Prof. Mauricio Roriz[5], assim como pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos[6] ou, então, pelo site do PROCEL INFO[7].

[3] Disponível em: http://www.labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos
[4] Disponível em: https://*EnergyPlus*.net/weather
[5] Disponível em: http://www.roriz.eng.br/epw_9.html
[6] Disponível em: www.eere.energy.gov
[7] Disponível em: www.procelinfo.com.br/etiquetagem_edificios

A modelagem da geometria da edificação pode ser desenvolvida no próprio *EnergyPlus,* porém é realizada por intermédio de coordenadas cartesianas, gerando uma demanda elevada de trabalho e tempo, devido à complexidade da entrada dos dados da geometria. Tendo isso em vista, outros programas computacionais foram desenvolvidos para agilizar o processo de modelagem, os quais utilizam uma interface gráfica amigável em que é possível desenhar a edificação com maior facilidade e agilidade. Entre os programas gratuitos, se destaca o *plugin Euclid,* rodado dentro de um programa utilizado pelos estudantes e profissionais da arquitetura, o *SketchUp*. Ou seja, o *Euclid* é uma extensão gratuita e de código aberto para o *SketchUp* que facilita a criação e modificação de entradas geométricas para a construção de modelos das edificações. O *plugin Euclid* exporta o arquivo geométrico e outras definições e predefinições estabelecidas no ambiente do *SketchUp* para o formato de arquivo IDF, exigido pelo *EnergyPlus*.

Neste trabalho, foi utilizado para modelagem das edificações o programa computacional gratuito *SketchUp* v. 2017 *Make* com o uso do *plugin Euclid* v. 0.9.3 (Figura 4-2). Durante a modelagem com o *Euclid* v. 0.9.3, já são predefinidos alguns parâmetros automaticamente: paredes internas e externas (*interior* e *exterior wall*); teto (*ceiling*); cobertura (*roof*), janelas internas e externas (*interior* e *exterior window*); portas internas e externas (*interior* e *exterior door*); piso interno e externo (*interior* e *exterior floor*); além de elementos externos de sombreamento (*shading*). As zonas térmicas e os elementos de sombreamento externos são facilmente definíveis.

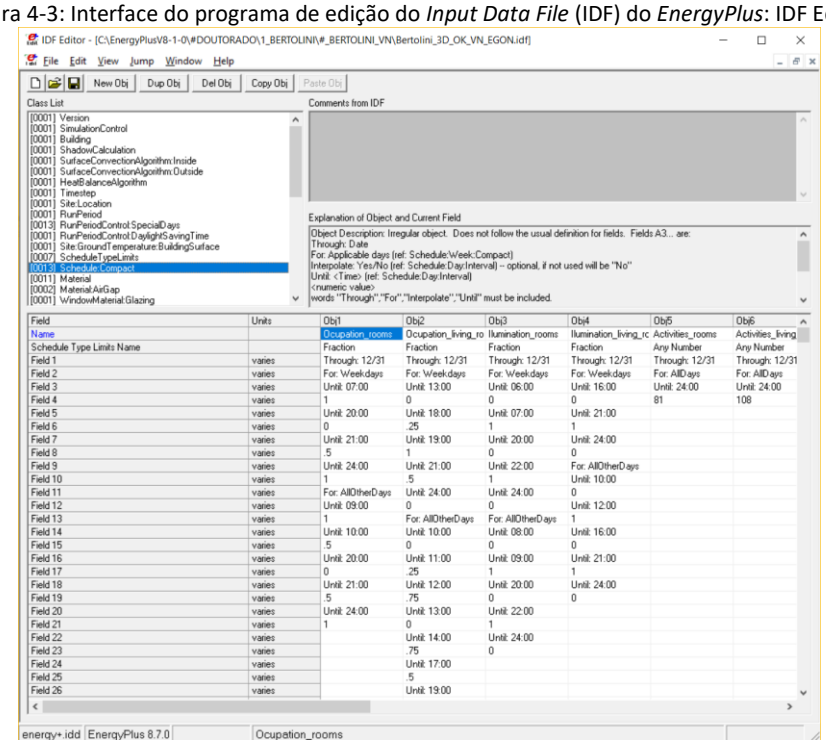
Figura 4-2: *Plugin Euclid* v. 0.9.3 dentro do *SketchUp* v. 2017 *Make*.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A configuração das propriedades dos materiais, agenda de uso e ocupação, orientação solar, configuração dos equipamentos elétricos, entre outros, podem ser configurados pelo IDF editor. A Figura 4-3 ilustra a interface do programa de edição do *Input Data File* (IDF) do *EnergyPlus*.

Figura 4-3: Interface do programa de edição do *Input Data File* (IDF) do *EnergyPlus*: IDF Editor.



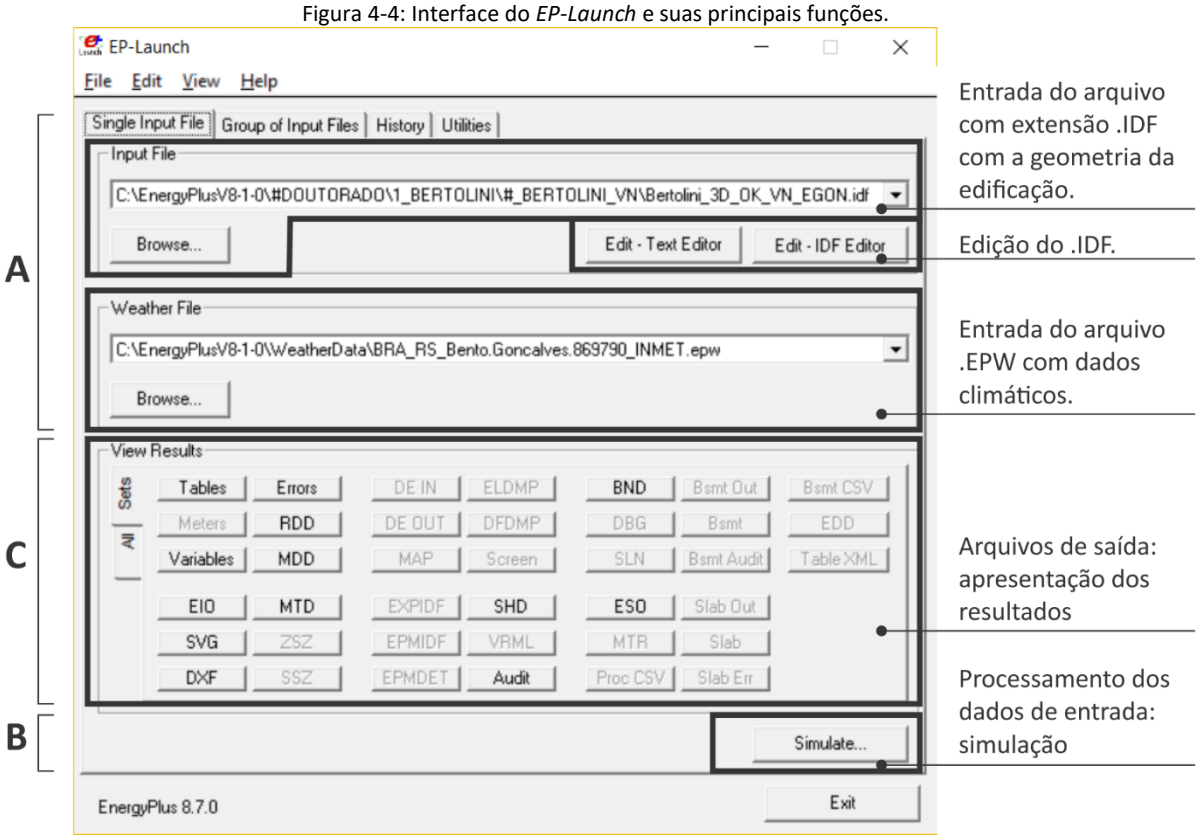
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Após o processamento de todos dados de entrada (*input*), o *EnergyPlus* produz resultados (*output*) resumidos e detalhados em forma de texto não estruturado em vários formatos, dentre os quais destacam-se o CSV[8] e HTML[9]. Para a visualização dos resultados e manipulação dos dados, são utilizadas planilhas eletrônicas como o *Microsoft Excel* ou o *LibreOffice Calc*.

Para facilitar e integrar esses três processos de entrada (*input*), processamento e saída dos dados (*output*), o *EnergyPlus* conta com o componente opcional "*EP-Launch*" (Figura 4-4), que ajuda a abrir um editor de textos para os arquivos de entrada e saída, uma planilha para os arquivos de resultado do pós-processador, um navegador da Web para o arquivo de resultados tabulares e auxilia na inicialização de um visualizador para o arquivo de desenho selecionado.

[8] Abreviação da palavra inglesa "Comma-Separated Values", que em português significa "Valores Separados por Vírgula".
[9] Abreviação da palavra inglesa "Hypertext Markup Language", que em português significa "Linguagem de Marcação de Hipertexto".

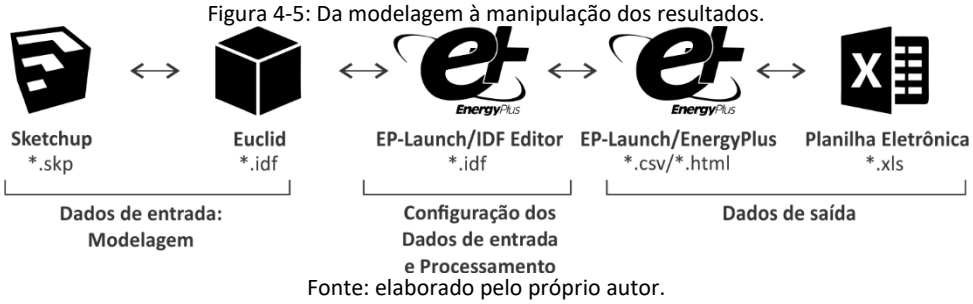
Figura 4-4: Interface do *EP-Launch* e suas principais funções.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A Figura 4-5 sintetiza a aplicação dos programas computacionais utilizados por este trabalho, desde o processo de modelagem da edificação, passando pela configuração do arquivo IDF, até a simulação e manipulação dos resultados em planilha eletrônica. Neste trabalho, foi utilizado o *SketchUp* v. 2017 *Make* juntamente com o *plugin Euclid* v. 0.9.3; as simulações computacionais foram realizadas com o *EnergyPlus* v. 8.7.0 por meio do *EP-Launch* v.2.13, versão mais recente disponível do programa no momento do início das simulações (novembro de 2017). Esse processo será melhor exposto no Capítulo 5: Metodologia.

Figura 4-5: Da modelagem à manipulação dos resultados.



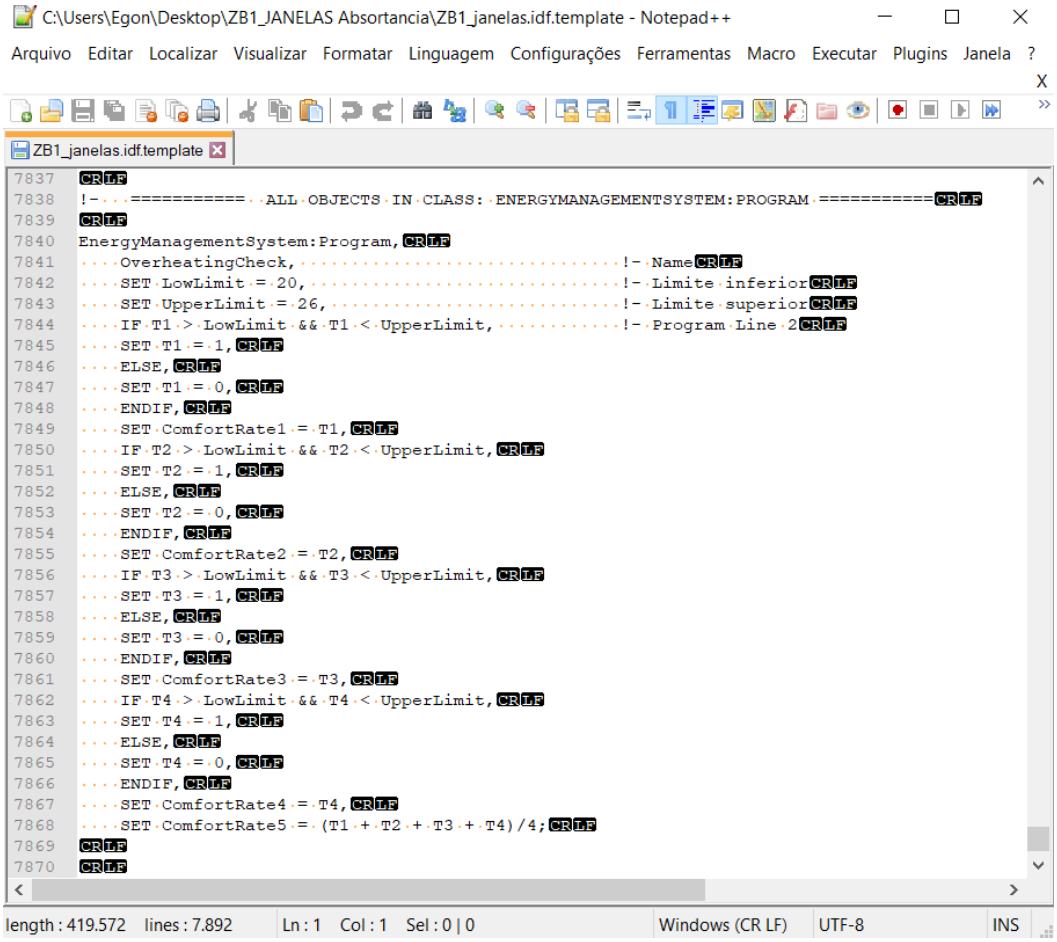
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

4.2.1 Sistema de Gerenciamento de Energia (EMS)

O *EnergyPlus* abarca uma quantidade significativa de entradas e saídas de dados, porém, muitas vezes, não comporta todas as necessidades específicas de cada projeto. Para isso, é possível programar as próprias rotinas com o Sistema de Gerenciamento de Energia (*Energy Management System* - EMS), adicionando entradas e saídas adequadas as especificidades requeridas.

O EMS é um recurso avançado do *EnergyPlus* que possibilita desenvolver rotinas de controle e modelagem personalizadas para os modelos desenvolvidos. Com o EMS é possível escrever programas computacionais personalizados e ter uma compreensão completa de como se deseja que os modelos se comportem. A linguagem de programação empregada para descrever os algoritmos de controle é chamada de Linguagem de Execução do *EnergyPlus* (*EnergyPlus Runtime Language* - Erl) (DOE, 2018a) e é utilizada diretamente por linha de comando no arquivo IDF (Figura 4-6). O *EnergyPlus* interpreta e executa o programa Erl conforme o modelo que está sendo executado.

Figura 4-6: Exemplo do uso do EMS no *EnergyPlus*.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Neste trabalho, foi utilizado o EMS nas etapas descritas nos itens 5.5 e 5.6 da metodologia, Capítulo 5. Para edição do Erl, é utilizado o editor de texto e de código fonte Notepad++ v. 7.6.3, que suporta várias linguagens de programação.

4.3 OTIMIZAÇÃO EVOLUTIVA MULTIOBJETIVO

Para auxiliar na otimização de inúmeras variáveis conjuntas de projeto, neste trabalho foram realizadas simulações computacionais com uma abordagem de otimização multiobjetivo, através da aplicação de um algoritmo evolucionário híbrido. Os próximos parágrafos tratam da simulação computacional com o uso de algoritmos de otimização como apoio ao desenvolvimento de projetos arquitetônicos.

Muitos esforços estão sendo feitos para auxiliar os projetistas a trabalhar de forma otimizada com as variáveis que interferem no desempenho termoenergético das edificações (FIGUEIREDO; KÄMPF; VICENTE, 2016). A melhoria do desempenho termoenergético de uma edificação pode ser atingida por meio de dois caminhos: por tentativa e erro, ou pela utilização de algoritmos de otimização (GOSSARD; LARTIGUE; THELLIER, 2013). Embora o método de tentativa e erro possa gerar soluções aceitáveis, a otimização tem como foco direto encontrar as melhores soluções para um projeto baseado nos objetivos desejados (MAGNIER; HAGHIGHAT, 2009).

O uso da computação e dos algoritmos de otimização pode auxiliar na concepção de projetos, possibilitando lidar com inúmeras variáveis ao mesmo tempo. Os programas de modelagem tridimensional, como o *SketchUp*, e a otimização, com uso de algoritmos, podem ser combinados, fornecendo aos projetistas ferramentas poderosas para auxiliar no processo de tomada de decisão. Esse tipo de processo de otimização pode ser aplicado com um tempo viável e é bastante útil na fase de projeto (OLIVEIRA *et al.*, 2018).

Um algoritmo pode ser entendido como uma receita, um método ou uma técnica para fazer algo, e tem como característica essencial ser composto por um conjunto de regras que conduzem à execução de uma ação específica (TERZIDS, 2009; MARTINO, 2015). Os algoritmos evolutivos são modelos computacionais criados para resolver problemas de elevada complexidade, por meio de manipulação semelhante aos mecanismos de evolução biológica, visando oferecer a melhor solução para o problema (PARENTE, 2018).

A otimização multiobjetivo pode ser aplicada em muitas situações, em que decisões ideais precisam ser tomadas em um contexto de conflito entre dois ou mais objetivos diferentes (LIMA; KOS; MONTENEGRO, 2016). Dessa forma, exclui-se o processo de tentativa e erro e, por meio do uso de

algoritmos para otimização, automatiza-se a busca combinada entre variáveis desejadas para determinação de características mais favoráveis ao desempenho termoenergético. Por exemplo, é possível definir, mediante o uso de algoritmos de otimização, o tamanho ideal de determinada janela em relação à orientação solar, para que a edificação tenha a menor necessidade energética e o maior período de conforto. Esse processo de otimização, sem o auxílio do processamento computacional por algoritmos, torna-se praticamente inviável, dado a complexidade das possibilidades de combinações de variáveis e o tempo necessário para a verificação de cada cenário. Embora a mente humana seja a responsável pela concepção dos algoritmos, as capacidades computacionais também devem ser integradas e exploradas pela arquitetura (TERZIDIS, 2009).

O algoritmo evolutivo multiobjetivo é empregado para encontrar soluções ótimas com os parâmetros, restrições e funções de objetivo definidos (KÄMPF; WETTER; ROBINSON, 2010). A otimização multiobjetivo resulta sempre num conjunto de soluções ótimas, com um ou mais objetivos e, portanto, teoricamente, não é possível definir qual a solução é melhor que outras. Esquematicamente, as soluções otimizadas com um objetivo são apresentadas como um único ponto; as soluções com dois objetivos são retratadas como uma curva; e, por fim, as soluções com três objetivos são representadas como uma superfície. Desse modo, para analisar o conjunto de soluções multiobjetivas otimizadas, em um quadro no qual não existam soluções dominantes, utiliza-se o Pareto Front. O Pareto Front pode ser definido, simplificadamente, como o conjunto de soluções ótimas (OLIVEIRA *et al.*, 2018).

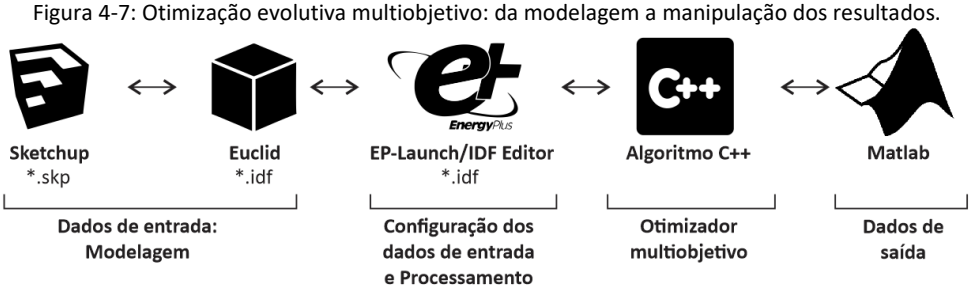
Neste trabalho, explorou-se uma abordagem de otimização multiobjetivo utilizando um algoritmo evolucionário híbrido, desenvolvido em 2009, pelos pesquisadores Jérôme Henri Kämpf e Darren Robinson, da Escola Politécnica Federal de Lausana da Suiça. O algorítimo evolucionário híbrido foi baseado nos algoritmos evolutivos CMA-ES (*Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy*[10]) e HDE (*Hybrid Differential Evolution*[11]) (KÄMPF; ROBINSON 2009). Esses algoritmos (HDE e CMA-ES) operam em série, durante o processo de otimização, para resolver o problema definido (KÄMPF; WETTER; ROBINSON, 2010).

A Figura 4-7 sintetiza a aplicação dos programas computacionais utilizados por este trabalho no processo de otimização das simulações. Após a modelagem das edificações no *SketchUp* v. 2017 *Make* com o *plugin Euclid* v. 0.9.3, as simulações computacionais foram realizadas com o motor de cálculo *EnergyPlus* v. 8.7.0, e o processo de otimização multiobjetivo foi realizado com o algoritmo evolucionário híbrido, descrito anteriormente. A configuração das variáveis, funções, objetivos, etc.,

[10] Tradução: Estratégia de Evolução de Adaptação de Matriz de Covariância.
[11] Tradução: Evolução Diferencial Híbrida.

foi implementada diretamente em código C++ por meio de notação no Notepad++ v. 7.6.3. Os resultados do processo de otimização foram trabalhados com o Matlab para a definição do *Pareto Front*. Esse processo é detalhadamente exposto no capítulo 5: Metodologia.

Figura 4-7: Otimização evolutiva multiobjetivo: da modelagem a manipulação dos resultados.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

4.4 RTQ-R E OS CRITÉRIOS PARA REALIZAR AS SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS DE DESEMPENHO TERMOENERGÉTICO

Como o presente trabalho trata da eficiência energética de edificações residenciais unifamiliares, o foco deste texto é descrever as metodologias e procedimentos utilizados pelo RTQ-R quanto à simulação computacional dessas edificações, que contribuem também com o desenvolvimento do trabalho. Embora a NBR 15575-1[12] (ABNT, 2013) também exponha uma metodologia para simulação computacional, o RTQ-R apresenta informações mais completas quanto ao uso e ocupação do ambiente, quanto às fontes de calor internas, aos períodos de simulação e aos critérios para ventilação natural e condicionamento artificial do ar, tendo sido adotado nesta pesquisa por esse motivo.

Nos últimos anos, muitos países, dentre os quais destacam-se Alemanha, Austrália, Canadá, Estados Unidos, Espanha e Portugal, têm proposto normas e regulamentos para o desempenho termoenergético de edificações, com o objetivo de reduzir o consumo energético.

No Brasil, conforme mencionado no item 2.3.4, o início do processo de Etiquetagem de Edificações ocorreu por intermédio da Lei nº 10.295, promulgada em 2001 e conhecida como "Lei da Eficiência Energética". O processo de etiquetagem de edificações, no Brasil, ocorre de forma distinta para edifícios comerciais, de serviços e públicos e para edifícios residenciais. A metodologia para a classificação do nível de eficiência energética foi publicada em 2009 e revisada em 2010, ano em que também foi publicada a metodologia para classificação dos edifícios residenciais. Em agosto de 2014, a Etiquetagem de Edificações tornou-se obrigatória em edifícios públicos federais com área superior a

[12] A NBR 15575-1 apresenta algumas simplificações para a realização da simulação computacional, como, por exemplo, não estabelece fontes internas de calor (ocupantes, lâmpadas e equipamento) e indica que o desempenho térmico da edificação deva ser avaliado a partir de duas condições: desempenho no verão e desempenho no inverno.

500 m², sejam novas ou resultado de *retrofit* que altere seus sistemas de iluminação, condicionamento de ar ou estrutura envoltória.

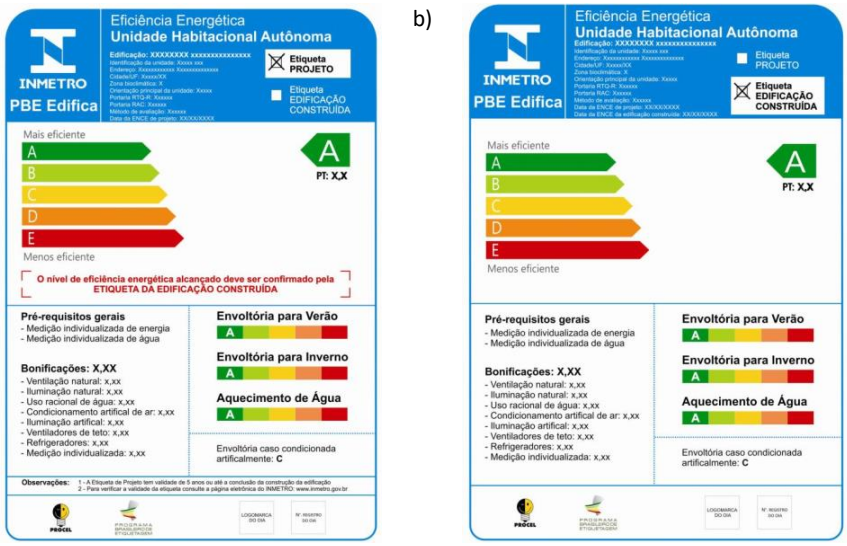
A versão original do RTQ-R foi publicada, em 2010, no Brasil. O RTQ-R define as condições para a avaliação da eficiência energética de edifícios residenciais, sendo dividida em partes: unidades habitacionais autônomas, compreendendo edifícios residenciais unifamiliares, e unidades autônomas de edifícios multifamiliares; edificações multifamiliares e áreas de uso comum de condomínios residenciais.

Além disso, o RTQ-R visa estabelecer as condições para a classificação do nível de eficiência energética de edificações residenciais a fim de possibilitar a obtenção da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) (INMETRO, 2012a). A etiqueta é concedida em dois momentos distintos: na fase de projeto e após a construção da edificação. Um projeto pode ser avaliado pelo método prescritivo ou pelo método da simulação, enquanto o edifício construído deve ser avaliado unicamente por inspeção *in loco* (PROCEL INFO, 2018).

Na unidade habitacional, são avaliados o desempenho da envoltória dos ambientes de permanência prolongada e o sistema de aquecimento de água. Há cinco níveis de eficiência, que variam de "A", para o mais eficiente, até "E", para o menos eficiente. A classificação geral da edificação é calculada por meio de eficiências individuais de cada requisito, ponderada conforme o zoneamento bioclimático brasileiro (Figura 4-8).

Figura 4-8: ENCE geral de Projeto (a) e ENCE geral da Edificação Construída (b) para Unidades Habitacionais Autônomas.

a) b)



Fonte: Eletrobras/Procel Edifica, Inmetro, CB3E/UFSC (2013).

De acordo com Scalco *et al.* (2012), o método proposto no RTO-R incentiva o uso de estratégias bioclimáticas no projeto da edificação, procurando reduzir o consumo de energia requerida para o condicionamento artificial, diferentemente de outros países, nos quais as avaliações são baseadas na redução do consumo de energia dos sistemas de condicionamento artificial.

> "Cabe salientar que a regulamentação por si não garante qualidade em níveis de eficiência em uma edificação. Maiores níveis de eficiência podem ser alcançados por meio de estratégias de projeto e por iniciativas e cooperação dos diversos agentes envolvidos na construção (arquitetos, engenheiros civis, eletricistas, mecânicos, empreendedores, etc.). Os usuários têm participação decisiva no uso eficiente das edificações através dos seus hábitos, que podem reduzir de forma significativa o consumo de energia, aumentando assim a eficiência das edificações e reduzir desperdícios. Todos os envolvidos na concepção e utilização das edificações e seus sistemas podem contribuir para criar e manter edificações energeticamente eficientes" (INMETRO, 2012a, p. 5).

4.4.1 Simulação computacional da edificação ventilada naturalmente e condicionada artificialmente

O RTQ-R reúne um conjunto de informações que estabelecem critérios para realizar as simulações computacionais de desempenho termoenergético com a edificação ventilada naturalmente e condicionada artificialmente. Com o intuito de realizar simulações com base em padrões já estabelecidos e reconhecidos, o presente trabalho adota esses critérios. Logo, para a etapa das simulações computacionais, detalhada no Capítulo 5, foram empregados os critérios definidos pelo RTQ-R, tais como o método para cálculo de energia consumida para aquecimento e refrigeração e uso e ocupação dos ambientes de permanência prolongada, bem como o critério para a seleção de programas de simulação e dos arquivos climáticos adequados.

Para a avaliação de unidades habitacionais autônomas e edificações unifamiliares, a avaliação da eficiência da envoltória pode ser realizada por dois métodos: método prescritivo, no qual são utilizadas equações de acordo com a Zona Bioclimática, ou mediante simulação termoenergética, em que os indicadores são obtidos por meio da simulação computacional com programas indicados pelo RTQ-R (INMETRO, 2012b).

No método de simulação computacional de eficiência termoenergética, a envoltória da edificação é avaliada por meio de dois procedimentos: simulação da edificação ventilada naturalmente e simulação da edificação condicionada artificialmente.

Para a avaliação da edificação ventilada naturalmente, o controle automático por temperatura é realizado com base em um padrão de uso de temperatura que controla a abertura das janelas, habilitando a abertura da janela quando a temperatura do ar do ambiente interno é igual ou superior

à temperatura do termostato (20°C) ou quando a temperatura do ar do ambiente é superior à temperatura externa (INMETRO, 2012b).

Também para avaliação das edificações ventiladas naturalmente, o RTQ-R utiliza os indicadores de graus-hora de resfriamento (GH_R) para os ambientes de permanência prolongada, calculados com temperatura base de 26°C. O Inmetro (2012b) define que o parâmetro "graus-hora" de resfriamento (GH_R) é determinado a partir da somatória da diferença da temperatura horária, quando esta se encontra superior à temperatura de base (26°C). Por meio da Equação 1, calcula-se o indicador de graus-hora de resfriamento para a temperatura operativa horária para cada ambiente de permanência prolongada (INMETRO, 2012b).

$$GH_R = \sum (T_o - 26°C)$$ Equação 1

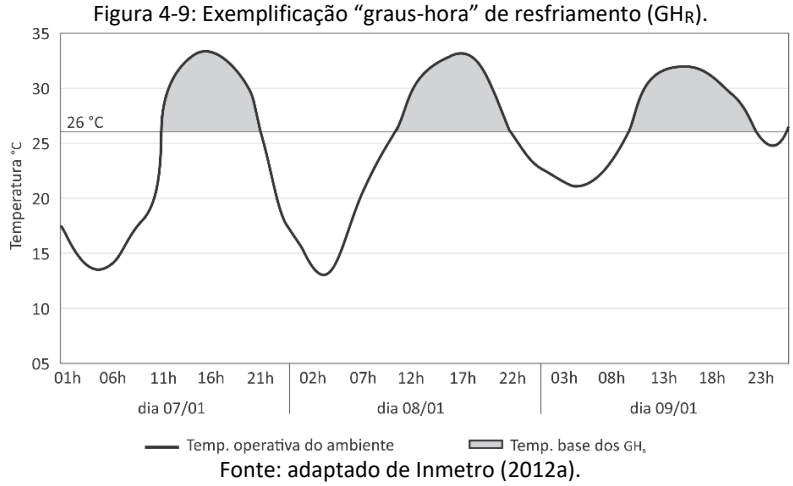
Onde:

GH_R*: indicador de graus-hora para resfriamento;*

T_o*: temperatura operativa horária (°C).*

A Figura 4-9 exemplifica o parâmetro GH_R, em que a área preenchida acima da linha de temperatura de 26°C representa a quantidade de graus-hora de resfriamento.

Figura 4-9: Exemplificação "graus-hora" de resfriamento (GH_R).



Fonte: adaptado de Inmetro (2012a).

Para a avaliação da edificação condicionada artificialmente, utilizam-se dados de consumo de aquecimento e de refrigeração dos ambientes de permanência prolongada, os quais são calculados no período das 21h às 8h, sendo que, no período restante, deve-se considerar a edificação naturalmente ventilada (como descrito anteriormente), com a estratégia de ventilação controlada, automaticamente, por meio do critério de temperatura. A temperatura do termostato de refrigeração é de 24°C e de aquecimento é de 22°C (INMETRO, 2012b).

Como não seria possível comparar o desempenho termoenergético de diferentes edificações com usuários com costumes de uso e ocupação diversificados, o RTQ-R reúne um conjunto de critérios para definir um padrão de uso e ocupação. Logo, não foca em um usuário real, mas em um padrão de uso e ocupação que possibilita estabelecer parâmetros para avaliar o desempenho termoenergético com igualdade em diversas edificações. Desse modo, o RTQ-R reúne um conjunto de informações que padronizam as simulações computacionais termoenergéticas quanto ao uso e ocupação dos ambientes de permanência prolongada, tais como o padrão de ocupação, taxas metabólicas para cada atividade, o padrão de uso da iluminação, a densidade de potência instalada de iluminação, cargas internas de equipamentos, entre outros. Todos esses critérios, descritos no Capítulo 5, foram utilizados para a simulação computacional deste trabalho.

Com a intenção de garantir a obtenção de resultados coerentes, o RTQ-R e o RTQ-C estabelecem exigências quanto aos programas de simulações computacionais utilizados, bem como em relação aos arquivos climáticos utilizados na simulação (INMETRO, 2012b; INMETRO, 2013b), entre as exigências, destacam-se:

- ser um programa para a análise do consumo de energia em edifícios;
- ser verificado de acordo com testes propostos pela ASHRAE Standard 140 - 2004: *Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs;*
- modelar 8.760 horas por ano;
- modelar variações horárias de ocupação, potência de iluminação e de equipamentos, rede de ventilação natural e sistemas de condicionamento artificial, definidos separadamente para cada dia da semana e feriados;
- modelar efeitos de inércia térmica;
- modelar efeitos de multizonas térmicas;
- ser possível de simular estratégias bioclimáticas adotadas no projeto;
- determinar a capacidade solicitada pelo sistema de condicionamento de ar;
- produzir relatórios horários das trocas de ar e das infiltrações do uso final de energia.
- Quanto ao arquivo climático utilizado, o RTQ-R determina:
- fornecer valores horários para todos os parâmetros relevantes, tais como temperatura e umidade, direção e velocidade do vento e radiação solar;
- os dados climáticos devem ser representativos da Zona Bioclimática onde o projeto sob avaliação será locado e, caso o local do projeto não possua arquivo climático, deve-se utilizar dados climáticos de uma região próxima que possua características climáticas semelhantes;
- devem ser utilizados arquivos climáticos disponibilizados pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos ou pelo site do Procel Info.

CAPÍTULO 5. METODOLOGIA

A metodologia foi desenvolvida em seis etapas, as quais são apresentadas resumidamente nos próximos parágrafos e detalhadas nos itens posteriores.

A Etapa 1 corresponde ao desenvolvimento de linhas do tempo tendo como base a síntese histórica das edificações passivas no Brasil e no mundo. Para tanto, analisou-se a situação energética e ambiental em cada período, além de se ter selecionado e desenhado edificações ou tecnologias emblemáticas que resumem em algum nível acontecimentos importantes de cada época (ver item 5.1).

Na Etapa 2, foram selecionadas as edificações referenciais para a realização do estudo de caso, tendo-se em vista os seguintes critérios: edificações presentes na Região Sul-Brasileira, nas Zonas Bioclimáticas ZB1, ZB2 e ZB3; localização em uma cidade com dados climáticos disponibilizados; edificação residencial unifamiliar projetada e construída nas últimas duas décadas; presença de estratégias passivas básicas e disponibilidade mínima de informações de projeto. Para cada Zona Bioclimática, elegeu-se uma cidade representativa e, para cada cidade, foi escolhida uma edificação referencial para o estudo de caso, denominadas, respectivamente, como Residência ZB1, Residência ZB2 e Residência ZB3 (ver item 5.2).

A Etapa 3 é destinada à modelagem e configuração dos parâmetros para simulação computacional das três edificações referenciais selecionadas na Etapa 2. As edificações foram modeladas com o uso do *plugin Euclid* v. 0.9.3. A modelagem é a base para o desenvolvimento das simulações computacionais termoenergéticas com o programa *EnergyPlus* v. 8.7.0, realizadas nas etapas seguintes (Etapas 4, 5 e 6). Nessa Etapa, foram configurados o uso, ocupação, iluminação, equipamentos, ventilação natural e sistema de ar-condicionado indicados pelo RTQ-R (INMETRO, 2012b) e também a temperatura de solo (ver item 5.3).

Na Etapa 4, o diagnóstico termoenergético das edificações referenciais é realizado por meio da classificação do nível de eficiência energética da envoltória (RTQ-R) e apresenta dois objetivos principais. O primeiro consiste em avaliar o nível de desempenho da envoltória segundo o regulamento brasileiro RTQ-R das três edificações referenciais; o segundo consiste em compreender qual o comportamento termoenergético atual das edificações durante o ano. A etapa de diagnóstico energético também permitiu testar a simulação computacional e verificar suas limitações e potencialidades para a próxima etapa da pesquisa (ver item 5.4).

A Etapa 5, verifica-se a aplicação otimizada das estratégias do conceito *Passive House* nas edificações referenciais, Residências ZB1, ZB2 e ZB3, sem interferir nos demais parâmetros de projeto. Para isso, foi

utilizado um algoritmo evolutivo multiobjetivo variando a espessura do isolamento térmico e a solução de esquadria por orientação solar, a estanqueidade e a ventilação mecânica com recuperador de calor. Realizou-se um total de 50.000 simulações para essa etapa, com o propósito de definir as melhores estratégias *Passive House* com base em dois objetivos: minimizar o consumo de energia para condicionamento térmico e diminuir o percentual de horas em desconforto durante o ano (ver item 5.5).

Na Etapa 6 foram otimizados, através do algoritmo evolutivo multiobjetivo, o dimensionamento de elementos de controle solar e o dimensionamento das janelas com e sem a otimização das estratégias *Passive House*. Realizou-se um total de 60.000 simulações com os mesmos dois objetivos anteriores, ou seja, minimizar o consumo de energia para condicionamento térmico e diminuir o percentual de horas em desconforto durante o ano (ver item 5.6).

As 6 Etapas principais da metodologia e seus objetivos são ilustrados esquematicamente na Figura 5-1.

Figura 5-1: Esquema da metodologia adotada.

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

5.1 ETAPA 1: SÍNTESE HISTÓRICA COM BASE NA ELABORAÇÃO DE LINHA DO TEMPO DA ARQUITETURA PASSIVA NO MUNDO E NO BRASIL

Com a finalidade de promover uma síntese da contextualização histórica sobre a eficiência energética nas edificações no cenário internacional e nacional, foram desenvolvidas linhas do tempo com base na revisão da literatura realizada anteriormente. Para cada contexto, internacional e nacional, foram elaboradas duas diferentes linhas do tempo.

A primeira linha do tempo consiste em uma listagem cronológica dos acontecimentos relacionados à arquitetura passiva, ao meio ambiente e à energia. Essa linha foi desenvolvida em colunas, nas quais constam informações a respeito do período, uma breve descrição, o local onde ocorreu e uma ilustração relacionada ao acontecimento. A ordem cronológica está organizada em linhas crescentes em relação aos acontecimentos. A linha do tempo internacional é apresentada no Apêndice J e nacional no Apêndice K.

A segunda linha do tempo foi desenvolvida com o intuito de sintetizar em períodos as características da arquitetura passiva, relacionando essas características com o contexto ambiental, energético e tecnológico. Para cada período, foram selecionadas e desenhadas edificações ou tecnologias emblemáticas que resumem importantes feitos da época. A linha do tempo internacional foi sintetizada em treze períodos e a linha do tempo brasileira em dez períodos. Como cada período apresentado possui diferentes intervalos de tempo representados em um mesmo espaço, foi desenvolvida uma escala gráfica temporal para compreensão da duração de cada uma dessas fases com maior precisão. As linhas do tempo internacional e nacional são apresentadas no item 6.1 dos resultados.

As linhas do tempo desenvolvidas nesta tese pretendem contribuir com o registro da trajetória da arquitetura passiva ao longo do tempo, para auxiliar na compreensão dos eventos e estabelecer relações principalmente com questões pertinentes ao meio ambiente e à disponibilidade energética.

5.2 ETAPA 2: DEFINIÇÃO DE CRITÉRIOS E SELEÇÃO DAS EDIFICAÇÕES REFERENCIAIS PARA O ESTUDO DE CASO

A seguir, são apresentados os critérios utilizados para definição das edificações referenciais. No decorrer da metodologia esses critérios serão melhor explicitados.

1. Edificações presentes na Região Sul-Brasileira, nas Zonas Bioclimáticas ZB1, ZB2 e ZB3. Motivo: a Região Sul do país é composta por cinco Zonas Bioclimáticas, destas, as mais representativas em termos de área são a ZB1, ZB2 e ZB3, conforme apresentado no item 5.2.1, e, por esse motivo, foram escolhidas para o estudo.

2. Localização estratégica, em cidades com dados climáticos conhecidos e disponibilizados em arquivos no formato EPW. Motivo: os dados climáticos organizados nos arquivos EPW são necessários para realizar as simulações computacionais com o programa *EnergyPlus*.

3. Edificação caracterizada como um residencial unifamiliar, projetada e construída nas últimas duas décadas. Motivo: o setor residencial é o maior consumidor de energia entre as edificações brasileiras; nesse quadro, as residências unifamiliares representam a maioria dos domicílios da Região Sul do país, conforme exposto no item 5.2.2. Busca-se estudar edificações que tenham os aspectos programáticos e construtivos representativos da produção arquitetônica atual de cada cidade escolhida, por essa razão, optou-se por selecionar edificações projetadas e construídas nas últimas duas décadas.

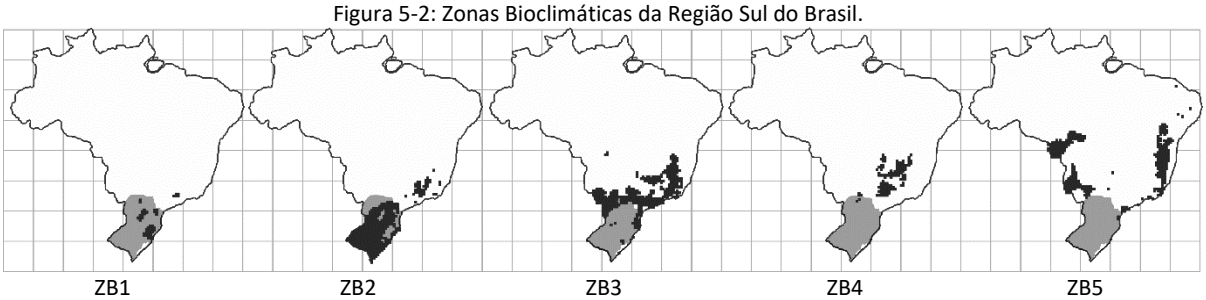
4. Presença de estratégias passivas básicas, conforme definido no item 3.3. Motivo: a presença de estratégias passivas básicas é um critério inicial para posterior aplicação do conceito *Passive House*. Entre as estratégias passivas básicas para residências, destacam-se a orientação solar da edificação e dos ambientes, a presença de elementos de controle solar e o fator de forma.

5. Disponibilidade de informações mínimas do projeto arquitetônico. Motivo: para modelar a edificação para realizar as análises termoenergéticas por meio das simulações computacionais são necessárias algumas informações mínimas sobre o projeto para que o estudo seja possível.

5.2.1 As Zonas Bioclimáticas e as cidades representativas

Segundo a NBR 15220-3, "Desempenho térmico de edificações - Parte 3: Zoneamento Bioclimático Brasileiro e Diretrizes Construtivas para Habitações Unifamiliares de Interesse Social", o Brasil é dividido em oito diferentes Zonas Bioclimáticas, sendo que cinco dessas zonas estão presentes em maior ou menor escala na Região Sul-Brasileira (estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul) (Figura 5-2[1]).

Figura 5-2: Zonas Bioclimáticas da Região Sul do Brasil.



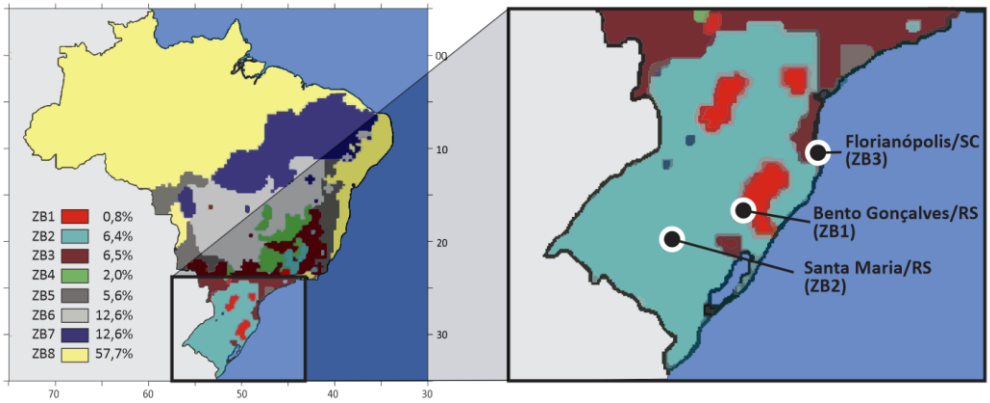
Fonte: adaptado de ABNT (2005).

Das cinco Zonas Bioclimáticas, as que ocupam maiores áreas são a ZB1, ZB2 e ZB3 e, por esse motivo, foram selecionadas para o trabalho. Para a ZB1 foi adotada a cidade de Bento Gonçalves - RS, para ZB2

[1] Imagem detalhada no Apêndice A.

a cidade de Santa Maria – RS e, para ZB3, Florianópolis - SC (Figura 5-3). As três cidades apresentam dados climáticos disponíveis em formato EPW que podem ser utilizados em simulações computacionais.

Figura 5-3: Zoneamento bioclimático brasileiro.



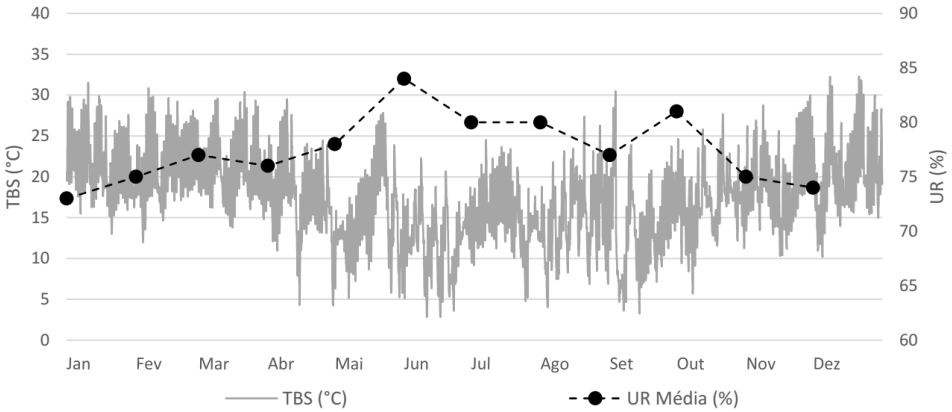
Fonte: adaptado de ABNT (2005).

Nos próximos parágrafos serão descritas as principais características climáticas das cidades de Bento Gonçalves-RS, Santa Maria-RS e Florianópolis-SC. Os dados apresentados foram extraídos dos arquivos climáticos “RS_Bento_Goncalves.epw”, “RS_Santa_Maria.epw” e “SC_Florianopolis.epw”, disponíveis em Roriz (2012).

- ZB1 e a cidade de Bento Gonçalves-RS

A cidade de Bento Gonçalves-RS, situada na latitude 29°10' sul, longitude de 51°31' oeste, possui 640m de altitude e representa no trabalho a Zona Bioclimática 1, a qual abrange também as regiões de altitude do sul do país que apresentam as temperaturas médias mensais mais baixas do Brasil, como é o caso da cidade de Curitiba-PR. O macroclima é classificado por Köppen como “Csb”, ou seja, um clima mediterrâneo, responsável por caracterizar regiões do país que apresentam maior proximidade com o clima temperado. Nesse clima, as estações são bem definidas e as amplitudes térmicas mensais muito elevadas, as quais facilmente excedem os 20°C. A temperatura média mensal ultrapassa os 20°C em três meses, e a média mínima mensal é de 13,3°C em maio. A Figura 5-4 ilustra a variação de temperatura ao longo do ano e a relação com a umidade do ar. Note-se que quanto menores as temperaturas maiores os valores da umidade relativa, ou seja, durante o verão a umidade relativa é mais baixa e no inverno mais alta.

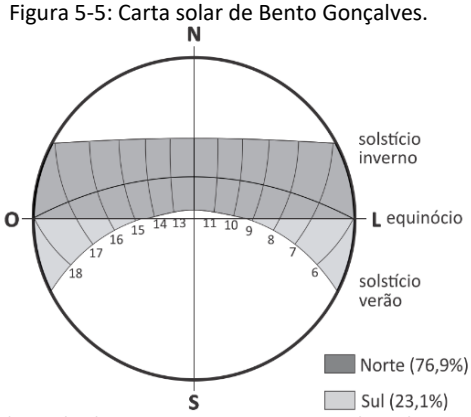
Figura 5-4: Gráfico da Temperatura de Bulbo Seco e Umidade Relativa.



Fonte: dados do arquivo RS_Bento_Goncalves.epw, Roriz (2012).

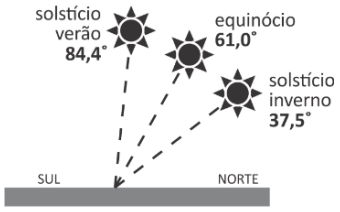
A latitude de Bento Gonçalves proporciona uma maior incidência de radiação solar direta ao norte durante o ano (76,9%) e menor ao sul (23,1%) (Figura 5-5). Ao meio-dia, a radiação solar direta incide em ângulos mais baixos no inverno e mais altos no verão (Figura 5-6).

Figura 5-5: Carta solar de Bento Gonçalves.



Fonte: adaptado do programa computacional Analysis Sol-Ar. LABEEE (2009).

Figura 5-6: Ângulos solares ao meio dia dos solstícios e do equinócio.

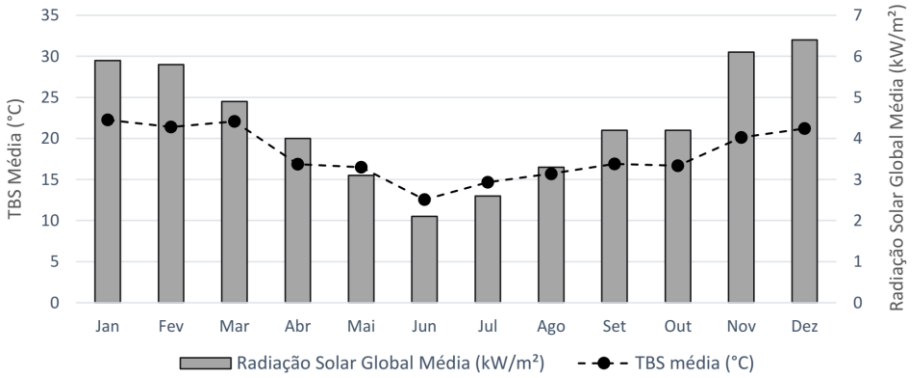


Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A Figura 5-7 ilustra a variação da radiação solar global[2] durante o ano em Bento Gonçalves, com a temperatura média do ar. A radiação solar é mais intensa no verão e menos intensa no inverno, influenciando diretamente a variação da temperatura média.

[2] A radiação solar global é toda e qualquer radiação solar que chega ao solo, resultado da soma da radiação solar direta mais a radiação solar difusa.

Figura 5-7: Gráfico da Temperatura de Bulbo Seco e Radiação Solar.



Fonte: dados do arquivo RS_Bento_Goncalves.epw, Roriz (2012).

A Tabela 5-1 e o Quadro 5-1 resumem, por fim, as principais informações climáticas de Bento Gonçalves.

Tabela 5-1: Dados climáticos mensais de Bento Gonçalves.

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
TBS mínima (°C)	13,0	12,0	13,8	4,2	5,2	2,8	4,8	4,0	3,3	5,7	10,3	10,2
TBS máxima (°C)	31,5	30,9	30,4	29,5	27,8	22,3	24,5	27,4	30,5	27,7	29,9	32,3
TBS média (°C)	22,3	21,4	22,1	16,9	16,5	12,5	14,7	15,7	16,9	16,7	20,1	21,2
UR média (%)	73	75	77	76	78	84	80	80	77	81	75	74
Velocidade vento média (m/s)	3,1	2,8	2,7	2,4	2,7	2,6	2,7	2,8	3,3	2,9	3,3	2,8
Radiação Solar Global Média (kW/m²)	5,9	5,8	4,9	4	3,1	2,1	2,6	3,3	4,2	4,2	6,1	6,4

Legenda: Maior valor Menor valor

Fonte: dados do arquivo RS_Bento_Goncalves.epw, Roriz (2012).

Quadro 5-1: Resumo dos dados climáticos de Bento Gonçalves.

Dados climáticos	Valores
Latitude / Longitude	29° 10'S /51° 31'O
Fuso horário	-3.0 horas GMT (*Greenwich Mean Time*)
Elevação (acima do nível do mar)	640m
TBS Máxima (ºC) / dia	33,0ºC / 21 de dezembro
TBS Mínima (ºC) / dia	2,0ºC /14 de setembro
Köppen Classificação[3]	Csb / Clima mediterrâneo (verão seco quente, inverno ameno)
ASHRAE Zona Climática	2A / Quente úmido
Zona Bioclimática NBR 15220	ZB 1

Fonte: dados do arquivo RS_Bento_Goncalves.epw, Roriz (2012) e ABNT (2005).

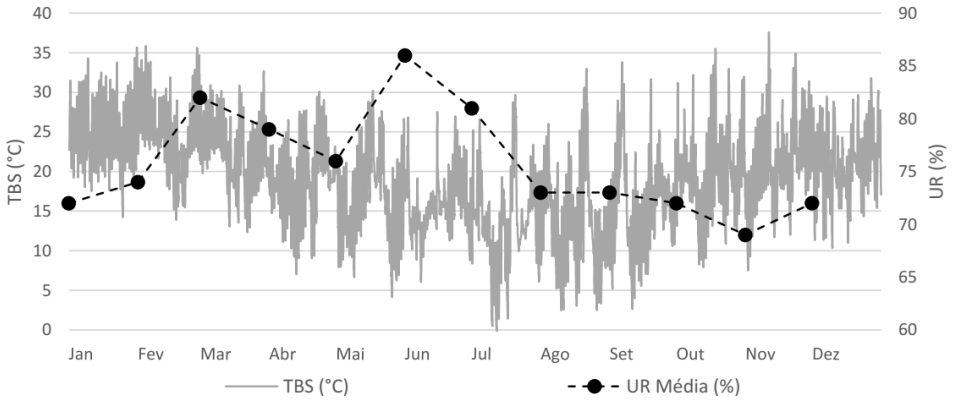
- ZB2 e a cidade de Santa Maria-RS

A cidade de Santa Maria-RS situa-se na latitude 29°40' sul, longitude de 53°48' oeste e possui 95m de altitude. Neste trabalho, essa cidade representa a Zona Bioclimática 2, que corresponde à maior

[3] A classificação climática de Köppen-Geiger, mais conhecida como classificação climática de Köppen, é o sistema de classificação global dos tipos climáticos mais utilizada em geografia, climatologia e ecologia.

parcela da Região Sul do país, com clima subtropical e engloba cidades como Pelotas-RS. As estações do ano são bem definidas, com ocorrência de temperaturas baixas no inverno. O macroclima é classificado por Köppen como “Cfa”, subtropical úmido, com verões úmidos. A temperatura média mais fria do ano é em julho, 14,7°C, e a mais quente é em janeiro, 25°C. A Figura 5-8 ilustra a variação de temperatura ao longo do ano e a relação com a umidade do ar média mensal.

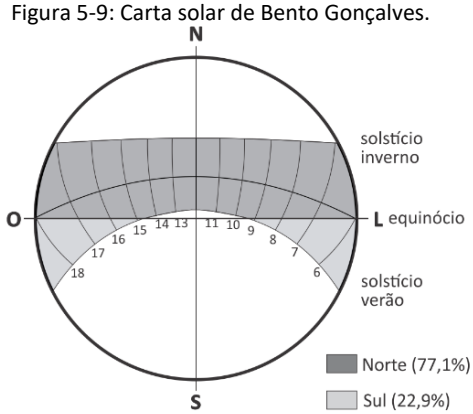
Figura 5-8: Gráfico da Temperatura de Bulbo Seco e Umidade Relativa.



Fonte: dados do arquivo RS_Santa_Maria.epw, Roriz (2012).

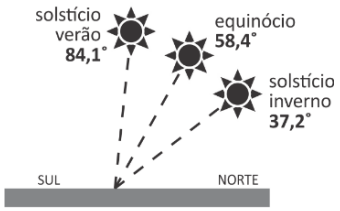
A latitude de Santa Maria proporciona uma maior incidência de radiação solar direta ao norte durante o ano (77,1%) e menor ao sul (22,9%) (Figura 5-9). Ao meio-dia, a radiação solar direta incide em um ângulo mais baixo no inverno e mais alto no verão (Figura 5-10).

Figura 5-9: Carta solar de Bento Gonçalves.



Fonte: adaptado do programa computacional Analysis Sol-Ar. LABEEE (2009).

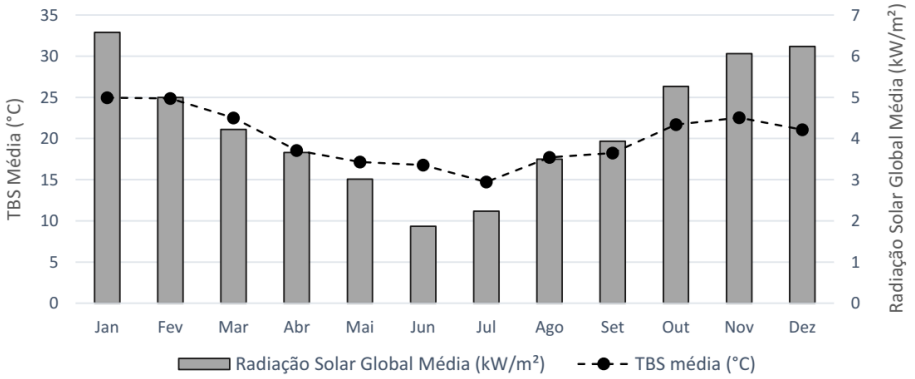
Figura 5-10: Ângulos solares ao meio dia dos solstícios e do equinócio.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A Figura 5-11 ilustra a variação da radiação solar global durante o do ano em Bento Gonçalves com a temperatura média do ar. A radiação solar é mais intensa no verão e menos intensa no inverno, influenciando diretamente na variação da temperatura média.

Figura 5-11: Gráfico da Temperatura de Bulbo Seco e Radiação Solar.



Fonte: dados do arquivo RS_Santa_Maria.epw, Roriz (2012).

A Tabela 5-2 e o Quadro 5-2 resumem as principais informações climáticas de Santa Maria.

Tabela 5-2: Dados climáticos mensais de Santa Maria.

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
TBS mínima (°C)	14,2	13,9	12,4	7,0	4,1	6,0	-0,2	2,5	2,6	7,9	7,5	10,4
TBS máxima (°C)	35,7	35,8	32,7	30,1	30,2	27,5	29,6	33,0	33,8	35,5	37,6	31,8
TBS média (°C)	25,0	24,9	22,5	18,6	17,2	16,8	14,7	17,7	18,2	21,7	22,5	21,1
UR média (%)	72	74	82	79	76	86	81	73	73	72	69	72
Vento velocidade média (m/s)	1,6	1,5	1,7	2	1,8	1,8	2,4	2,2	2,5	2,3	2,3	2,5
Radiação Solar Global Média (kW/m²)	6,6	5,0	4,2	3,7	3,0	1,9	2,2	3,5	3,9	5,3	6,1	6,2

Legenda: Maior valor Menor valor

Fonte: dados do arquivo RS_Santa_Maria.epw, Roriz (2012).

Quadro 5-2: Resumo dos dados climáticos de Bento Gonçalves.

Dados climáticos	Valores
Latitude / Longitude	29°40' Sul / 53°48' Oeste
Fuso horário	-3.0 horas GMT (*Greenwich Mean Time*)
Elevação (acima do nível do mar)	95m
TBS Máxima (ºC) / dia	37,6ºC / 11 de novembro
TBS Mínima (ºC) / dia	-0,2ºC /12 de julho
Köppen Classificação	Cfa / Clima subtropical úmido
ASHRAE Zona Climática	3A / Quente úmido
Zona Bioclimática NBR 15220	ZB 2

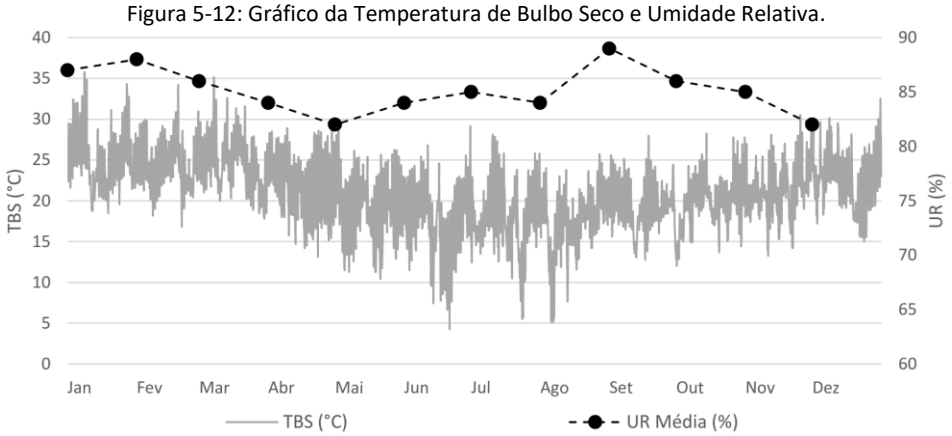
Fonte: Fonte: dados do arquivo RS_Santa_Maria.epw, Roriz (2012) e ABNT (2005).

- ZB3 e a cidade de Florianópolis-SC

A cidade de Florianópolis-SC, situada na latitude 27°35' sul, longitude 48°32' oeste, representa no trabalho a Zona Bioclimática 3, a mesma da cidade de Porto Alegre-RS. Florianópolis apresenta uma altitude de 7m e é classificada, de acordo com Köppen, como “Cfa”, clima subtropical úmido, com estações bem definidas, verões quentes e invernos frios, sendo o outono e a primavera de características semelhantes e amplitudes térmicas mensais elevadas, que facilmente excedem os 10ºC.

A temperatura média mensal ultrapassa os 20°C em cinco meses, e a média mínima mensal é de 16,7°C. A Figura 5-12 ilustra a variação da temperatura ao longo do ano e a relação com a umidade do ar.

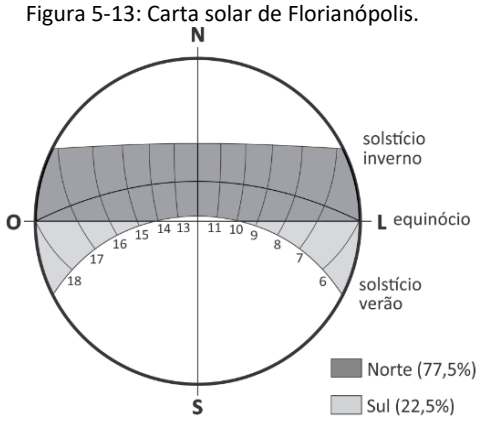
Figura 5-12: Gráfico da Temperatura de Bulbo Seco e Umidade Relativa.



Fonte: dados do arquivo SC_Florianopolis.epw, Roriz (2012).

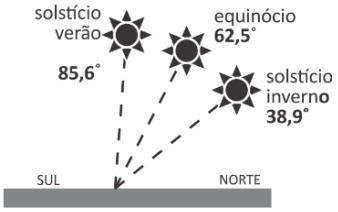
A latitude de Florianópolis proporciona uma maior incidência da radiação solar direta ao norte durante o ano (77,5%) e menor ao sul (22,5%) (Figura 5-13). Ao meio-dia, a radiação solar direta incide em um ângulo mais baixo no inverno e mais alto no verão (Figura 5-14).

Figura 5-13: Carta solar de Florianópolis.



Fonte: adaptado do programa computacional Analysis Sol-Ar. LABEEE (2009).

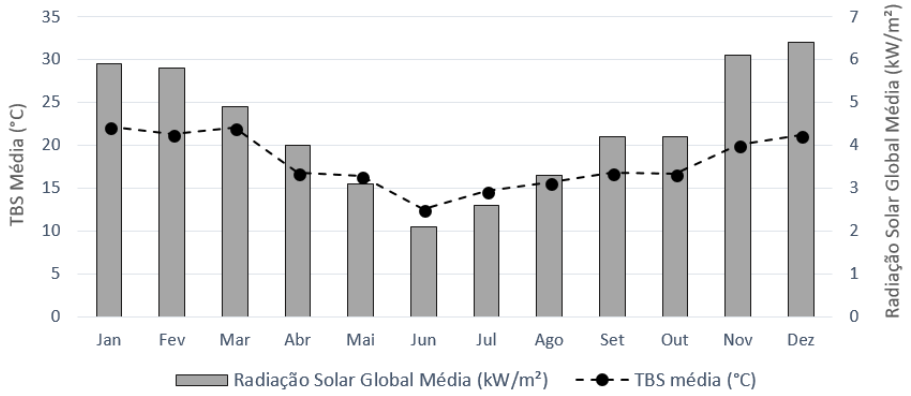
Figura 5-14: Ângulos solares ao meio dia dos solstícios e do equinócio.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A Figura 5-15 ilustra a variação da radiação solar global durante o do ano em Florianópolis em comparação com a temperatura média do ar. A radiação solar é mais intensa no verão e menos acentuada no inverno, influenciando diretamente a variação da temperatura média mensal.

Figura 5-15: Gráfico da Temperatura de Bulbo Seco e Radiação Solar.



Fonte: dados do arquivo SC_Florianopolis.epw, Roriz (2012).

A Tabela 5-3 e o Quadro 5-3 apresentam o resumo de alguns dados climáticos de Florianópolis.

Tabela 5-3: Dados climáticos mensais de Florianópolis.

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
TBS mínima (°C)	18,5	16,8	17,8	13,1	10,5	4,3	5,5	5,2	12,0	12,0	13,2	15,0
TBS máxima (°C)	35,8	34,2	35,2	28,9	28,6	29,2	28,1	25,7	28,0	28,2	30,5	32,5
TBS média (°C)	27,1	25,5	26,5	21,0	19,5	16,7	16,8	15,4	20,0	20,1	21,9	23,8
UR média (%)	87	88	86	84	82	84	85	84	89	86	85	82
Velocidade vento média (m/s)	3,5	2,6	3,0	2,3	2,6	2,5	2,6	3,0	2,8	3,3	3,4	3,4
Radiação Solar Global Média (kW/m²)	6,3	5,8	4,2	4,6	3,5	3,0	2,7	3,2	3,2	3,7	4,6	5,2

Legenda: Maior valor Menor valor

Fonte: dados do arquivo SC_Florianopolis.epw, Roriz (2012).

Quadro 5-3: Resumo dos dados climáticos de Florianópolis.

Dados climáticos	Valores
Latitude / Longitude	27° 40' S /48° 32' O
Fuso horário	-3.0 horas GMT (*Greenwich Mean Time*)
Elevação (acima do nível do mar)	7m
TBS Máxima (°C) / dia	36,0°C /8 de janeiro
TBS Mínima (°C) / dia	4,0 °C/21 de junho
Köppen Classificação	Cfa /subtropical úmido
ASHRAE Zona Climática	2A / quente úmido
Zona Bioclimática NBR 15220	ZB 3

Fonte: Fonte: dados do arquivo SC_Florianopolis.epw, Roriz (2012) e ABNT (2005).

5.2.2 Definições das edificações referenciais

Conforme visto anteriormente, no item 1.2, a adoção de edificações unifamiliares para o estudo de caso foi baseada principalmente em dois fatores: primeiramente, no alto consumo energético despendido por essas edificações e, em segundo lugar, pelo fato de a maioria das moradias no Brasil ser classificada enquanto unifamiliar. As edificações no Brasil representam 50,8% do consumo de energia elétrica, e, destes, o setor residencial é o maior consumidor, responsável pelo consumo de

25,5% (EPE, 2018). Entre as edificações residenciais, os edifícios unifamiliares constituem 84% dos domicílios brasileiros da Região Sul do país (ELETROBRAS, 2007a).

Para cada cidade foi utilizada uma edificação referencial para realizar o estudo de caso. Os critérios de seleção das edificações referenciais estão descritos no início do item 5.2.

Considerando esse quadro, para a ZB1, na cidade de Bento Gonçalves, foi selecionada a edificação "Casa Bertolini", projetada em 2006 e construída em 2008 pelo escritório Studioparalelo + MAAM; para a ZB2 foi selecionada a "Residência J15", projetada em 2015 e construída em 2016 pelo escritório Mowa Arquitectura, enquanto que para a ZB3, na cidade de Florianópolis, foi selecionada a edificação "Residência das Algas", projetada em 2012 e construída em 2014 pelo MarchettiBonetti+ Arquitetos Associados. As edificações foram denominadas, respectivamente, como Residência ZB1, Residência ZB2 e Residência ZB3. O Quadro 5-4 resume as informações sobre as edificações escolhidas para cada ZB.

Quadro 5-4: Zona Bioclimática e edificações em estudo.

Zona Bioclimática	Cidade Adotada	Edificação Escolhida	Nomenclatura adotada	Fotos	
ZB1	Bento Gonçalves/RS	Casa Bertolini	Residência ZB1		[1]
ZB2	Santa Maria/RS	Residência J15	Residência ZB2		[2]
ZB3	Florianópolis/SC	Residência das Algas	Residência ZB3		[3]

Fonte: [1] Fracalossi (2012a). Foto: Eduardo Aigner; [3] Mowaarq (2017), [3] Marchetti Bonetti (2015). Foto: Philippe Arruda.

As três edificações apresentam estratégias passivas básicas, possuem orientação solar predominante dos ambientes de permanência prolongada no eixo leste/oeste, fator de forma ≤ 3 (ver item 3.3) e utilizam elementos de controle solar externos, como marquises, brises, beirais, entre outros. As Residências ZB1 e ZB3 têm suas plantas, cortes e fachadas disponibilizados no site ArchDaily[4]. Nesses dois casos, os materiais construtivos foram definidos por meio da análise dos desenhos e figuras disponibilizadas. A Residência ZB2 teve os projetos e o memorial descritivo fornecidos pelo escritório

[4] Residência ZB1 disponível em: https://www.archdaily.com.br/br/01-17352/casa-bertolini-studioparalelo-mais-maam e Residência ZB3 disponível em: https://www.archdaily.com.br/br/760067/residencia-das-algas-marchettibonetti

de arquitetura responsável pelo seu desenvolvimento. A Tabela 5-4 apresenta os critérios observados para a definição das edificações referenciais.

Tabela 5-4: Critérios atendidos para definição das edificações referenciais.

Edificações	Critérios						
	1	2	3	4			5
	ZB	Dados climático em formato EPW[5]	Projeto/ construção	Estratégias passivas básicas			Disponibilidade de informações
				4.1	4.2	4.3	
Residência ZB1	1	RS_Bento_Goncalves.epw	2006/2008	Eixo leste/oeste	1,49	Sim	Sim*
Residência ZB2	2	RS_Santa_Maria.epw	2015/2016	Eixo leste/oeste	2,17	Sim	Sim**
Residência ZB3	3	SC_Florianopolis.epw	2012/2014	Eixo leste/oeste	2,72	Sim	Sim*

4.1 = Orientação solar;
4.2 = Fator de forma (FF) – ver detalhe em Apêndice B;
4.3 = Elemento de controle solar externo. ZB1 possui marquise a norte; ZB2 possui volumes em balanço e superfície curva externa e a ZB3 possui painéis verticais móveis, lona tencionada, marquises e volumes em balanço.
* informações de projeto disponíveis no site ArchDaily.
** informações de projeto arquitetônico e memorial descritivo disponibilizados pelo escritório responsável.
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

5.2.3 As Residências ZB1, ZB2 e ZB3 e a descrição das soluções construtivas

- Residência ZB1

A Residência ZB1 conta com um pavimento principal e um subsolo. No pavimento principal são desenvolvidas as principais atividades da residência, composta por três suítes, sala de estar integrada com a cozinha, uma lavanderia e um lavabo. No subsolo, encontra-se a garagem e uma pequena adega.

A edificação é basicamente um prisma retangular alongado no eixo leste/oeste (Figura 5-16). A fachada sul é voltada para a via pública e não possui beiral, tendo um menor percentual de fechamentos transparentes do que a fachada norte, a qual aproveita os melhores visuais com grandes panos envidraçados protegidos pelo beiral da varanda (Figura 5-17).

Figura 5-16: Fachada principal, sul.

Fonte: Fracalossi (2012a). Foto: Eduardo Aigner.

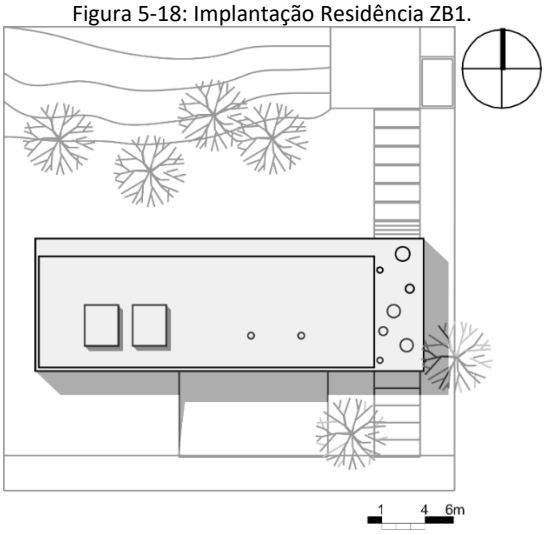
Figura 5-17: Fachada dos fundos, norte.

Fonte: Fracalossi (2012a). Foto: Eduardo Aigner.

[5] Dados disponíveis em: RORIZ. M. **Base de dados climáticos de 411 municípios brasileiros**: Arquivos em formato de EPW (*Energyplus Weather Data*). 2012. Disponível em: http://www.roriz.eng.br/epw_9.html. Acesso em: 10 de jun. 2018.

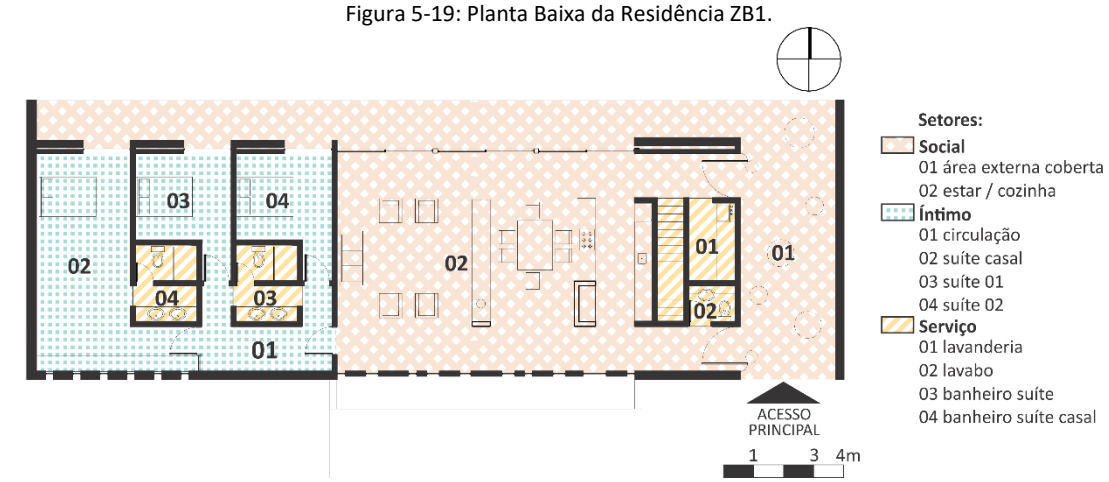
As Figuras 5-18 e 5-19 apresentam a implantação e as plantas baixas da Residência ZB1.

Figura 5-18: Implantação Residência ZB1.

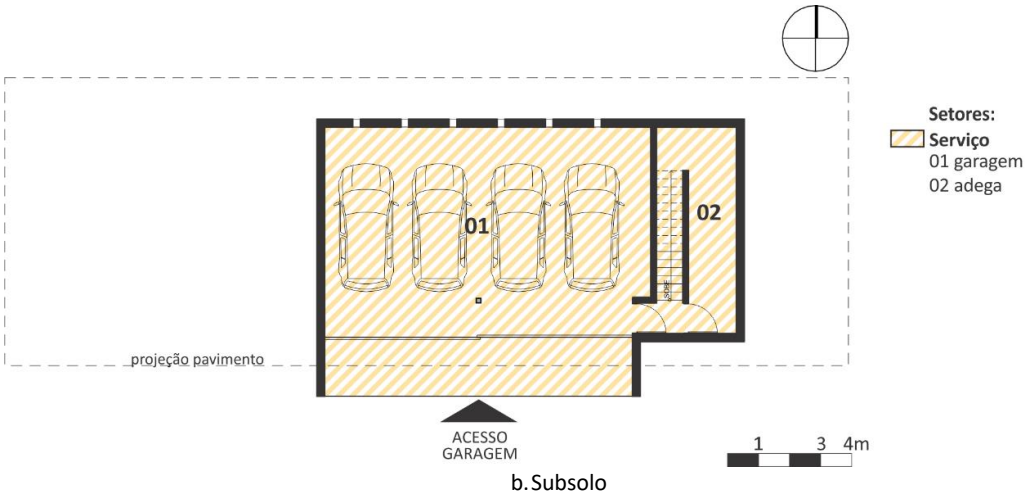


Fonte: adaptado de Fracalossi (2012a).

Figura 5-19: Planta Baixa da Residência ZB1.



a. Térreo



b. Subsolo

Fonte: adaptado de Fracalossi (2012a).

A Tabela 5-5 indica os valores de compacidade e o fator de forma da Residência ZB1. Informações mais detalhadas estão disponíveis no Apêndice B.

Tabela 5-5: Compacidade e Fator de Forma da Residência ZB1*.

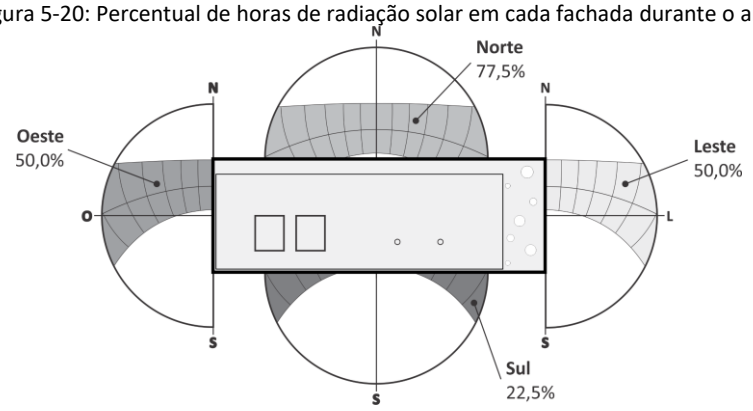
Envoltória** (Ae) (m^2)	Área Útil Interna (Au) (m^2)	Volume (V) (m^3)	Compacidade (Ae/V) (/m)	Fator de Forma (Ae/Au) (adimensional)
397,36	253,90	677,99	0,58	1,49

*não foi contabilizado as áreas cobertas abertas; **não contabilizado a platibanda.
Ae = área; V = Volume; Au = Área útil.

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Na Figura 5-20 é apresentado, por meio da carta solar, o percentual de horas de incidência de radiação solar em cada fachada, bem como a época do ano e o horário que recebe essa incidência. É possível perceber que a fachada norte recebe um número maior de horas de radiação solar (77,5%), ao passo que a fachada sul recebe menos (22,5%). Enquanto a fachada norte recebe a incidência da radiação solar em todas as épocas do ano, a fachada sul recebe somente no período do verão, no início da manhã e final da tarde. Como a edificação está implantada perpendicularmente ao eixo norte, a incidência de radiação solar nas fachadas leste e oeste é igual.

Figura 5-20: Percentual de horas de radiação solar em cada fachada durante o ano.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Os materiais construtivos do projeto arquitetônico que foram utilizados para a simulação computacional são apresentados de forma resumida na Tabela 5-6 e de forma completa no Apêndice C. Os valores de condutividade térmica, densidade de massa aparente, calor específico e absortância solar foram obtidos na NBR 15220 (ABNT, 2005). Os valores da Resistência Térmica, Transmitância e Capacidade Térmica foram calculados. O mesmo procedimento foi adotado para as Residências ZB2 e ZB3.

Tabela 5-6: Resumo das propriedades dos materiais da Residência ZB1.

Elementos construtivos		**Rt** (m²/W.°C)	**U** (W/(m².°C))	**CT** (kJ/m²K)	**α*** (adim.)
Cobertura	Telha metálica com Poliuretano e Laje de Concreto com reboco	1,49	0,67	250,50	0,25
Laje entrepiso social	Laminado Madeira com EPS, Contrapiso (arg.), Laje Concreto e Reboco (arg.)	0,36	2,76	295,16	0,9
Laje entrepiso serv.	Porcelanato com EPS, Contrapiso (arg.), Laje Concreto e Reboco (arg.)	0,36	2,76	308,46	0,2
Laje Subsolo	Porcelanato com EPS, Contrapiso (arg.) e Laje de Concreto	0,34	2,90	271,68	0,2
Paredes Ext. Dupla	Parede dupla de Tij. cer. 6 furos 9x14x24 com camada de ar e reboco na face externa e interna	0,79	1,27	195,00	0,2
Parede Ext. Concreto	Concreto	0,34	2,93	660,00	0,85
Paredes Ext. simples	Tij. cer. 6 furos 14x9x24 rebocado nas duas faces	0,49	2,11	146,00	0,2
Paredes Int.	Tij. cer. 6 furos 9x14x24 rebocado nas duas faces	0,37	2,72	98,00	0,2
Portas	Madeira	0,42	2,38	27,6	0,7
Janelas**	Vidro duplo incolor (6 + 14 + 4mm)	0,36	2,8	-	0,1

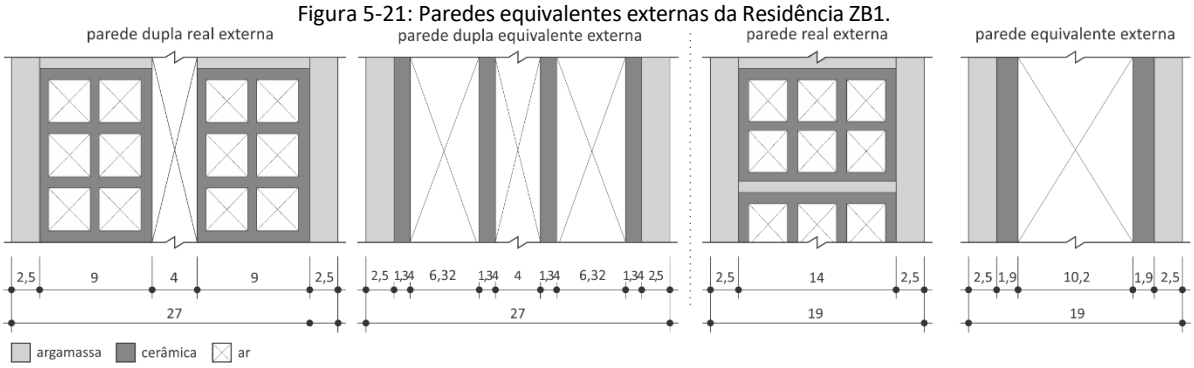
Rt=Resistência Térmica; U=Transmitância Térmica; CT= Capacidade Térmica; α=Absortância Solar.
*tipo de superfície correspondente aos valores: 0,25 = chapa de aço galvanizada (nova e brilhante); 0,9 = cor de madeira; 0,2 = pintura ou revestimento branco; 0,7 = cor de madeira; 0,1 = vidro incolor; 0,85 = concreto aparente.
**FS = 0,75.

Fonte: dados calculados com base na ABNT (2005).

As janelas apresentam diferentes percentuais de iluminação e ventilação, conforme apresentado no Apêndice D. Para fins de simplificação da simulação, os descontos de área das esquadrias não foram considerados.

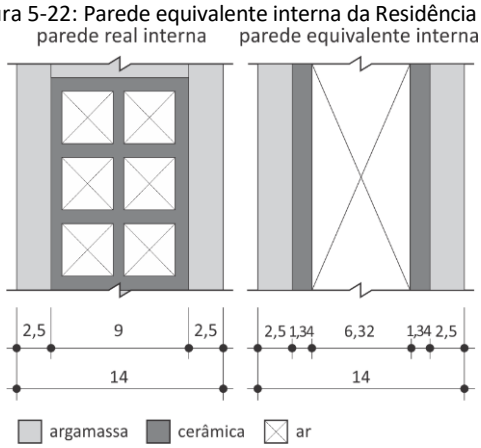
Dado que o programa *EnergyPlus* entende que os fechamentos são compostos por camadas homogêneas, é necessário criar uma parede equivalente com as mesmas propriedades térmicas da parede real heterogênea. Para a determinação das paredes equivalentes deste trabalho, foi utilizada como referência a biblioteca desenvolvida pelo LABEEE (WEBER *et al.*, 2017). As Figuras 5-21 e 5-22 ilustram as paredes reais e suas respectivas paredes equivalentes utilizadas para a simulação.

Figura 5-21: Paredes equivalentes externas da Residência ZB1.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Figura 5-22: Parede equivalente interna da Residência ZB1.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A área transparente da Residência ZB1 corresponde a 24,57% da área total das fachadas, sendo a fachada norte a que possui maior área transparente, conforme a Tabela 5-7 demonstra. As janelas voltadas ao sul são desprotegidas da radiação solar, enquanto que aquelas voltadas ao norte são protegidas pela marquise da varanda.

Tabela 5-7: Dados da envoltória do projeto.

	Norte N	**Leste** N	**Sul** N	**Oeste** N	**Total**
Área total da fachada (m²)	75,65	23,09	91,89	23,09	**213,71**
Área transparente (m²)	38,58	1,76	12,17	0,00	**52,52**
Percentual elemento transparente (%)	51,00	7,62	13,25	51,00	**24,57**
Elemento de controle solar externo	Sim*	Sim**	não	não	**-**

*marquise horizontal; **parede e cobertura

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

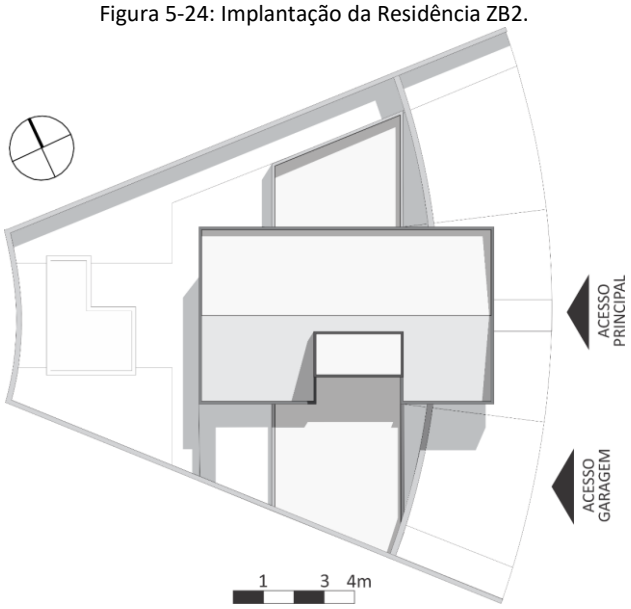
- Residência ZB2

A Residência ZB2 é constituída por dois pavimentos. O térreo tem a função social e de serviço, com uma sala, cozinha, varanda e churrasqueira, além da garagem. No pavimento superior, encontra-se a parte íntima da edificação, com quatro suítes, sendo uma dessas para hóspedes. A orientação do pavimento superior da edificação, o setor íntimo, é no sentido norte-sul, enquanto que o pavimento térreo possui orientação predominante leste e oeste. A residência apresenta elementos de controle solar externos como uma parede curva a leste e volumes em balanço a leste e norte (Figuras 5-23, 5-24 e 5-25). A distribuição interna dos espaços privilegia a orientação solar dos ambientes de permanência prolongada a norte e leste, como as suítes e a sala de estar e jantar.

Figura 5-23: Fachada principal, leste.

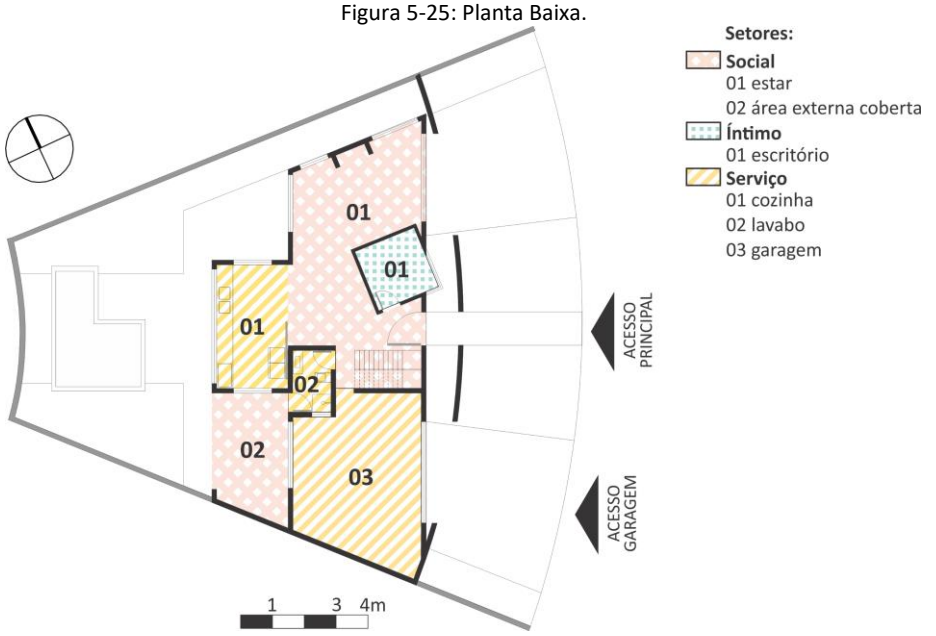
Fonte: Mowaarq (2017).

Figura 5-24: Implantação da Residência ZB2.

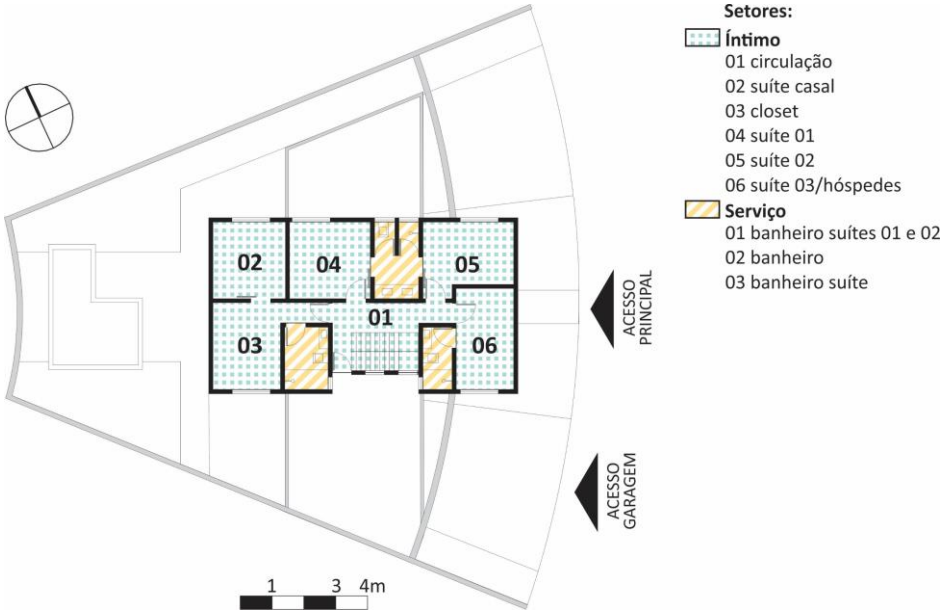


Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Figura 5-25: Planta Baixa.



a. Térreo



b. Primeiro piso

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A Tabela 5-8 apresenta os valores de compacidade e do fator de forma encontrados para a Residência ZB2. Informações mais detalhadas estão disponíveis no Apêndice B.

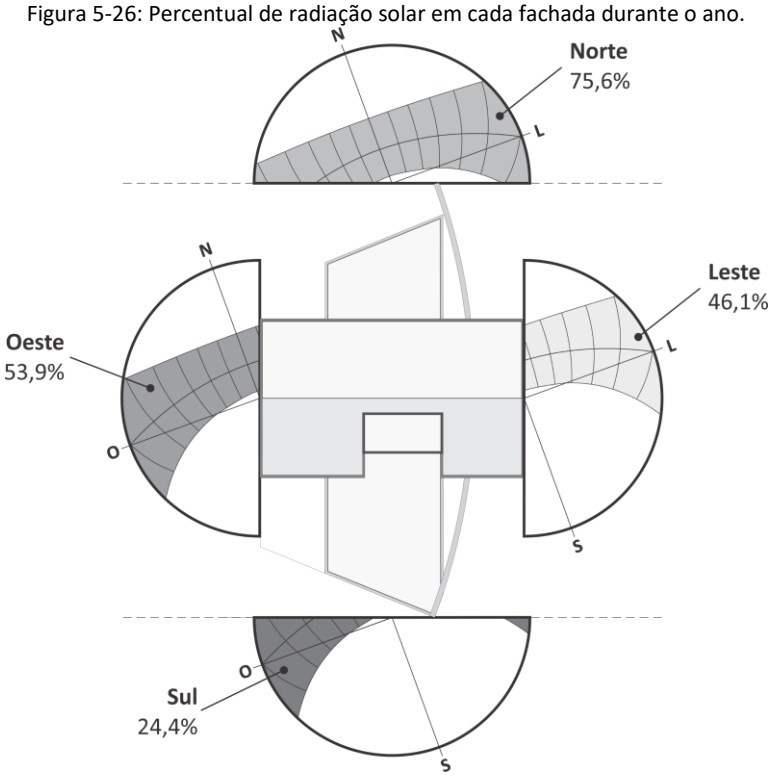
Tabela 5-8: Compacidade e Fator de Forma da Residência ZB3.

Envoltória* (Ae) (m^2)	Área Útil Interna (Au) (m^2)	Volume (V) (m^3)	Compacidade (Ae/V) (/m)	Fator de Forma (Ae/Au) (adimensional)
514,14	236,02	690,72	0,74	2,17

* não contabilizado a platibanda.
Ae = área; V = Volume; Au = Área útil.
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A fachada norte recebe maior incidência solar durante o ano (75,6%) e a sul recebe menos radiação solar (24,4%), sendo que desta a maioria incide no período da tarde. A fachada oeste (53,9%) tem maior incidência do que a fachada leste (46,1%) (Figura 5-26).

Figura 5-26: Percentual de radiação solar em cada fachada durante o ano.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Os materiais construtivos do projeto arquitetônico que foram utilizados para a simulação computacional são apresentados resumidamente na Tabela 5-9 e de forma completa no Apêndice C.

Tabela 5-9: Resumo das propriedades dos materiais da Residência ZB2.

Elementos construtivos		**Rt** (m²/W.°C)	**U** (W/(m².°C))	**CT** (kJ/m²K)	**α*** (adim.)
Cobertura	Telha metálica com Poliuretano e Laje de Concreto com placas de gesso	1,72	0,58	233,82	0,25
Terraço	Porcelanato com EPS, Contrapiso (arg.), impermeabilização, Laje Concreto e placas de gesso	0,37	2,73	333,75	0,2
Laje Térreo (estar/escrit.)	Tabuão com EPS, Contrapiso (arg.) e Laje de Concreto	0,36	2,78	265,80	0,9
Laje Térreo (ban./coz./gar.)	Porcelanato, Contrapiso (arg.) e Laje de Concreto	0,23	4,35	272,73	0,2
Laje entrepisos (dorm./circ.)	Laminado de Madeira com EPS, Contrapiso (arg.), impermeabilização, Laje Concreto e placas de gesso	0,58	1,71	269,30	0,9
Laje entrepisos (ban.)	Porcelanato, Contrapiso (arg.), impermeabilização, Laje Concreto e placas de gesso	0,47	2,13	279,45	0,2
Parede Ext. Dupla	Parede dupla de Tij. cer. 6 furos 9x14x24 com camada de ar e reboco na face externa e interna	0,79	1,27	195	0,2
Parede Int. Simples	Tij. cer. 6 furos 9x14x24 rebocado nas duas faces	0,37	2,72	98	0,2
Portas	Madeira	0,42	2,38	27,6	0,7
Janelas**	Vidro lam. incolor 8 mm (4+4)	0,18	5,67	6,3	0,1

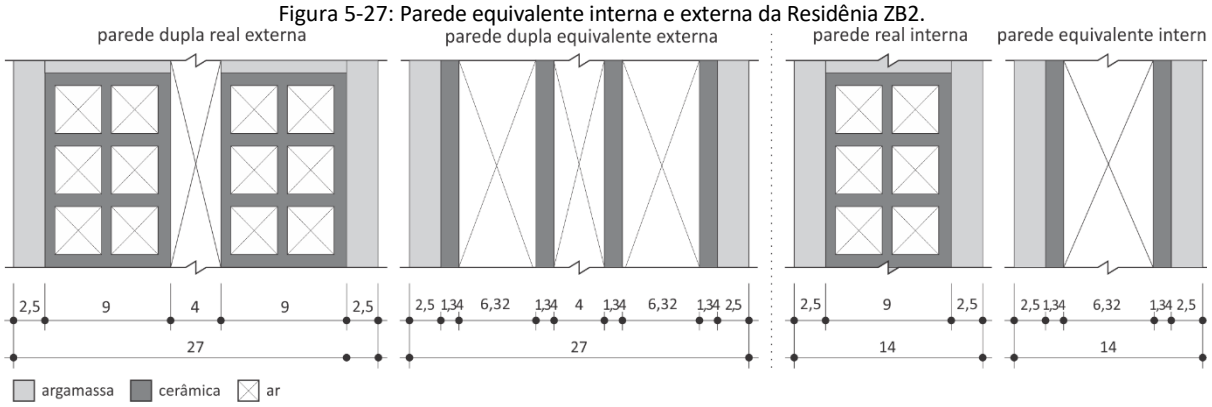
Rt=Resistência Térmica; U=Transmitância Térmica; CT= Capacidade Térmica; α=Absortância Solar.
*tipo de superfície correspondente aos valores: 0,25 = chapa de aço galvanizada (nova e brilhante); 0,9 = cor de madeira; 0,2 = pintura ou revestimento branco; 0,7 = cor de madeira; 0,1 = vidro incolor.
**FS=0,44

Fonte: dados calculados com base na ABNT (2005).

As janelas exibem diferentes percentuais de iluminação e ventilação, conforme apresentado no Apêndice D. Para fins de simplificação da simulação, os descontos de área das esquadrias não foram considerados, assim como proposto para a Residência ZB1.

As paredes externas e internas tiveram uma homogenia equivalente, com as mesmas propriedades térmicas (Figura 5-27).

Figura 5-27: Parede equivalente interna e externa da Residênia ZB2.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A área transparente corresponde a 15,09% da área total das fachadas da edificação, conforme a Tabela 5-10 indica. As janelas voltadas para o sul são desprotegidas da radiação solar, enquanto que as fachadas ao norte, leste e oeste contêm elementos arquitetônicos que protegem as áreas transparentes da radiação solar direta.

Tabela 5-10: Dados da envoltória do projeto.

	Norte	**Leste**	**Sul**	**Oeste**	**Total**
Área total da fachada (m²)	73,23	86,63	73,23	72,85	**305,94**
Área transparente (m²)	16,19	11.32	10,89	7,76	**46,17**
Percentual elemento transparente (%)	22,11	13,07	14,87	10,66	**15,09**
Elemento de controle solar externo	Sim*	Sim**	não	Sim***	-

*balanço pavimento superior; **balanço pavimento superior e parede externa curva; ***balanço pavimento superior e cobertura área externa.

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

- Residência ZB3

A Residência ZB3 é constituída por dois pavimentos, sendo o térreo voltado para a função predominante social, com uma sala, cozinha e varanda com churrasqueira integrada. No pavimento superior, encontra-se a parte íntima, com três suítes. A suíte principal tem aberturas para norte e oeste protegidas por um painel móvel de madeira e, além disso, é integrada a um terraço. As outras duas suítes são voltadas para o leste, e têm suas aberturas protegidas não apenas por um painel móvel de madeira, como também pela sacada.

A edificação foi construída com orientação principal no sentido norte-sul, havendo um pequeno volume voltado para leste-oeste (Figura 5-28 e 5-29).

Figura 5-28: Fachada principal, leste.

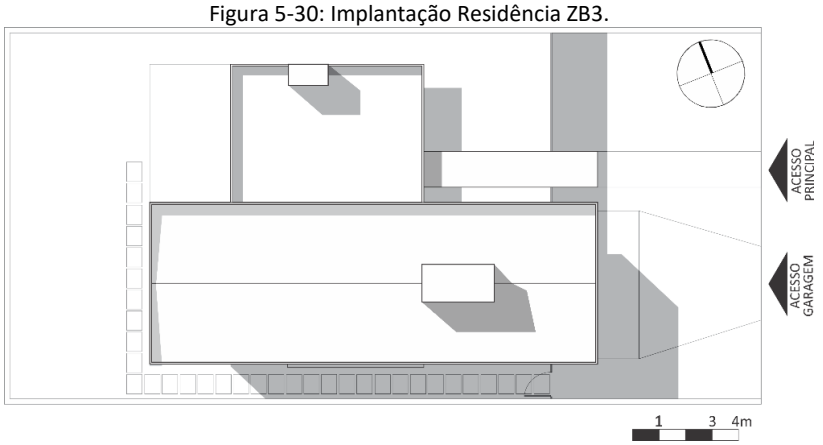
Fonte: Marchetti Bonetti (2015). Foto: Philippe Arruda.

Figura 5-29: Fachada fundos, oeste.

Fonte: Marchetti Bonetti (2015). Foto: Philippe Arruda.

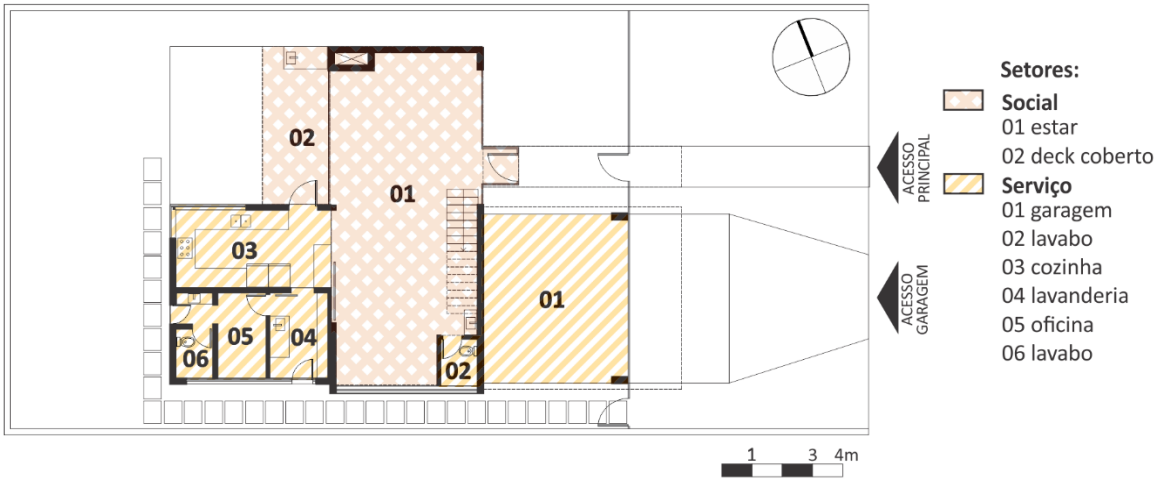
As Figuras 5-30 e 5-31 apresentam a implantação e as plantas baixas da Residência ZB1, respectivamente.

Figura 5-30: Implantação Residência ZB3.

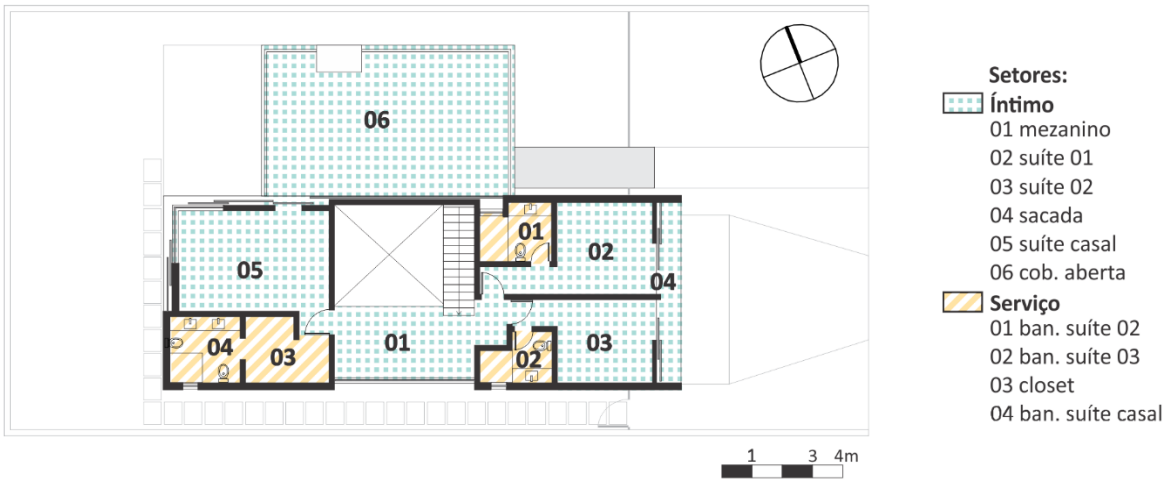


Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Figura 5-31: Planta Baixa.



a. Térreo



b. Primeiro piso

Fonte: adaptado de Marchetti Bonetti (2015).

A Tabela 5-11 apresenta os valores de compacidade e do fator de forma da Residência ZB3. Informações mais detalhadas estão disponíveis no Apêndice B.

Tabela 5-11: Compacidade e Fator de Forma da Residência ZB3.

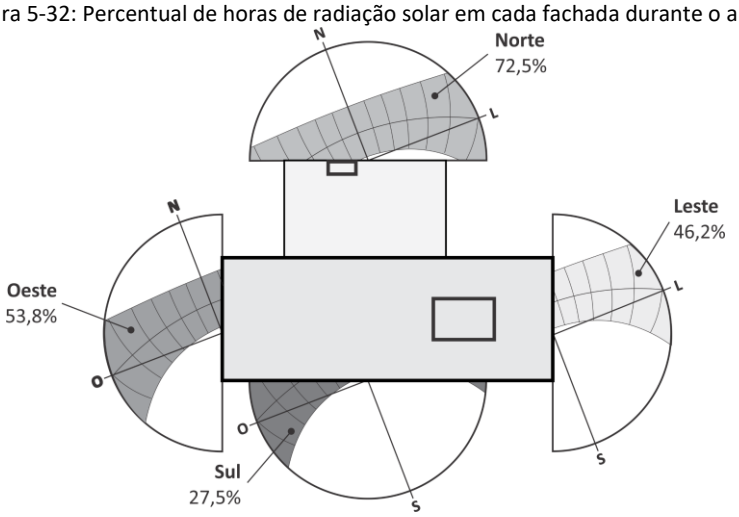
Envoltória* (Ae) (m²)	Área Útil Interna (Au) (m²)	Volume (V) (m³)	Compacidade (Ae/V) (/m)	Fator de Forma (Ae/Au) (adimensional)
453,16	166,47	550,22	0,82	2,72

* não contabilizado a platibanda.
Ae = área; V = Volume; Au = Área útil.

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A Figura 5-32 ilustra a implantação da edificação com a plotagem da carta solar, apresentando o percentual de horas de radiação solar direta incidente durante o ano em cada fachada, os períodos e o horário da incidência solar durante o ano. A fachada norte é a que recebe mais horas de radiação solar direta durante o ano (72,5%), porém, no final da tarde, recebe radiação apenas no período do inverno. A fachada sul é a que recebe menos horas de incidência de radiação direta solar (27,5%), sendo grande parte no período da tarde.

Figura 5-32: Percentual de horas de radiação solar em cada fachada durante o ano.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Os materiais construtivos do projeto arquitetônico que foram utilizados para a simulação computacional são apresentados de forma resumida na Tabela 5-12. O Apêndice C descreve as propriedades dos materiais construtivos de forma completa.

Tabela 5-12: Resumo das propriedades dos materiais da Residência ZB3.

Elementos construtivos		**Rt** (m²/W.°C)	**U** (W/(m².°C))	**CT** (kJ/m²K)	**α*** (adim.)
Cobertura	Telha metálica com Poliuretano e Laje de Concreto com reboco	1,49	0,67	263,10	0,25
Terraço	Madeira, camada de ar, arg., impermeabilização, Laje de Concreto e Reboco (arg.)	0,69	1,46	377,34	0,9
Parede Ext. Simples	Tij. cer. 6 furos 14x9x19 rebocado nas faces externas e internas	0,49	2,02	192,00	0,2
Parede Int. Simples	Tij. cer. 6 furos 9x14x19 rebocado nas faces externas e internas	0,40	2,48	159,00	0,2
Laje externa (em contato com solo)	Porcelanato, Contrapiso (arg.) e Laje de Concreto	0,25	4,30	308,73	0,2
Laje entrepiso	Porcelanato, Contrapiso (arg.), Laje de Concreto e Reboco (arg.)	0,23	4,04	272,73	0,2
Portas	Madeira	0,42	2,38	27,60	0,7
Janelas**	Vidro simples incolor	0,0036	5,7	6,30	0,1

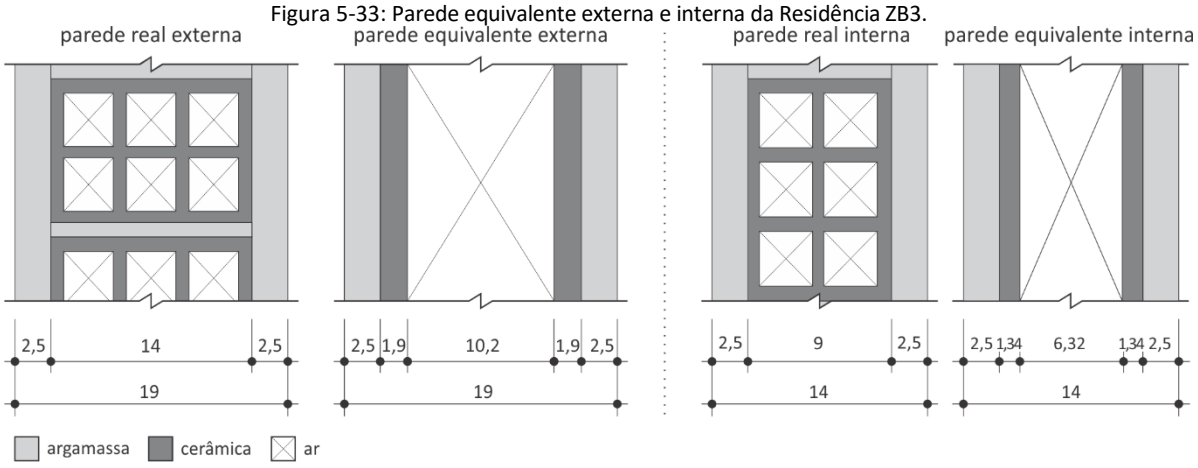
Rt=Resistência Térmica; U=Transmitância Térmica; CT= Capacidade Térmica; α=Absortância Solar.
*tipo de superfície correspondente aos valores: 0,25 = chapa de aço galvanizada (nova e brilhante); 0,9 = cor de madeira; 0,2 = pintura branca; 0,7 = cor de madeira; 0,1 = vidro incolor.
**FS= 0,87.

Fonte: dados calculados com base na ABNT (2005).

As janelas exibem diferentes percentuais de iluminação, conforme apresentado no Apêndice D. Para fins de simplificação da simulação computacional realizada posteriormente, não foi considerado o desconto de área das esquadrias.

Para que a simulação no programa *EnergyPlus* fosse possível, as paredes internas e externas tiveram uma homogenia correspondente equivalente, de modo que as propriedades térmicas fossem mantidas (Figura 5-33).

Figura 5-33: Parede equivalente externa e interna da Residência ZB3.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

O maior percentual de área transparente está localizado na fachada leste, correspondendo a 29,32%. As janelas voltadas para o sul são desprotegidas da radiação solar, enquanto que ao norte, leste e oeste, as janelas contêm algum elemento de proteção solar externo (Tabela 5-13).

Tabela 5-13: Dados da envoltória do projeto.

	Norte	**Leste**	**Sul**	**Oeste**	**Total**
Área total da fachada (m²)	93,55	59,71	93,55	59,71	**306,53**
Área transparente (m²)	9,10	17,51	12,57	16,00	**55,18**
Percentual elemento transparente (%)	9,73	29,32	13,44	26,79	**18,00**
Elemento de controle solar externo	Sim*	Sim**	não	Sim***	-

*beirais avançados, painel vertical móvel e lona tensionada; ** varanda e painel vertical móvel; *** marquise e painel vertical móvel.

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

5.3 ETAPA 3: MODELAGEM DA GEOMETRIA E CONFIGURAÇÃO DOS PARÂMETROS PARA SIMULAÇÃO

A modelagem das Residências ZB1, ZB2 e ZB3 foi realizada no programa computacional *SketchUp* v. 2017 *Make*, com o uso do *plugin Euclid* v. 0.9.3. Durante a modelagem, os principais elementos construtivos da edificação já foram definidos: paredes internas e externas (*interior* e *exterior wall*); teto (*ceiling*); cobertura (*roof*), janelas internas e externas (*interior* e *exterior window*); portas internas e externas (*interior* e *exterior door*); piso interno e externo (*interior* e *exterior floor*); além de elementos externos de sombreamento (*shading*). Também durante essa etapa são definidas as zonas térmicas[6]. Todas as edificações modeladas precisaram passar por uma simplificação de sua geometria, conforme descrito nos itens que seguem; posteriormente, a modelagem da geometria das Residências ZB1, ZB2 e ZB3 foi utilizada para as simulações de desempenho termoenergético realizadas no programa computacional *EnergyPlus* v. 8.7.0, com o auxílio do componente *EP-Launch* v. 2.13 nas etapas subsequentes.

5.3.1 Modelagem da geometria

Como nas etapas posteriores do trabalho serão realizados estudos de dimensionamento de janelas e de elementos de controle solar externos, optou-se por retirar as obstruções externas da edificação para que estas não interferissem na análise desses elementos. Dessa forma, foi suprimida a vegetação de araucárias presente no lote da Residência ZB1 e os muros externos das Residências ZB2 e ZB3.

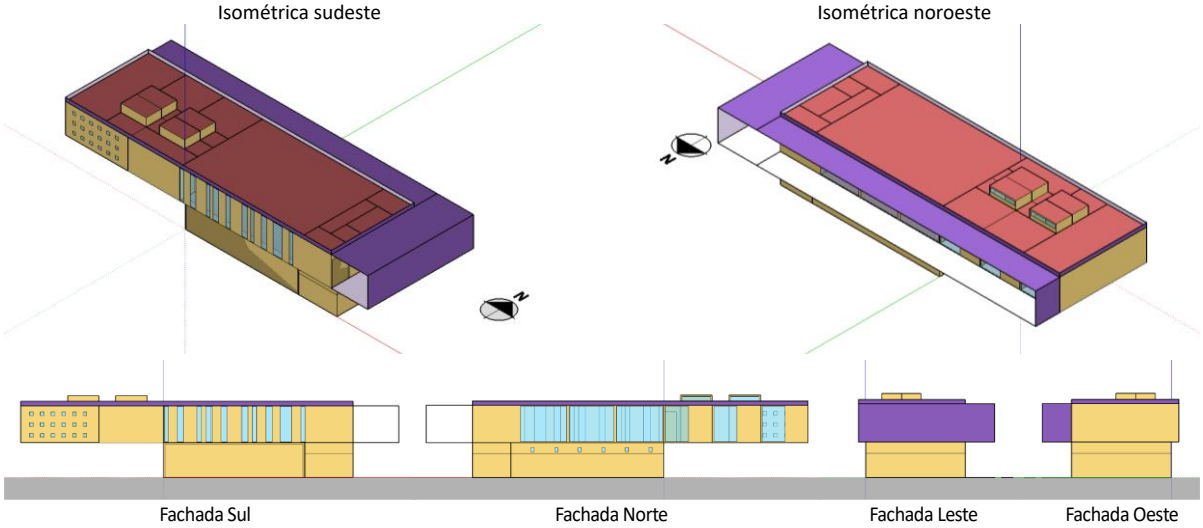
- Residência ZB1

A modelagem da Residência ZB1 é ilustrada na Figura 5-34. Cada cor corresponde a um elemento construtivo (*wall*; *ceiling*; *roof; window*; *door*; *floor*; *shading*). Para que as simulações pudessem ser realizadas, algumas simplificações foram feitas nos modelos das edificações. Desse modo, na

[6] "Espaço ou grupo de espaços dentro de um edifício condicionado que são suficientemente similares, onde as condições desejadas (temperatura) podem ser controladas usando um único sensor (termostato ou sensor de temperatura)" (INMETRO, 2013).

Residência ZB1, as aberturas circulares da fachada sul foram substituídas por aberturas quadradas de mesma área e as aberturas zenitais circulares da cobertura da varanda leste foram suprimidas.

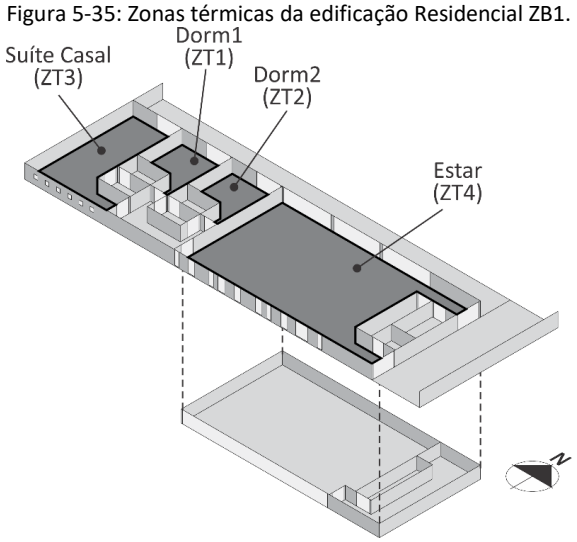
Figura 5-34: Residência ZB1, edificação modelada com as zonas térmicas.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Durante a modelagem foi feita a definição das zonas térmicas da edificação. Na Residência ZB1, a edificação foi dividida em 14 diferentes zonas térmicas, sendo que as zonas térmicas de permanência prolongada, consideradas nas simulações computacionais, são as seguintes: Dorm 1 e Dorm 2 (ZT1 e ZT2); Suíte Casal (ZT3) e Estar (ZT4). As demais áreas correspondem a espaços de circulação, sanitários e garagem (Figura 5-35Tabela 5-34).

Figura 5-35: Zonas térmicas da edificação Residencial ZB1.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A Tabela 5-14 apresenta as características das zonas térmicas das áreas de permanência prolongada: área, pé-direito e volume.

Tabela 5-14**:** Características das zonas térmicas da Residência ZB1.

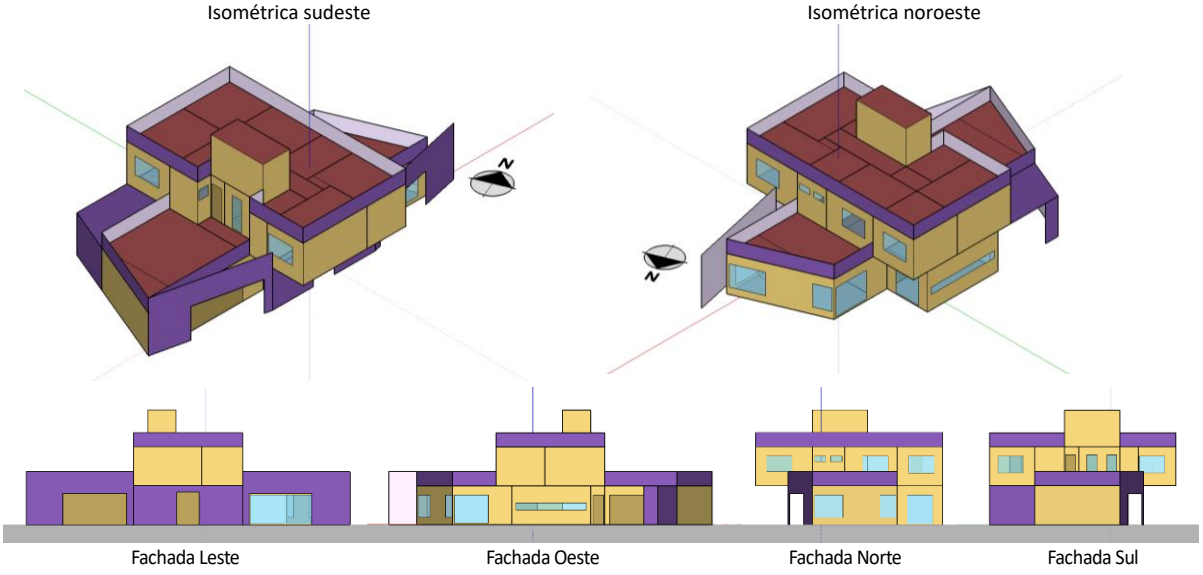
Edificação	Zona térmica	Ambiente	Área (m²)	Pé-direito (m)	Volume (m³)
Residência ZB1	**ZT1**	Dorm 1	11,58	2,70	31,27
	ZT2	Dorm 2	11,58	2,70	31,27
	ZT3	Suíte Casal	27,30	2,70	73,71
	ZT4	Estar	85,22	2,70	230,09
	Total	**Áreas de permanência prolongada**	**135,68**	**2,70**	**366,34**

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

- Residência ZB2

Na modelagem da Residência ZB2, realizou-se uma simplificação do muro frontal externo circular, a leste, por uma composição de três faces planas. O muro posterior do lote, a oeste, norte e sul, foi suprimido; já a iluminação zenital do Estar (ZT4) foi omitida devido à sua complexidade geométrica (Figura 5-36).

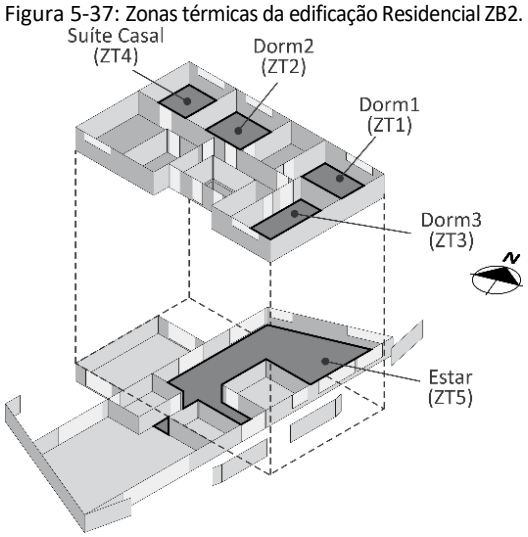
Figura 5-36: Residência ZB2, edificação modelada com as zonas térmicas.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A Residência ZB2 foi dividida em 14 diferentes zonas térmicas, de tal modo que as zonas térmicas de permanência prolongada, consideradas nas simulações computacionais, são as seguintes: Dorm 1 (ZT1), Dorm 2 (ZT2), Dorm 3 (ZT3), Suíte Casal (ZT4) e Estar (ZT5). As demais áreas correspondem a espaços de circulação, sanitários e garagem (Figura 5-37).

Figura 5-37: Zonas térmicas da edificação Residencial ZB2.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A Tabela 5-15 apresenta as características das zonas térmicas das áreas de permanência prolongada: área, pé-direito e volume.

Tabela 5-15**:** Características das zonas térmicas da Residência ZB2.

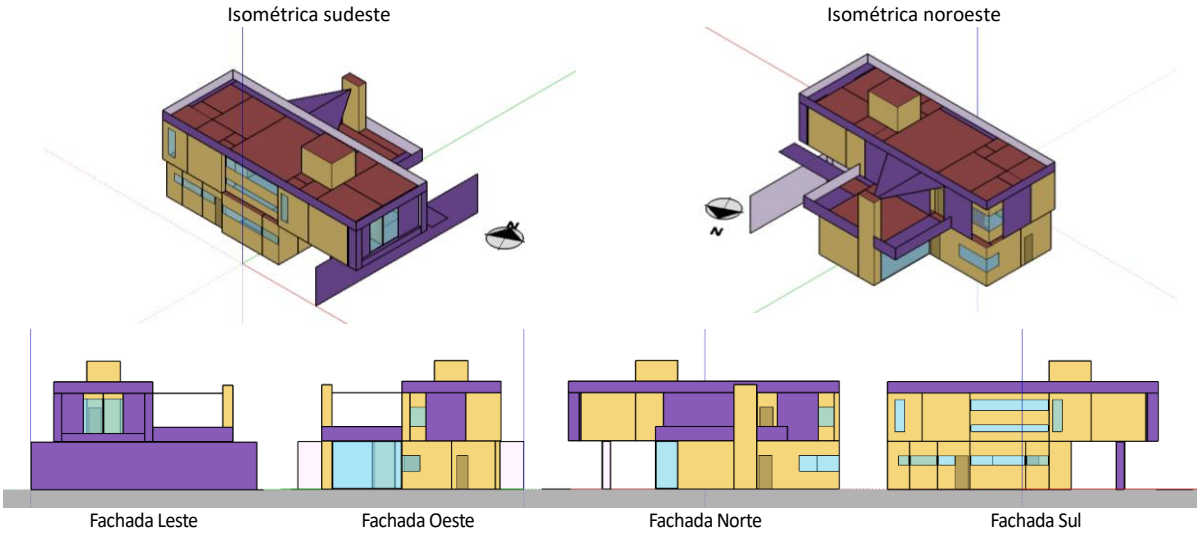
Edificação	Zona térmica	Ambiente	Área (m^2)	Pé-direito (m)	Volume (m^3)
Residência ZB2	**ZT1**	Dorm1	12,38	2,75	34,04
	ZT2	Dorm2	12,81	2,75	35,23
	ZT3	Dorm3	12,91	2,75	35,50
	ZT4	Suíte Casal	11,04	2,75	31,35
	ZT5	Estar	47,47	2,75	130,54
	Total	**Áreas de permanência prolongada**	**96,61**	**-**	**265,68**

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

- Residência ZB3

A modelagem da Residência ZB3 é ilustrada na Figura 5-38, na qual cada cor corresponde a um elemento construtivo (*wall*; *ceiling*; *roof; window*; *door*; *floor*; *shading*). Os muros externos foram suprimidos e, para fins de simplificação da modelagem e da simulação, o espaçamento entre as madeiras dos painéis verticais também foi omitido, ao passo que os painéis móveis foram mantidos fixos.

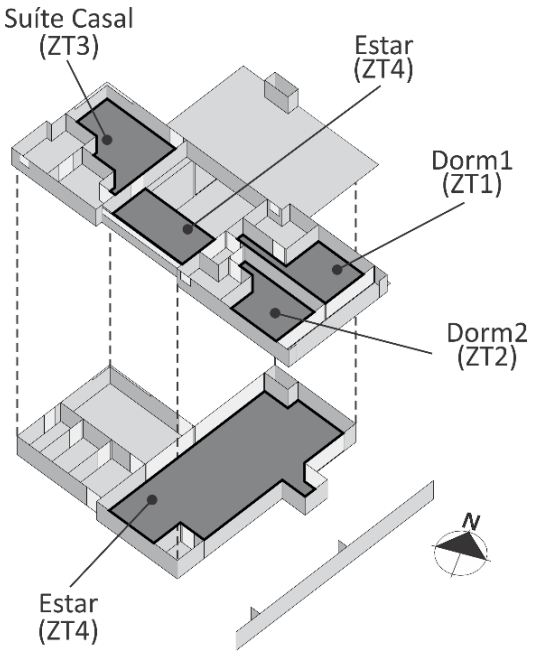
Figura 5-38: Residência ZB3, edificação modelada com as zonas térmicas.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Durante a modelagem, a Residência ZB3 foi dividida em 16 zonas térmicas, dentre as quais foram consideradas para a simulação computacional as de permanência prolongada: Dorm 1 (ZT1) e Dorm 2 e ZT2), Suíte Casal (ZT3) e Estar (ZT4). As demais áreas correspondem a espaços de circulação, sanitários e garagem (Figura 5-39).

Figura 5-39: Zonas térmicas da edificação residencial ZB3.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A Tabela 5-16 apresenta as características das zonas térmicas das áreas de permanência prolongada: área, pé-direito e volume.

Tabela 5-16**:** Características das zonas térmicas da Residência ZB3.

Edificação	Zona térmica	Ambiente	Área (m²)	Pé-direito (m)	Volume (m³)
Residência ZB3	**ZT1**	Dorm 1	13,49	3,00	40,47
	ZT2	Dorm 2	12,23	3,00	36,69
	ZT3	Suíte Casal	16,35	3,00	49,05
	ZT4	Estar	67,63	3,00	202,89
	Total	**Áreas de permanência prolongada**	**109,70**	-	**329,10**

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

5.3.2 Configuração do uso e ocupação das edificações

Para a simulação computacional do nível de eficiência energética, é necessário definir o uso e a ocupação de cada ambiente da edificação. Para a configuração das Residências ZB1, ZB2 e ZB3, foram utilizados os valores padrão apresentados no RTQ-R (INMETRO, 2012b) para ocupação, iluminação e uso de equipamentos.

O padrão mínimo de ocupação adotado foi o de duas pessoas por dormitório, e, na sala, optou-se pela soma de todos os usuários (Tabela 5-17).

Tabela 5-17: Número de pessoas por ambiente.

Zona Térmica	Ambiente	Número de pessoas		
		Residência ZB1	Residência ZB2	Residência ZB3
ZT1	**Dorm 1**	2	2	2
ZT2	**Dorm 2**	2	2	2
ZT3	**Suíte Casal**	2	2	2
ZT4	**Estar**	6	6	6

Fonte: baseado em Inmetro (2012b).

As rotinas de ocupação foram configuradas separadamente para os dias de semana e para os finais de semana, conforme descrito na Tabela 5-18. Não foi considerado o horário de verão. A ocupação do ambiente é representada pela porcentagem das pessoas disponíveis no horário.

Tabela 5-18: Padrão de ocupação para dias de semana e final de semana.

Hora	Dormitórios		Sala	
	Dia de Semana (%)	Final de Semana (%)	Dia de Semana (%)	Final de Semana (%)
1 a 7h	100	100	0	0
8 a 9h	0	100	0	0
1 0h	0	50	0	0
11h	0	0	0	25
12h	0	0	0	75
13h	0	0	0	0
14h	0	0	25	75
15 a 17h	0	0	25	50
18h	0	0	25	25
19h	0	0	100	25
20h	0	0	50	50
21h	50	50	50	50
22 a 24h	100	100	0	0

Fonte: adaptado de Inmetro (2012b).

O RTQ-R especifica taxas de metabolismo de acordo com as atividades realizadas pelas pessoas que ocupam o ambiente, e não considera o isolamento térmico das roupas. A taxa de metabolismo utilizada foi de 81 W/pessoa nos dormitórios e de 108 W/pessoa na sala/cozinha, conforme apresentado na Tabela 5-19.

Tabela 5-19: Taxas metabólicas para cada atividade.

Ambiente	Atividade realizada	Calor produzido (W/m²)	Calor produzido para área de pele = 1,80 m² (W)
Sala	Sentado ou assistindo TV	60	108
Dormitórios	Dormindo ou descansando	45	81

Fonte: Inmetro (2012b).

A densidade de potência instalada de iluminação foi de 6 W/m² nas salas e de 5 W/m² nos dormitórios. As agendas de iluminação foram configuradas separadamente para os dias de semana e para os finais de semana, conforme a Tabela 5-20 demonstra.

Tabela 5-20: Agenda de Iluminação para dias de semana e final de semana.

Hora	Dormitórios		Sala	
	Dia de Semana (%)	Final de Semana (%)	Dia de Semana (%)	Final de Semana (%)
1 a 6h	0	0	0	0
7h	100	0	0	0
8h	0	0	0	0
9h	0	100	0	0
10h	0	0	0	0
11 a 12h	0	0	0	100
13 a 16h	0	0	0	0
17 a 20h	0	0	100	100
21h	100	100	100	100
22h	100	100	0	0
23 a 24h	0	0	0	0

Fonte: Inmetro (2012b).

A densidade de carga interna com equipamentos recomendada é de 1,5 W/m² para a sala, considerada no intervalo de 24h, durante todo o período da simulação (INMETRO, 2012b).

As Residências ZB1 e ZB2 apresentam janelas com persianas internas e a Residência ZB2 também conta com janelas de persianas externas de enrolar. Como as persianas apresentaram pouca influência nas simulações de desempenho termoenergético realizadas preliminarmente e, com vistas à diminuição do número de parâmetros para as simulações realizadas nas etapas posteriores, para uma simplificação, optou-se por não utilizar persianas nas edificações em todas as etapas do trabalho.

5.3.3 Arquivos climáticos utilizados

Os arquivos climáticos foram selecionados de acordo com as recomendações do RTQ-R (INMETRO, 2012b). As informações climáticas utilizadas nas simulações foram obtidas da base de dados organizada pelo professor Maurício Roriz, da UFSCar, em extensão .EPW[7], com base em dados horários, registrados em 411 estações climatológicas do INMET entre os anos de 2000 e 2010. Para cada cidade representativa foi adotado um arquivo climático, conforme indicado no Quadro 5-5. Os arquivos climáticos apresentam as características climáticas ao longo das 8760 horas anuais (24 horas por dia em 365 dias por ano).

Quadro 5-5: Arquivos climáticos utilizados.

Zona Bioclimática	Cidade representativa	Arquivos climáticos	Fonte
ZB1	Bento Gonçalves/RS	RS_Bento_Goncalves.epw	(RORIZ, 2012)
ZB2	Santa Maria/RS	RS_Santa_Maria.epw	(RORIZ, 2012)
ZB3	Florianópolis/SC	SC_Florianopolis.epw	(RORIZ, 2012)

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

5.3.4 Temperatura de Conforto

Para todo o trabalho, a temperatura de conforto adotada seguiu o estabelecido pelos estudos da aplicação do conceito *Passive House* para climas quentes do projeto *Passive-on*: acima dos 20°C e abaixo dos 26°C (Passive-On, 2007).

5.3.5 Configuração da temperatura do solo

A temperatura do solo nas simulações computacionais, principalmente nas edificações térreas, é um parâmetro muito importante, pois as trocas de calor entre o piso e o solo são determinantes no resultado final das trocas de calor do ambiente. Os valores de temperatura do solo dos arquivos climáticos não são recomendados para o uso em simulações térmicas e energéticas; desse modo, para calcular as temperaturas do solo, o RTQ-R recomenda o uso do programa *Slab*, que está vinculado ao *EnergyPlus*. O programa calcula a temperatura média do solo para cada mês do ano, com base nos valores médios das temperaturas interna e externa da edificação, considerando o clima escolhido (INMETRO, 2012b)

No presente trabalho, a temperatura do solo foi determinada com o uso do programa *Slab* e, posteriormente, configurada no *EnergyPlus*. Calculou-se as temperaturas do solo para as edificações referenciais, dos modelos condicionado artificialmente (CA) e ventilado naturalmente (VN), para as três cidades em estudo, como mostra a Tabela 5-21.

[7] O arquivo com extensão EPW é um do arquivo de dados climáticos. O nome completo é *EnergyPlus Weather Data File* e foi criado pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (*U.S. Department of Energy*).

Tabela 5-21: Temperaturas médias mensais do solo para as Residências ZB1, ZB2 e ZB3.

Mês	ZB1: Bento Gonçalves-RS		ZB2: Santa Maria-RS		ZB3: Florianópolis-SC	
	VN	CA	VN	CA	VN	CA
Jan	22,12	23,10	24,21	25,21	23,78	24,14
Fev	22,53	22,50	24,27	25,27	22,71	24,32
Mar	21,41	22,37	22,73	23,71	22,47	24,33
Abr	19,83	20,79	21,66	22,65	20,86	22,77
Mai	17,16	19,71	19,09	20,09	18,99	20,90
Jun	14,35	17,96	17,88	18,88	17,11	20,58
Jul	16,25	19,22	17,68	19,47	17,58	20,54
Ago	16,63	19,47	19,19	20,35	17,68	20,52
Set	15,87	18,71	18,71	19,75	18,48	20,55
Out	18,08	20,15	20,17	21,18	18,63	21,33
Nov	20,05	20,20	21,23	23,00	20,19	22,25
Dez	21,16	22,16	23,75	24,87	21,26	23,19

CA: Modelo condicionado artificialmente; VN: Modelo ventilado naturalmente; ZB: Zona Bioclimática
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Segundo Oliveira (2012), a alteração dos valores de transmitância térmica das paredes e da cobertura, mantendo-se os demais parâmetros de entrada do programa, como os padrões de utilização e ocupação, ventilação, fechamentos transparentes, sombreamento, entre outros, não influi significativamente nos valores obtidos para a temperatura do solo pelo programa *Slab*, permitindo, assim, que todas as demais configurações dos fechamentos da edificação que serão simuladas possam utilizar os mesmos valores de temperatura do solo. Em todas as simulações posteriores, a temperatura do solo foi mantida de acordo com os dados apresentados na Tabela 5-21.

5.4 ETAPA 4: CLASSIFICAÇÃO DO NÍVEL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DA ENVOLTÓRIA (RTQ-R) E DIAGNÓSTICO TERMOENERGÉTICO

Após a modelagem da geometria das edificações e a configuração dos parâmetros para realizar a simulação computacional, foi realizada a classificação do nível de eficiência energética da envoltória segundo o RTQ-R e o diagnóstico termoenergético das três edificações referenciais selecionadas para o estudo de caso (Residências ZB1, ZB2 e ZB3). A classificação do nível de eficiência energética da envoltória e o diagnóstico termoenergético foram realizados com as edificações referenciais simuladas com ventilação natural e condicionadas artificialmente, tal como foram edificadas, sem nenhuma alteração no projeto arquitetônico original e nos materiais utilizados.

5.4.1 Classificação do nível de eficiência energética da envoltória (RTQ-R)

A classificação do nível de eficiência energética da envoltória foi realizada em dois momentos, conforme recomendado pelo RTQ-R (INMETRO, 2012b). Primeiramente, verificou-se o atendimento

dos pré-requisitos específicos da envoltória e, posteriormente, os procedimentos para determinar a eficiência da envoltória foram realizados utilizando-se o método de simulação computacional.

- Pré-requisitos da envoltória

Segundo o RTQ-R (INMETRO, 2012b), deve-se inicialmente verificar o atendimento dos pré-requisitos específicos da envoltória, de modo separado para cada ambiente de permanência prolongada, atentando para: a) as características térmicas de absortância solar, transmitância e a capacidade térmica das paredes externas e coberturas; b) as características físicas relativas à iluminação natural e c) as características físicas relativas à ventilação natural.

A Tabela 5-22 apresenta os pré-requisitos de transmitância térmica, de capacidade térmica e absortância solar das paredes externas e coberturas de acordo com a Zona Bioclimática em estudo. O não atendimento a esses pré-requisitos implica em uma classificação de, no máximo, nível "C" para a edificação nos equivalentes numéricos para resfriamento, aquecimento e refrigeração.

Tabela 5-22: Pré-requisitos de absortância solar, transmitância térmica e capacidade térmica para as ZB 1, 2 e 3.

Zona Bioclimática	**Componente**	**α (adimensional)**	**U (W/m²K)**	**CT (kJ/m²K)**
ZB1 e ZB2	Parede	S/E	U ≤ 2,50	CT ≥ 130
	Cobertura	S/E	U ≤ 2,30	S/E
ZB3	Parede	α ≤ 0,6	U ≤ 3,70	CT ≥ 130
		α > 0,6	U ≤ 2,50	CT ≥ 130
	Cobertura	α ≤ 0,6	U ≤ 2,30	S/E
		α > 0,6	U ≤ 1,50	S/E

α= Absortância solar; U= transmitância térmica; CT= capacidade térmica; S/E = sem exigência.

Fonte: adaptado de Inmetro (2012b).

Para atender ao pré-requisito de ventilação natural, nas Zonas Bioclimáticas ZB1, ZB2 e ZB3, os ambientes de permanência prolongada devem apresentar percentual de áreas mínimas de abertura para ventilação de 8% em relação à área de piso. O percentual de abertura para ventilação é calculado de acordo com a equação 2 (INMETRO, 2012b):

$$A = 100 . (Av / AUamb) \qquad \text{Equação 2}$$

Onde:

A: percentual de abertura para ventilação em relação à área útil do ambiente (%);

AV: área de abertura para ventilação (m²);

AUamb: área útil do ambiente (m²).

Entre as Zonas Bioclimáticas 2 e 8, a edificação deve ter ventilação cruzada proporcionada por aberturas externas e internas, sem considerar as portas de acesso principal e de serviço. Caso não apresente ventilação cruzada, a edificação atingirá, no máximo, o nível C no equivalente numérico da

envoltória para resfriamento. O pré-requisito de ventilação cruzada é analisado para a edificação como um todo e não para cada ambiente individualmente. As aberturas devem atender à proporção indicada na Equação 3 (INMETRO, 2012b).

$$A2/A1 \geq 0,25 \qquad \text{Equação 3}$$

Onde:

A1: somatório das áreas efetivas de aberturas para ventilação localizadas nas fachadas da orientação com maior área de abertura para ventilação (m²);

A2: somatório das áreas efetivas de aberturas para ventilação localizadas nas fachadas das demais orientações (m²).

Para atender ao pré-requisito de iluminação natural, o acesso à iluminação natural em ambientes de permanência prolongada deve ser garantido por pelo menos uma abertura para o exterior. A soma das áreas de abertura para iluminação de cada ambiente deve corresponder a, no mínimo, 12,5% da área útil do ambiente. Para dormitórios com área superior a 15,00 m², o pré-requisito deve ser atendido para 15,00 m² e, para ambientes com corredor, deve-se desconsiderar o mesmo do cálculo da área útil. O não atendimento desse pré-requisito acarreta em uma atribuição de no máximo nível C nos equivalentes numéricos da envoltória para resfriamento, aquecimento e refrigeração (INMETRO, 2012b).

Após verificar o atendimento dos pré-requisitos da envoltória, deve-se realizar os procedimentos para determinar a eficiência dessa estrutura através do método prescritivo ou do método de simulações. Conforme já mencionado, neste trabalho adotou-se o método de simulação computacional das Residências ZB1, ZB2 e ZB3, a ser descrito abaixo.

- *Método de simulação computacional*

Para a simulação computacional, empregou-se o *EnergyPlus* v. 8.7.0 por meio do componente *EP-Launch* v. 2.13. Foram utilizadas as configurações para ocupação, iluminação e equipamentos, indicados pelo RTQ-R (INMETRO, 2012b), como exposto no item 5.3.2. Conforme estabelece o regulamento, foram realizadas duas simulações para cada edificação referencial, com ventilação natural e condicionada artificialmente[8] (Quadro 5-6).

[8] Para o RTQ-R, o nível de eficiência da envoltória quando condicionada artificialmente é de caráter informativo, mas deve ser calculado para qualquer edificação, mesmo que naturalmente ventilada. A obtenção do nível A de eficiência nessa situação é obrigatória para obtenção da bonificação de condicionamento artificial de ar. Nesse caso, para a determinação do equivalente numérico ao invés do indicador de graus-hora para resfriamento (GH_R), deve-se utilizar o consumo relativo para refrigeração (CR) (INMETRO, 2012b).

Quadro 5-6: Critérios para simulação computacional de ambiente ventilado naturalmente e condicionado artificialmente.

Critérios		Horas do dia (h)	Acionamento
a)	**Ventilado Naturalmente (VN)**	24	Abertura de janelas quando: a) temperatura do ambiente ≥ 20°C; b) temperatura externa < que a temperatura interna.
b)	**Condicionado Artificialmente (AC)**	21:00 – 8:00	a) aquecimento quando a temperatura do ambiente < 22°C; b) refrigeração quando a temperatura do ambiente >24 °C.
		8:00-21:00	Ventilado naturalmente: a) temperatura do ambiente ≥ 20°C; b) temperatura externa < que a temperatura interna.

Fonte: Inmetro (2012b).

Para a avaliação da edificação condicionada artificialmente, o sistema de ar-condicionado foi configurado de acordo com o estabelecido pelo RTQ-R, sendo o coeficiente de performance (COP[9]) para aquecimento 2,75 W/W, e o para refrigeração 3,00 W/W. A taxa de fluxo de ar por pessoa é de 0,00944 m³/s, a eficiência do motor é de 0,90, e a do ventilador é de 0,70 (INMETRO, 2012).

Para a avaliação da edificação ventilada naturalmente, são comparados os indicadores de graus-hora de resfriamento, calculados com temperatura base de 26°C, dos ambientes de permanência prolongada com os níveis indicados pelo RTQ-R. Para a avaliação da edificação condicionada artificialmente, comparam-se os consumos[10] de aquecimento e de refrigeração dos ambientes de permanência prolongada com os níveis indicados pelo RTQ-R. A Tabela 5-23 sintetiza a classificação dos níveis de eficiência energética das edificações ventiladas naturalmente e condicionadas artificialmente definidas pelo RTQ-R (INMETRO, 2012b).

Tabela 5-23: Classificação dos níveis de eficiência energética dos ambientes de permanência prolongada de acordo com o RTQ-R.

Nível	EqNum	a) ventilado naturalmente			b) condicionado artificialmente					
		Graus-hora de resfriamento (°Ch)			Consumo de refrigeração (kWh/m².a)			Consumo de aquecimento (kWh/m².a)		
		ZB1	ZB2	ZB3	ZB1	ZB2	ZB3	ZB1	ZB2	ZB3
A	≥ 4,5	≤ 143	≤ 2310	≤ 822	≤ 0,713	≤ 5,849	≤ 6,890	≤ 16,700	≤ 15,591	≤ 6,429
B	≥ 3,5	≤ 287	≤ 4396	≤ 1643	≤ 1,426	≤ 11,288	≤ 12,284	≤ 33,400	≤ 31,182	≤ 12,858
C	≥ 2,5	≤ 430	≤ 6481	≤ 2465	≤ 2,138	≤ 16,727	≤ 17,677	≤ 50,099	≤ 46,772	≤ 19,287
D	≥ 1,5	≤ 574	≤ 8567	≤ 3286	≤ 2,851	≤ 22,166	≤ 23,071	≤ 66,799	≤ 62,363	≤ 25,716
E	< 1,5	> 574	> 8567	> 3286	> 2,851	> 22,166	>23,071	>66,799	>62,363	>25,716

Fonte: adaptado de Inmetro (2012b).

[9] O COP é a sigla de "*Coefficient Of Performance*". É um índice que indica o nível de eficiência de um aparelho de ar condicionado. Quanto maior for o COP, mais eficiente é o equipamento.

[10] No presente documento não é feita a distinção entre os termos "consumo" e "necessidade de energia". Por uma questão de uniformização, utiliza-se o termo "consumo" para ambos os casos, uma vez que esse é o termo adotado pelo RTQ-R (INMETRO, 2012b).

O equivalente numérico da envoltória para resfriamento (*EqNumEnvResfr),* refrigeração (*EqNumEnvRefrig)* e aquecimento (*EqNumEnvA*) para cada zona térmica é obtido pela ponderação da classificação dos níveis de eficiência energética dos ambientes de permanência em relação às suas áreas úteis. Posteriormente, determina-se o nível de eficiência energética da envoltória de toda a edificação com o auxílio de equações estabelecidas para cada Zona Bioclimática. Para a ZB1, ZB2 e ZB3, o equivalente numérico da envoltória da edificação (EqNumEnv)[11] é obtido por meio das Equações 4, 5 e 6 (INMETRO, 2012b, 32.).

ZB1: EqNumEnv=0,08 x EqNumEnvResfr + 0,92 x EqNumEnvA Equação 4

ZB2: EqNumEnv=0,44 x EqNumEnvResfr + 0,56 x EqNumEnvA Equação 5

ZB3: EqNumEnv=0,64 x EqNumEnvResfr + 0,36 x EqNumEnvA Equação 6

Onde:

EqNumEnv: equivalente numérico da envoltória (caracteriza o nível de eficiência energética da envoltória);

EqNumEnvResfr: equivalente numérico da envoltória para resfriamento;

EqNumEnvA: equivalente numérico da envoltória para aquecimento.

De acordo com a pontuação final obtida para o equivalente numérico da envoltória da edificação (EqNumEnv), atribui-se uma classificação que varia do nível "A", para o mais eficiente, ao "E", para o menos eficiente (Tabela 5-24). A Figura 5-40 resume o método de classificação do nível de eficiência energética da envoltória segundo o RTQ-R.

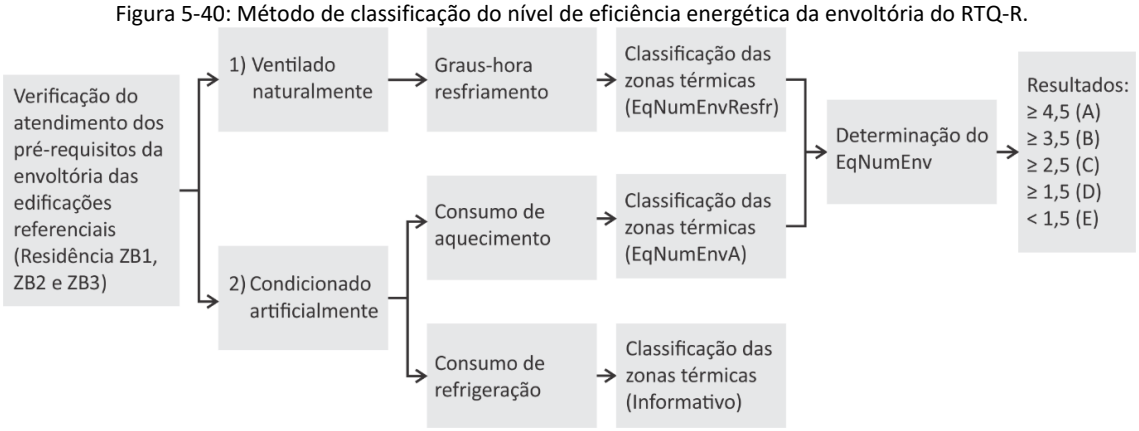
Tabela 5-24: Classificação da envoltória da edificação de acordo com o RTQ-R.

Nível	EqNumEnv
A	≥ 4,5
B	≥ 3,5
C	≥ 2,5
D	≥ 1,5
E	< 1,5

Fonte: adaptado de Inmetro (2012b).

[11] Para o cálculo do *EqNumEnv* não é utilizado o *EqNumEnvRefrig.*

Figura 5-40: Método de classificação do nível de eficiência energética da envoltória do RTQ-R.



Fonte: adaptado de Dalbem *et al.* (2019).

A Tabela 5-25 apresenta um resumo das simulações computacionais realizadas para a classificação do nível de eficiência energética da envoltória e para o diagnóstico termoenergético das Residências ZB1, ZB2 e ZB3.

Tabela 5-25: Total de simulações para a classificação do nível de eficiência energética da envoltória e diagnóstico termoenergético.

Residências	Simulações computacionais	Quantidades de simulações
Residência ZB1	VN	1
	CA	1
Residência ZB2	VN	1
	CA	1
Residência ZB3	VN	1
	CA	1
Total de simulações	-	6[12]

CA: Modelo condicionado artificialmente; VN: Modelo ventilado naturalmente;
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

5.4.2 Diagnóstico termoenergético

Além da verificação da eficiência energética da envoltória segundo o RTQ-R, analisou-se o diagnóstico termoenergético das edificações ventiladas naturalmente e condicionadas artificialmente. As simulações das edificações ventiladas naturalmente permitem avaliar qual desempenho térmico pode ser alcançado com os meios passivos da edificação, sem o uso de meios ativos. Já as simulações das edificações com condicionamento artificial permitem avaliar, além do desempenho térmico, o desempenho energético quanto às necessidades de aquecimento e refrigeração.

[12] Como para cada simulação foi necessário calcular a temperatura do solo com auxílio do programa *Slab*, conforme descrito no item 5.3.5, o total de simulações foi 12.

Para verificar o desempenho térmico das edificações referenciais ventiladas naturalmente, examinou-se comparativamente os seguintes parâmetros:

- temperaturas anuais no exterior e no interior das edificações referenciais;
- graus-hora de resfriamento durante o ano;
- percentual de temperatura menor do que 20°C no interior e no exterior das edificações (desconforto por frio);
- percentual de temperatura entre 20 e 26°C no interior e no exterior das edificações (conforto);
- percentual de temperatura maior do que 26°C no interior e no exterior das edificações (sobreaquecimento).

Para verificar o desempenho termoenergético das edificações referenciais condicionadas artificialmente, analisou-se comparativamente os seguintes critérios:

- temperaturas anuais no exterior e no interior das edificações referenciais;
- graus-hora de resfriamento durante o ano;
- percentual de temperatura menores que 20°C no interior e no exterior das edificações (desconforto por frio);
- percentual de temperatura entre 20 e 26°C no interior e no exterior das edificações (conforto);
- percentual de temperatura acima de 26°C no interior e no exterior das edificações (sobreaquecimento);
- consumo energético mensal e anual de refrigeração (CR) e aquecimento (CA).

5.5 ETAPA 5: APLICAÇÃO OTIMIZADA DAS ESTRATÉGIAS *PASSIVE HOUSE*

Nesta etapa, o objetivo fundamental é apoiar o caminho para o exercício de um projeto ótimo, entendido como a concepção arquitetônica e construtiva que melhor serve o comportamento térmico e energético da edificação. Para tanto, a estratégia foi utilizar um algoritmo evolucionário multiobjetivo para a otimização de soluções de fechamentos opacos, transparentes e equipamentos (MVHR), visando avaliar a adaptação do conceito *Passive House* nas Residências ZB1, ZB2 e ZB3 referenciais. A otimização definiu como função central a minimização do consumo energético para condicionamento térmico e do percentual de horas em desconforto térmico. Para a obtenção dos dados de saída relativos aos percentuais de horas em desconforto, foram programadas rotinas próprias no *EnergyPlus* com o Sistema de Gerenciamento de Energia (*Energy Management System* -

EMS), operadas com a linguagem de programação *Erl* (*EnergyPlus Runtime Language* - *Erl*). O EMS é descrito no item 4.2.1 e um exemplo de programação com esse sistema utilizado neste trabalho é apresentado resumidamente no Apêndice F.

Foi definido como desconforto térmico o percentual de horas transcorridas quando as temperaturas simuladas estão fora do intervalo de 20 a 26^{o}C, com base no critério especificado pelo projeto *Passive-on* (PASSIVE-ON, 2007). Para o processo de otimização foi utilizado o modelo de referência com as mesmas soluções construtivas, configurações de modelagem e parâmetros de uso e ocupação utilizados nas etapas anteriores do trabalho, detalhadas nos itens 5.3 e 5.3.2.

Conforme explicitado anteriormente, foi utilizada para a análise uma abordagem de otimização multiobjetivo por meio da aplicação de um algoritmo evolucionário híbrido baseado nos algoritmos evolutivos CMA-ES (*Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy*) e HDE (*Hybrid Differential Evolution*), descritos no item 4.3. No Apêndice G, é apresentado um exemplo de configuração dos parâmetros do algoritmo utilizado por este trabalho.

Cada simulação multiobjetivo foi realizada com um tempo computacional que variou entre 17 e 61h, recorrendo-se a um computador com um processador Intel Core i74770 K, com 4 núcleos trabalhando a 3,5 GHz e com 16 GB de RAM. Cada processo de otimização corresponde a um total de 10.000 simulações.

Os parâmetros simulados são relativos a quatro das cinco estratégias propostas pelo conceito *Passive House*: o isolamento térmico, as janelas eficientes, a estanqueidade ao ar e a ventilação mecânica com recuperador de calor. Como o cálculo das pontes térmicas envolve questões complexas relacionadas à geometria da edificação e também à interface entre os diferentes materiais construtivos, como, por exemplo, os materiais de fechamento opaco e de estrutura, optou-se por não utilizá-lo como parâmetro de otimização. A Tabela 5-26 apresenta os parâmetros simulados e os intervalos de variação propostos.

Tabela 5-26: Resumo dos parâmetros simulados.

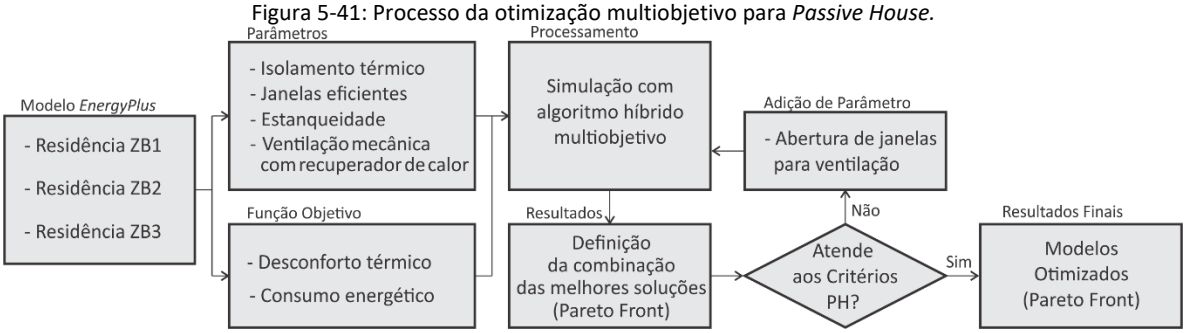
Estratégia *Passive House*	**Especificação do parâmetro**	**Variações**
Isolamento Térmico	Cobertura	0 a 0,15 (m)
	Piso	
	Fachada Norte	
	Fachada Sul	
	Fachada Leste	
	Fachada Oeste	
Janela Eficiente	Fachada Norte	Vidro Simples Vidro Laminado Vidro Duplo Vidro Duplo/PH Vidro Triplo/PH
	Fachada Sul	
	Fachada Leste	
	Fachada Oeste	
Estanqueidade	Infiltração (h^{-1})	0,015 a 0,05
Ventilação Mecânica com Recuperador de Calor (MVHR)	Renovação de ar (h^{-1})	0,3 a 0,9
	Bypass (h^{-1})	0,9 a 1,8
	Eficiência (%)	75 a 95
	Tipo	Fluxo contínuo / Corrente Cruzada
Pontes Térmicas	Não simulado	

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Para as edificações que não alcançaram os critérios definidos pelo conceito *Passive House* para climas quentes, ou seja, ultrapassaram o consumo máximo individual para aquecimento e resfriamento, tabelado em 15 kWh/m².a, e apresentaram um sobreaquecimento de 10% do total de horas de um ciclo anual, adicionou-se um novo parâmetro no processo de otimização que permite simular a ventilação híbrida, com base no aumento da ventilação natural com as aberturas das janelas. Dessa forma, foi necessário otimizar as Residências ZB2 e ZB3 com recurso à abertura de janelas para atender aos critérios *Passive House*. Foi definida a possibilidade de abertura das janelas entre as temperaturas internas de 21 e 30°C como parâmetro de otimização.

Ao final, os resultados da otimização foram agrupados e organizados por uma programação de rotinas no programa computacional *Matlab* R2018b, para a definição da curva das soluções ótimas, identificada por *Pareto Front*. A Figura 5-41 apresenta esquematicamente o processo de otimização multiobjetivo tendo como ponto base o modelo das Residências Referenciais.

Figura 5-41: Processo da otimização multiobjetivo para *Passive House.*



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A Tabela 5-27 resume o total de simulações realizadas nessa etapa e explicita o tempo computacional despendido em horas pelas simulações.

Tabela 5-27: Total de simulações da etapa.

Residências	Modelos Computacionais	Número de simulações	Tempo de simulação (h)
Residência ZB1	PH	10.000	25
	PH VN	*	*
Residência ZB2	PH	10.000	17
	PH VN	10.000	61
Residência ZB3	PH	10.000	21
	PH VN	10.000	38
Total	-	50.000[13]	162

PH: *Passive House*; VN: Ventilado naturalmente.
*Os critérios PH foram atendidos sem Ventilação Natural (VN), não havendo necessidade de simulação.
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Considerando o número elevado de soluções geradas pelas simulações computacionais desta etapa, um total de 50.000, foi realizada uma delimitação de soluções (combinação de parâmetros) a serem analisadas pelo trabalho. Para a análise dos resultados, foram examinadas comparativamente três soluções:

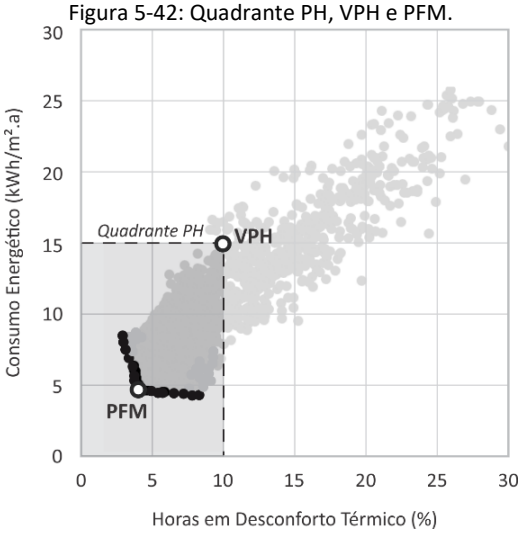
a) Edificação referencial, ZB1, ZB2 e ZB3, condicionada artificialmente (AC);
b) Solução do Ponto Médio do *Pareto Front* (PFM);
c) Solução mais próxima ao vértice do Quadrante PH[14], que é a representação gráfica do cruzamento do valor do consumo de condicionamento artificial de 15 kWh/m².a com o total de desconforto de 10% (VPH).

[13] Número representativo das simulações finais, sem considerar as simulações de configuração dos modelos.

[14] O Quadrante PH representa os valores com consumo total de condicionamento térmico (aquecimento mais resfriamento) de até 15 kWh/m².a e o desconforto total de até 10% das horas do ano. Dessa forma, todos as soluções contidas no Quadrante PH atendem aos critérios *Passive House* para um clima quente. Porém, soluções fora do quadrante também podem atender aos critérios PH desde que o consumo individual para resfriamento e para aquecimento não ultrapasse os 15 kWh/m².a cada um e o desconforto pelo sobreaquecimento (acima dos 26ºC) não ultrapasse 10% das horas do ano.

A Figura 5-42, apresenta um exemplo do Quadrante PH, o PFM e o VPH.

Figura 5-42: Quadrante PH, VPH e PFM.



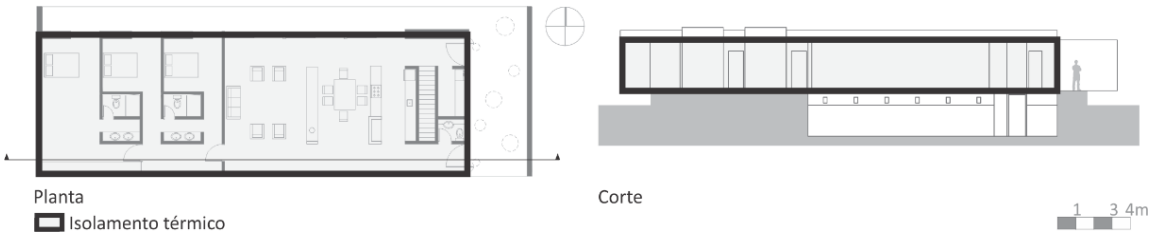
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Os próximos itens descrevem as quatro estratégias *Passive House* adotadas no processo de otimização.

5.5.1 Isolamento térmico

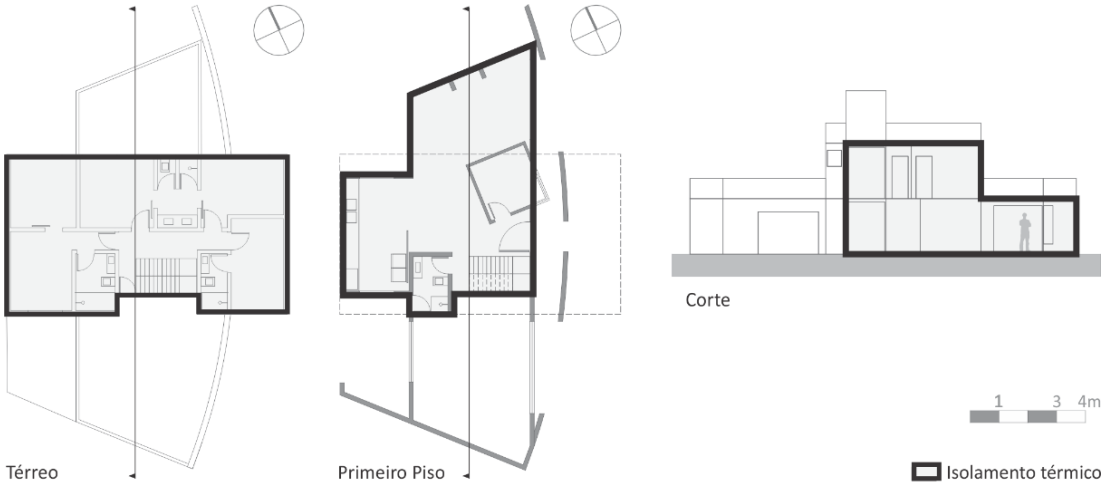
Para o isolamento térmico dos fechamentos opacos, utilizou-se o XPS (poliestireno extrudado), com uma condutividade térmica de 0,027 W/m.°C e variação da espessura entre 0 e 0,15 m. O isolamento da cobertura, da laje em contato com o solo, das paredes das fachadas norte, sul, leste e oeste, foram simulados individualmente, podendo assim assumir diferentes espessuras. As Figuras 5-43 a 5-45 apresentam esquematicamente os fechamentos isolados. As áreas de garagem não foram condicionadas artificialmente (MVHR) e também não tiveram as paredes externas isoladas.

Figura 5-43: Esquema do isolamento térmico dos fechamentos opacos da Residência ZB1.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Figura 5-44: Esquema do isolamento térmico dos fechamentos opacos da Residência ZB2.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Figura 5-45: Esquema do isolamento térmico dos fechamentos opacos da Residência ZB3.

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A espessura máxima de 0,15 m para isolamento foi definida para atender aos valores de transmitância térmica da envoltória, determinados pelo projeto *Passive-on* (2007), que estabelece um valor de referência entre 0,15 e 0,45 W/m^{2}K. A Tabela 5-28 apresenta os valores de isolamento térmico das residências ZB1, ZB2 e ZB3 e os valores calculados com base em um isolamento de 0,15 m de XPS.

Tabela 5-28: Valores de transmitâncias atuais e máximos propostos para as Residências ZB1, ZB2 e ZB3.

Estratégia *Passive House*	**Edificação**	**Elemento construtivo**	**Transmitância (U) (W/m²K)**	
			Sem isolamento	**Com isolamento de 0,15 m XPS**
Isolamento	Residência ZB1	Cobertura	0,67	0,14
		Laje de piso	2,76	0,17
		Parede Dupla Alvenaria	1,27	0,16
		Parede Concreto	2,93	0,17
	Residência ZB2	Cobertura/terraço	0,58	0,14/0,17
		Terraço	2,73	0,17
		Parede Dupla Externa	1,27	0,16
		Parede interna	2,70	0,17
		Laje de Piso	4,35	0,18
	Residência ZB3	Cobertura/terraço	0,67	0,14/0,16
		Laje de piso	4,35	0,18
		Terraço	1,46	0,16
		Parede alvenaria	2,02	0,17

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

5.5.2 Janelas eficientes

No processo de otimização, cada edificação pode assumir os seguintes conjuntos de soluções de janelas: soluções utilizadas nos modelos de Referência (vidro simples, vidro duplo e vidro laminado incolor) ou soluções PH (vidro duplo com caixilho de PVC e vidro triplo com caixilho de PVC). As janelas de vidro duplo e vidro triplo com caixilho de PVC são janelas certificadas pelo *Passive House Institute* para climas quentes e temperados e constam como *certified components* (PHI, 2019). Para todos os casos, foi assumido que independentemente das dimensões adotadas pelas janelas, o valor da transmitância da solução instalada (considerando o conjunto envidraçado, caixilharia e instalação) seria o mesmo. A Tabela 5-29 descreve as características térmicas utilizadas pelas janelas simuladas.

Tabela 5-29: Propriedade térmicas utilizadas para as janelas.

Estratégia *Passive House*	**Descrição**	**Nomenclatura utilizada**	**U (W/m²K)**	**FS***
Janela Eficiente	Vidro simples (3 mm)	Vidro Simples	5,7	0,87
	Vidro laminado incolor (4 + 4 mm)	Vidro Laminado	5,67	0,44
	Vidro duplo incolor (6 + 14 + 4 mm)	Vidro Duplo	2,8	0,75
	Vidro duplo com caixilho de PVC	Vidro Duplo/PH	1,2	0,63
	Vidro triplo com caixilho de PVC	Vidro Triplo/PH	1,00	0,69

*FS = fator solar

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

5.5.3 Estanqueidade

O projeto *Passive-on* (2007) determina uma renovação horária do ar de 0,6h^{-1}, com o máximo de 1h^{-1}, em condições de projeto acima de 0ºC para um diferencial de pressão de 50 Pa (PASSIVE-ON, 2007). Na otimização, conforme descrito na Tabela 5-26, foram adotados os valores entre 0,015 e 0,05h^{-1} e infiltração para uma pressão ambiente. Esses valores foram obtidos pelo método simplificado, pelo quociente de n50/20 (SHERMAN, 1998).

5.5.4 Ventilação Mecânica com Recuperador de Calor

Nas edificações com estratégias *Passive House* deve ser utilizado um sistema de ventilação mecânica com recuperador de calor (*Mechanical Ventilation with Heat Recovery* – MVHR). O sistema MVHR é ativo durante as 24 horas do dia, sendo acionada uma resistência de climatização quando a temperatura fica abaixo dos 20ºC, para aquecimento, e um condensador quando a temperatura se eleva acima dos 26ºC, para refrigeração; no caso, as temperaturas destacadas indicam os limites de conforto térmico definidos pelo projeto *Passive-on* (PASSIVE-ON, 2007). Quando não for necessário recuperar calor do ar extraído para o ar insuflado, o sistema MVHR utiliza o *bypass* e então o ar exterior passa diretamente para os ambientes, sem trocar calor, usando apenas o consumo energético do ventilador. Os valores de renovação horária de ar adotados variam entre 0,3 e 0,9 h^{-1}, e do *bypass* entre 0,9 e 1,89 h^{-1}, sendo utilizados para cada zona térmica climatizada.

5.6 ETAPA 6: OTIMIZAÇÃO DO DIMENSIONAMENTO DE JANELAS E ELEMENTOS DE CONTROLE SOLAR EXTERNOS

Nesta etapa, utilizou-se um algoritmo evolucionário multiobjetivo para a otimização de soluções de dimensionamento de janelas e elementos de controle solar externos[15] nas Residências referenciais ZB1, ZB2 e ZB3, sem e com a otimização conjunta das estratégias *Passive House*. As edificações que foram otimizadas em conjunto com o conceito *Passive House* tiveram os mesmos parâmetros simulados da etapa anterior: o isolamento térmico, as janelas eficientes, a estanqueidade ao ar e a ventilação mecânica com recuperador de calor. A otimização teve como função a minimização do consumo energético para condicionamento térmico e do percentual de horas em desconforto térmico. Para a obtenção dos dados de saída relativos aos percentuais de horas em desconforto, foram programadas rotinas próprias no *EnergyPlus* com o Sistema de Gerenciamento de Energia (*Energy Management System* - EMS), por meio da linguagem de programação *Erl* (*EnergyPlus Runtime Language* - *Erl*). O EMS é descrito de forma mais detalhada no item 4.2.1 e um exemplo de programação com o sistema utilizado por este trabalho é apresentado resumidamente no Apêndice F.

[15] Os elementos de controle solar externos são melhor descritos no item 3.2.1. Os itens 5.6.1, 5.6.2 e 5.6.3 apresentam, respectivamente, os elementos de controle solar externos otimizados das Residências ZB1, ZB2 e ZB3.

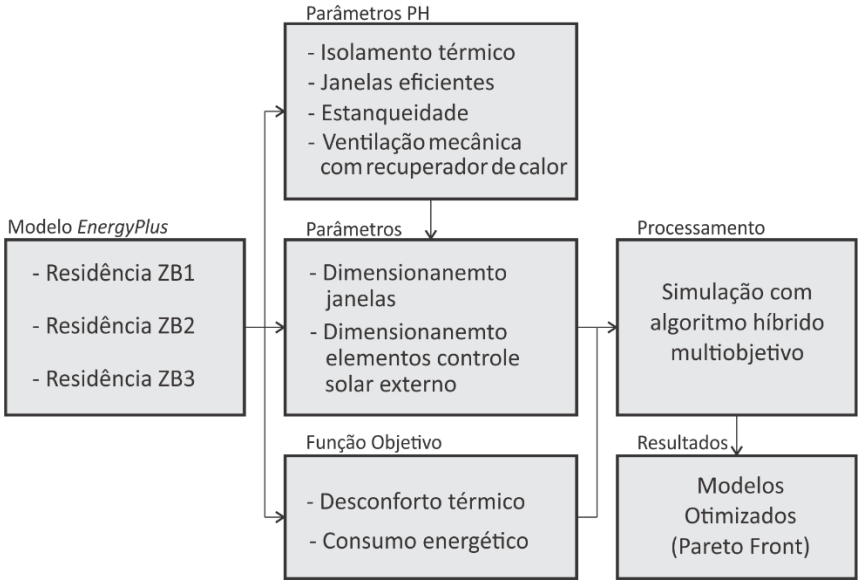
A noção de desconforto térmico é definida como o percentual de horas transcorridas quando as temperaturas simuladas estão fora do intervalo entre 20 e 26^{o}C, consoante o critério especificado pelo projeto *Passive-on* (PASSIVE-ON, 2007). Para o processo de otimização foi utilizado o modelo de referência com as mesmas soluções construtivas, configurações de modelagem e parâmetros de uso e ocupação utilizados nas etapas anteriores do trabalho e detalhadas nos itens 5.3 e 5.3.2.

Assim como na etapa anterior, foi utilizada uma abordagem de otimização multiobjetivo pela aplicação de um algoritmo evolucionário híbrido baseado nos algoritmos evolutivos CMA-ES (*Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy*) e HDE (*Hybrid Differential Evolution*), descritos no item 4.3. No Apêndice G, é apresentado um exemplo de configuração dos parâmetros do algoritmo utilizado neste trabalho.

Cada simulação multiobjetivo foi realizada com um tempo computacional que variou entre 19 e 79h, recorrendo-se a um computador com processador Intel Core i74770 K, com 4 núcleos trabalhando a 3,5 GHz e com 16 GB de RAM. Cada processo de otimização corresponde a um total de 10.000 simulações.

Ao final das otimizações, os resultados foram agrupados e organizados por meio de uma programação de rotinas no *Matlab* R2018b para a definição da curva das soluções ótimas (combinação de parâmetros), identificada por Pareto Front. A Figura 5-46 apresenta esquematicamente o processo de otimização multiobjetivo tendo como ponto base o modelo das Residências Referenciais.

Figura 5-46: Processo da otimização multiobjetivo para dimensionamento de janelas e elementos de controle solar com e sem o conceito *Passive House*.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Para a variação do dimensionamento das janelas, utilizou-se como referência os valores mínimos de iluminação e ventilação natural estabelecidos pelo RTQ-R (INMETRO, 2012b). Os ambientes de permanência prolongada devem apresentar um percentual de 8% de áreas mínimas de abertura para ventilação em relação à área de piso. Para atender ao requisito de iluminação natural, a soma das áreas de abertura para iluminação de cada ambiente deve corresponder a, no mínimo, 12,5% da área útil total do ambiente. Para dormitórios com mais de 15 m², adota-se esse valor para o cálculo. Para portas e janelas, foi respeitada a largura mínima de 80 cm. Para cada ambiente de permanência prolongada das edificações referenciais ZB1, ZB2 e ZB3, foi calculada a menor área possível de janelas segundo o RTQ-R e estabeleceu-se como áreas máximas a totalidade das fachadas do ambiente.

Para fins de simplificação das otimizações, as janelas foram unificadas sempre que a fachada de um mesmo ambiente apresentasse mais de uma janela, mantendo-se a mesma área efetiva de janela.

Para o dimensionamento dos elementos de controle solar externos, variou-se a dimensão dos elementos de controle solar dos ambientes de permanência prolongada que possuem janelas orientadas para as direções norte, leste e oeste.

A Tabela 5-30 resume o total de simulações realizadas nessa etapa e o tempo das simulações transcorrido em horas.

Tabela 5-30: Total de simulações da etapa.

Residências	Modelos Computacionais	Número de simulações	Tempo de simulação (h)
Residência ZB1	Dimensionamento janelas e elementos de controle solar externos	10.000	29
	Dimensionamento janelas e elementos de controle solar externos + PH	10.000	19
Residência ZB2	Dimensionamento janelas e elementos de controle solar externos	10.000	79
	Dimensionamento janelas e elementos de controle solar externos + PH VN	10.000	54
Residência ZB3	Dimensionamento janelas e elementos de controle solar externos	10.000	34
	Dimensionamento janelas e elementos de controle solar externos + PH VN	10.000	61
Total	-	60.000[16]	276

CA: Modelo condicionado artificialmente; VN: Modelo ventilado naturalmente.
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Assim como na etapa anterior, foram definidas as soluções a serem analisadas pelo trabalho, considerando-se o número elevado de soluções geradas pelas simulações computacionais. Assim, para a análise, examinou-se comparativamente os resultados de três soluções:

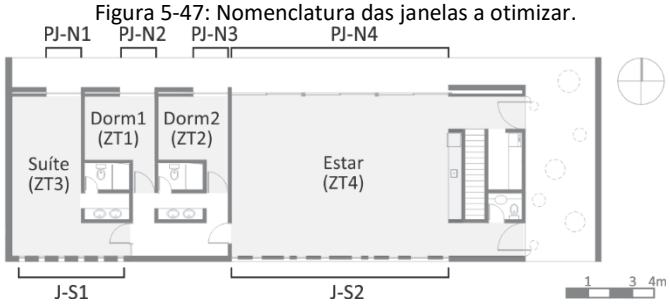
[16] Número representativo das simulações finais, sem considerar as simulações de configuração dos modelos.

a) Edificação referencial, ZB1, ZB2 e ZB3, condicionada artificialmente (AC);
b) Solução do Ponto Médio do *Pareto Front* (PFM);
c) Solução mais próxima ao vértice do Quadrante PH, que é a representação gráfica do cruzamento do valor do consumo de condicionamento artificial de 15 kWh/m².a com o total de desconforto de 10% (VPH).

5.6.1 Residência ZB1

A Figura 5-47 indica as janelas otimizadas da Residência ZB1: PJ-N1, PJ-N2, PJ-N3, PJ-N4, J-S1 e J-S2. As janelas J-S2, J-S1 e PJ-N4 foram unificadas, desse modo, foram consideradas 6 janelas para o dimensionamento da variação de áreas.

Figura 5-47: Nomenclatura das janelas a otimizar.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A Tabela 5-31 apresenta a área e o percentual de janelas de cada ambiente de permanência prolongada da Residência Referencial ZB1 AC, assim como exibe os valores de dimensionamento utilizados como parâmetro das simulações que definem as melhores soluções. O Apêndice H, Tabela H-1, apresenta as dimensões e as áreas de iluminação e de ventilação natural com maiores detalhes.

Tabela 5-31: Dimensões atuais, mínimas e máximas propostas por ambiente para as janelas da Residência ZB1

Ambiente	Janela/ Abertura (%)	Edificação Referencial AC		Parâmetros de simulação			
				Mínimo		Máximo	
		(m²)	(%)*	(m²)	(%)*	(m²)	(%)*
Dorm1 (ZT1)	**PJ-N2** 100%	4,16	35,92	1,68	14,51	8,19	70,73
Dorm2 (ZT2)	**PJ-N3** 100%	4,16	35,92	1,68	14,51	8,19	70,73
Suíte (ZT3)**	**PJ-N1** 100%	4,16	35,23	1,68	12,70	8,06	145,60
	J-S1 0%	1,12		0,22		13,78	
Estar (ZT4)	**J-S2** 100%	11,05	41,80	4,2	12,57	25,22	59,19
	PJ-N4 50%	24,57		6,51		25,22	
Média			**37,22**		**13,57**		**86,56**

* Em relação à área do piso do ambiente.
* Cálculo relativo a 15m² (ambiente tem 27,3m²).

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A Tabela 5-32 apresenta o percentual de área de janela com relação à fachada dos ambientes de permanência prolongada para cada orientação solar da Residência ZB1, bem como os percentuais mínimos e máximos utilizados como parâmetro para as simulações que conduziram à otimização. O Apêndice I, Figura I-1, exemplifica a fachada dos ambientes de permanência prolongada para cada orientação solar utilizadas para o cálculo percentual de janelas da Residência ZB1.

Tabela 5-32: Percentual de janelas por orientação solar.

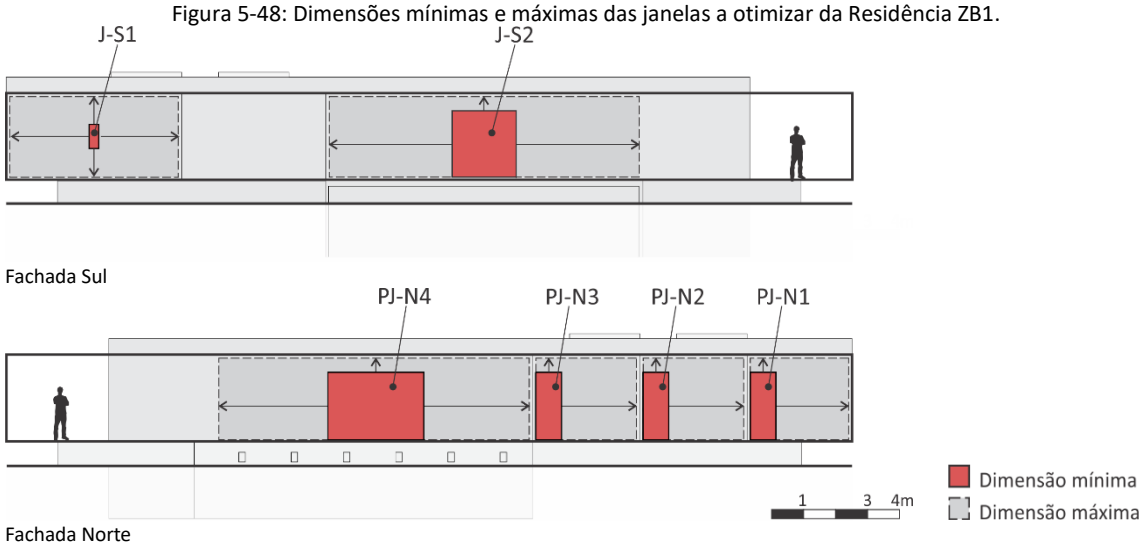
Fachada	Janela	Edificação Referencial AC (%)*	Parâmetros de simulação	
			Mínimo (%)*	Máximo (%)*
Norte	PJ-N1, PJ-N2, PJ-N3, PJN4	59,09	18,42	79,20
Sul	J-S1, JS2	24,08	8,60	77,12
Leste	-	-	-	-
Oeste	-		-	-
Média		41,58	13,51	78,16

* Em relação à área de fachada dos ambientes de permanência prolongada.

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A Figura 5-48 ilustra as dimensões mínimas e máximas das janelas utilizadas em cada fachada da Residência ZB1 na simulação para a definição da otimização.

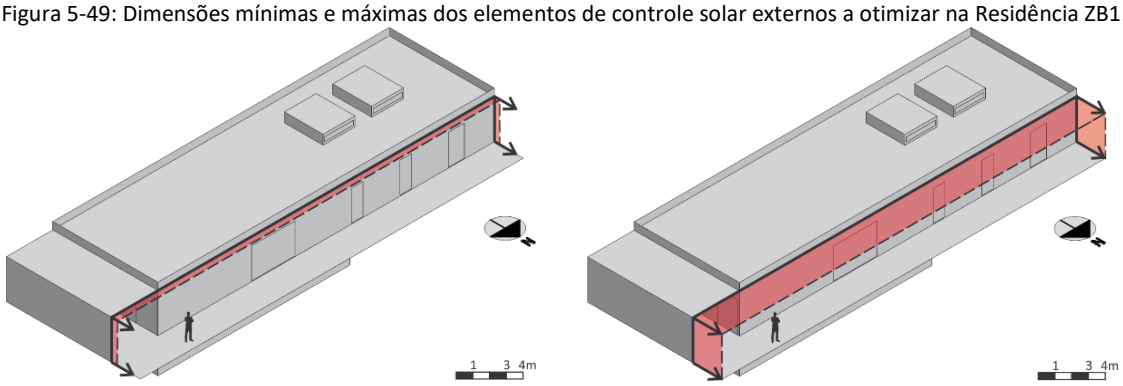
Figura 5-48: Dimensões mínimas e máximas das janelas a otimizar da Residência ZB1.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Simultaneamente à otimização do dimensionamento das janelas, também foi realizada a simulação do dimensionamento dos elementos de controle solar externos, no caso os brises horizontais e verticais da fachada norte da Residência ZB1. Conforme é apresentado na Figura 5-49 e na Tabela 5-33, foi definida uma variação entre 0,05 e 2 m para a extensão do elemento como parâmetro de simulação.

Figura 5-49: Dimensões mínimas e máximas dos elementos de controle solar externos a otimizar na Residência ZB1.



Dimensão mínima Dimensão máxima

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Tabela 5-33: Dimensionamento dos elementos de controle solar externos da Residência ZB1.

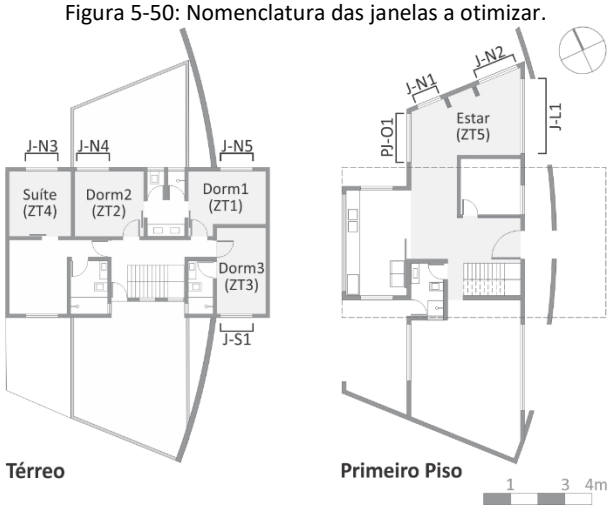
Fachada	Disposição	Edificação Referencial AC (m)	Parâmetros de simulação: dimensão do elemento (m)	
			Mínimo	Máximo
Norte/Leste/Oeste	Horizontal/ Vertical	2,00	0,05	2,00

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

5.6.2 Residência ZB2

A Figura 5-50 ilustra as janelas utilizadas na otimização da Residência ZB2: J-N1, J-N2, J-N3, J-N4, J-N5, JS1, J-L1 e PJ-O1. Não houve a necessidade de unificar as janelas nesse caso.

Figura 5-50: Nomenclatura das janelas a otimizar.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A Tabela 5-34 apresenta a área e o percentual de janela de cada ambiente de permanência prolongada da Residência Referencial ZB2 AC, bem como os valores de dimensionamento utilizados como parâmetro das simulações que definem as melhores soluções. No Apêndice H, a Tabela H-2 apresenta de modo detalhado as janelas utilizadas na simulação.

Tabela 5-34: Dimensões atuais, mínimas e máximas propostas por ambiente para as janelas da Residência ZB2.

Ambiente/ Área	Janela/ Abertura (%)	Edificação Referencial AC		Parâmetros de simulação			
				Mínimo		Máximo	
		(m²)	(%)*	(m²)	(%)*	(m²)	(%)*
Dorm1 (ZT1) 12,38 m²	**PJ-N5** (50%)	2,56	20,36	2,1	16,96	6,46	52,18
Dorm2 (ZT2) 12,23m²	**PJ-N4** (50%)	2,52	20,61	1,96	16,03	9,28	75,84
Dorm3 (ZT3) 12,91m²	**J-S1** (50%)	2,52	19,52	2,1	16,27	4,25	16,27
Suíte (ZT4) 11,04m²	**JN-3** (50%)	2,52	22,83	1,82	16,49	7,95	16,49
Estar (ZT5) 47,47m²	**J-N1** (50%)	2,28	49,78	1,33	16,12	4,77	77,72
	J-N2 (50%)	3,23		1,52		7,42	
	J-L1 (50%)	12,36		2,40		13,91	
	PJ-O1 (50%)	5,76		2,40		10,8	
Média			**33,27**		**20,46**		**59,62**

* Em relação à área do piso do ambiente.

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Na Tabela 5-35 apresenta o percentual de área de janela em relação à fachada dos ambientes de permanência prolongada para cada orientação solar da Residência ZB2, assim como demonstra os valores mínimos e máximos utilizados como parâmetro para as simulações que conduziram à otimização. O Apêndice I, Figura I-2, apresenta a fachada dos ambientes de permanência prolongada para cada orientação solar utilizadas para o cálculo percentual de janelas da Residência ZB2.

Tabela 5-35: Percentual de janelas por orientação solar.

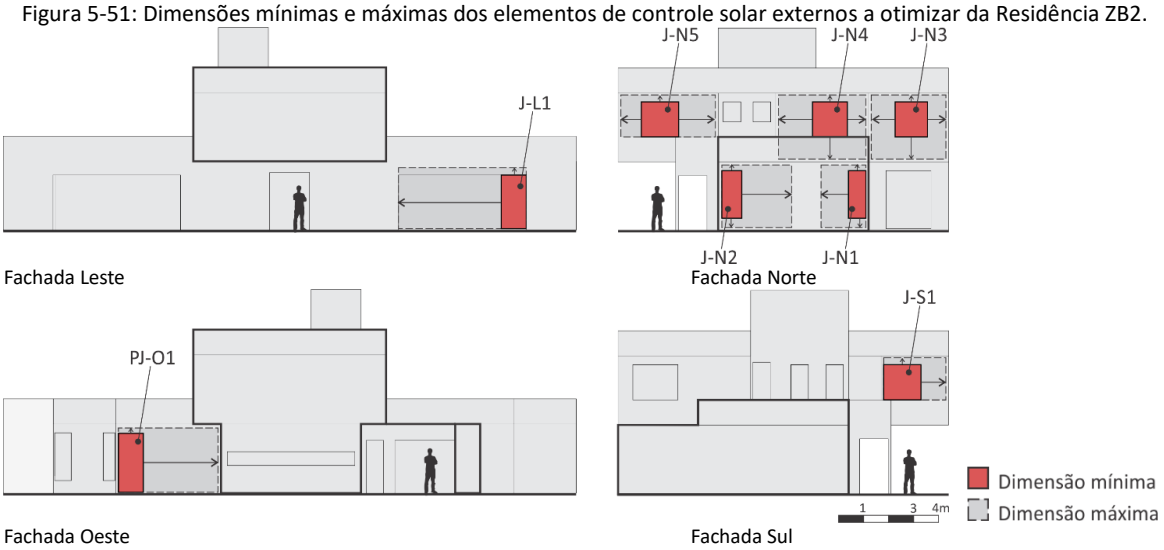
Fachada	Janela	Edificação Referencial AC	Parâmetros de simulação	
			Mínimo	Máximo
		(%)*	(%)*	(%)*
Norte	J-N1, J-N2, J-N3, J-N4, J-N5	27,27	18,21	74,85
Sul	J-S1	34,05	28,38	57,43
Leste	J-L1	29,93	5,81	33,67
Oeste	PJ-O1	27,39	11,41	51,36
Média		**29,66**	**15,95**	**54,33**

* Em relação à área de fachada dos ambientes de permanência prolongada.

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A Figura 5-51 ilustra as dimensões mínimas e máximas das janelas utilizadas, para cada fachada da Residência ZB2, tendo em vista a simulação para a definição da otimização.

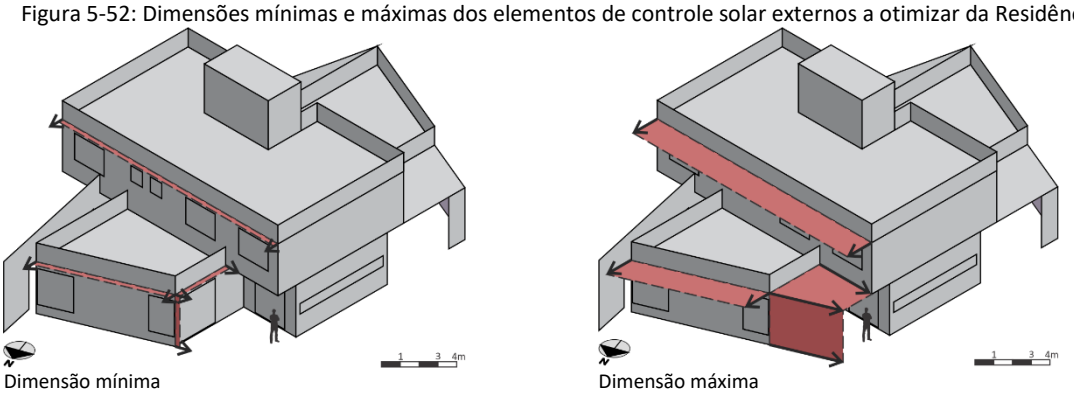
Figura 5-51: Dimensões mínimas e máximas dos elementos de controle solar externos a otimizar da Residência ZB2.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Para a residência ZB2[17], foram adicionados elementos de controle solar horizontais na fachada norte, nos ambientes de permanência prolongada do pavimento superior e do pavimento inferior. Também foram acrescentados elementos de controle solar horizontais e verticais na fachada oeste. A Figura 5-52 ilustra esses elementos incorporados e também demonstra a variação de tamanho utilizada na otimização.

Figura 5-52: Dimensões mínimas e máximas dos elementos de controle solar externos a otimizar da Residência ZB2.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Na Tabela 5-36 , apresentam-se os parâmetros máximos e mínimos utilizados para a otimização dos elementos de controle solar externos da Residência ZB2. Para os elementos de controle solar horizontal do pavimento superior e inferior, houve uma variação de 0,5 a 1,5 m. Para o elemento de controle solar horizontal e vertical da fachada oeste, houve uma variação de 0,05 a 3,20 m. Como a

[17] A Residência ZB2 tem como elementos de controle solar externos volumes em balanço na fachada leste e norte/oeste e uma superfície curva externa na fachada leste. Originalmente também apresentava muros que obstruíam a radiação solar, principalmente na fachada norte do pavimento inferior, porém optou-se por retirar as obstruções externas à edificação para que não interferissem na análise desses elementos.

edificação Referencial não contém esses elementos de controle solar externos, considerou-se, para a análise percentual dos resultados, que a dimensão máxima da simulação corresponde a 100%.

Tabela 5-36: Dimensionamento dos elementos de proteção solar externos da Residência ZB2.

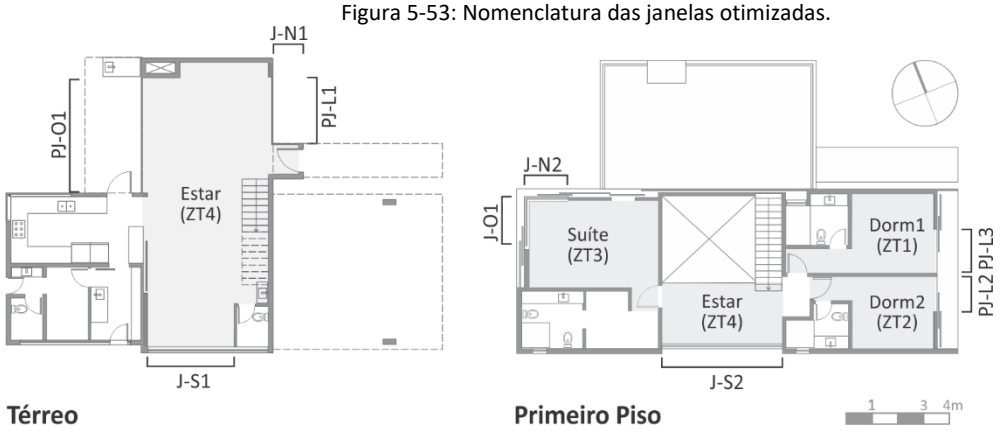
Fachada	Disposição	Edificação Referencial AC (%)	Parâmetros de simulação: dimensão do elemento (m)	
			Mínimo	Máximo
Norte	a. Horizontal (Pav. Sup.)	0,00	0,05	1,50
	b. Horizontal (Pav. Inf.)	0,00	0,05	1,50
Oeste	c. Horizontal/vertical	0,00	0,05	3,20

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

5.6.3 Residência ZB3

As janelas que tiveram a otimização do dimensionamento na Residência ZB3 são ilustradas na Figura 5-53. Ao total foram otimizadas as dimensões de nove janelas: J-N1; J-N2; J-S1; J-S2; PJ-L1; PJ-L2; PJ-L3; PJ-O1 e J-O1, haja vista que a janela J-S2 foi unificada.

Figura 5-53: Nomenclatura das janelas otimizadas.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A Tabela 5-37 apresenta a área e o percentual de janelas dos ambientes de permanência prolongada da edificação Referencial ZB3 AC, além das dimensões mínimas e máximas utilizadas como parâmetro das simulações para as melhores soluções. No Apêndice H, a Tabela H-3 exemplifica detalhadamente as dimensões e as áreas de iluminação e ventilação natural.

Tabela 5-37: Dimensões atuais, mínimas e máximas, propostas para as janelas da Residência ZB3.

Ambiente	Janela/ Abertura (%)	Edificação Referencial AC		Parâmetros de simulação			
				Mínima		Máxima	
		(m²)	(%)*	(m²)	(%)*	(m²)	(%)*
Dorm1 (ZT1)	**PJ-L3** (100%)	3,9	28,91	1,68	12,5	8,7	64,49
Dorm2 (ZT2)	**PJ-L2** (100%)	3,9	31,89	1,68	13,74	8,7	71,14
Suíte (ZT3)	**JN-2** (50%)	1,92	28,80	1,2	16,00	11,02	121,80
	JO-1 (50%)	2,4		1,2		7,25	
Estar (ZT4)	**J-S1** (100%)	2,04	45,42	1,23	12,61	9,86	69,90
	PJ-O1 (50%)	12,47		1,68		12,47	
	J-N1 (0%)	3,77		1,68		3,77	
	PJ-L1 (66%)	7,1		1,68		7,1	
	J-S2 (100%)	5,33		2,25		14,06	
Média			**33,76**		**13,70**		**81,83**

*Em relação à área do piso do ambiente.

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Na Tabela 5-38, é apresentado o percentual de área de janela em relação à fachada dos ambientes de permanência prolongada para cada orientação solar da Residência ZB3, bem como os percentuais mínimos e máximos utilizados como parâmetro para as simulações que conduziram às melhores soluções. O Apêndice I, Figura I-3, apresenta a fachada dos ambientes de permanência prolongada para cada orientação solar utilizadas para o cálculo percentual de janelas da Residência ZB3.

Tabela 5-38: Percentual de janelas por orientação solar.

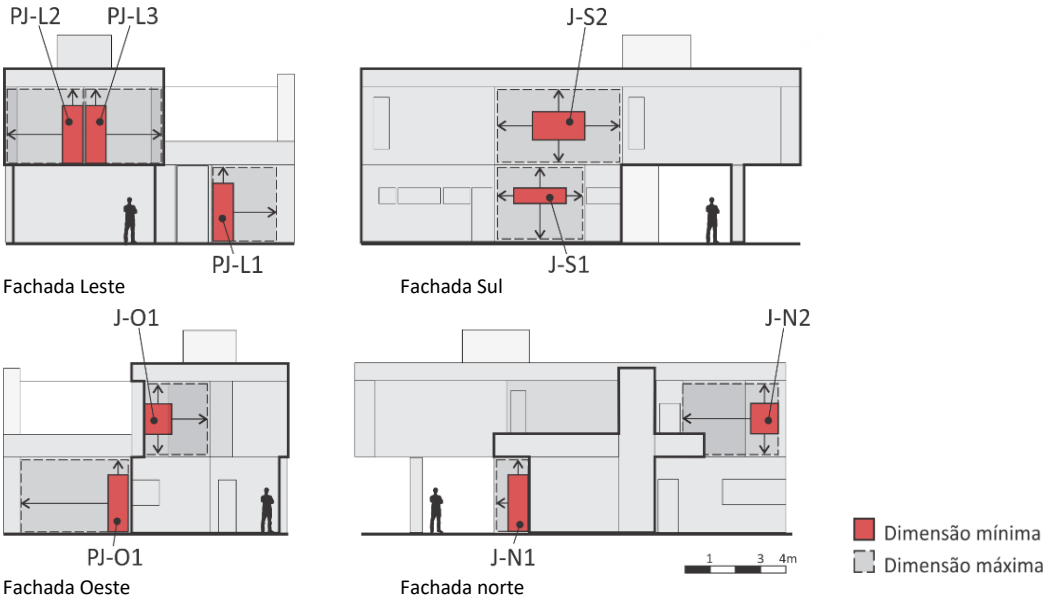
Fachada	Janela	Edificação Referencial AC	Parâmetros de simulação	
			Mínimo	Máximo
		(%)*	(%)*	(%)*
Norte	JN1, N2	10,42	5,27	27,07
Sul	J-S1, JS2	18,47	8,73	59,93
Leste	PJL-1, PJL2, PJL3	31,71	10,72	52,14
Oeste	JO-1, PJO-1	67,84	13,14	89,96
Média		**32,11**	**9,47**	**57,28**

*Em relação à área de fachada dos ambientes de permanência prolongada.

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A Figura 5-54 ilustra as dimensões mínimas e máximas das janelas utilizadas em cada fachada da Residência ZB3, mobilizadas para a simulação de definição das melhores soluções.

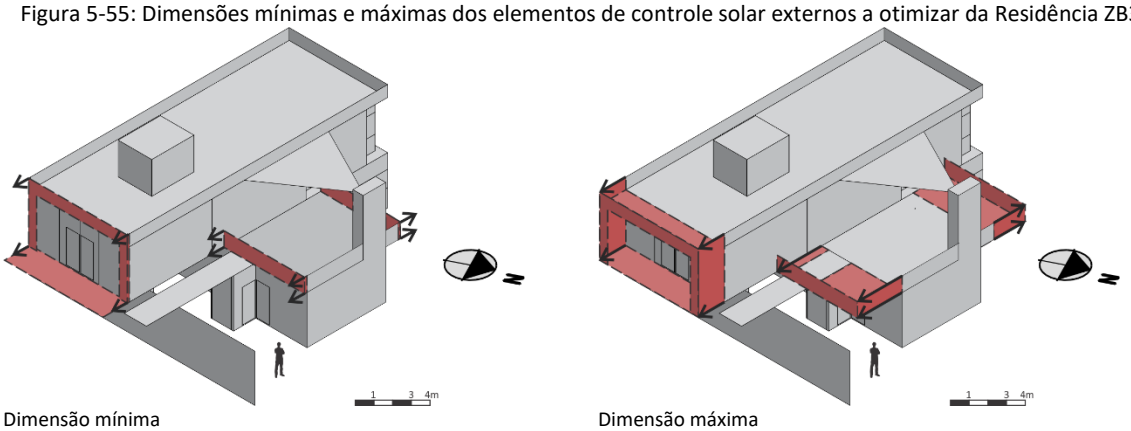
Figura 5-54: Dimensões mínimas e máximas das janelas a otimizar da Residência ZB3.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A Figura 5-55 ilustra as dimensões mínimas e máximas dos elementos de controle solar externos localizados na fachada da Residência ZB3, utilizados para a simulação de definição das melhores soluções.

Figura 5-55: Dimensões mínimas e máximas dos elementos de controle solar externos a otimizar da Residência ZB3.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Além da otimização do dimensionamento das janelas, também foi realizada a simulação do dimensionamento dos elementos de controle solar externos, no caso, os brises horizontais e verticais da fachada leste, e horizontais da fachada leste e oeste da Residência ZB3. A Tabela 5-39 apresenta os valores de variação para o dimensionamento do elemento utilizado como parâmetro de simulação.

Tabela 5-39: Dimensionamento dos elementos de proteção solar externa da Residência ZB3.

Fachada	Disposição	Edificação Referencial AC (m)	Parâmetros de simulação: dimensão do elemento (m)	
			Mínimo	Máximo
Leste	a. Horizontal/vertical	0,80	0,10	1,50
	b. Horizontal	1,40	0,05	2,50
Oeste	c. Horizontal	1,95	1,05	2,50

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

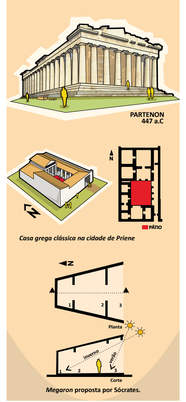
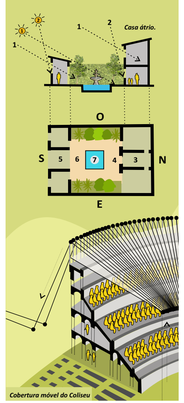
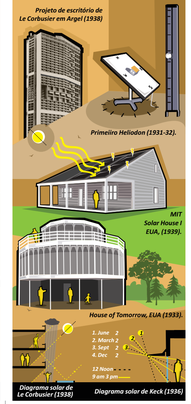
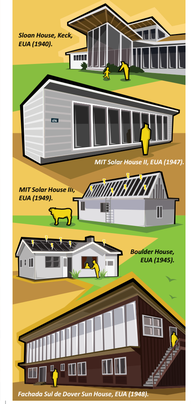
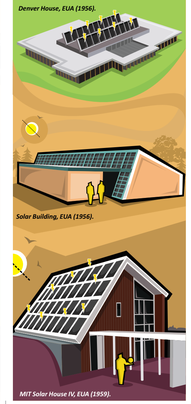
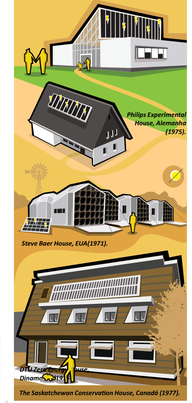
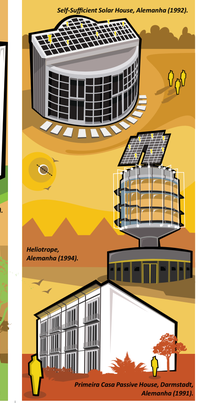
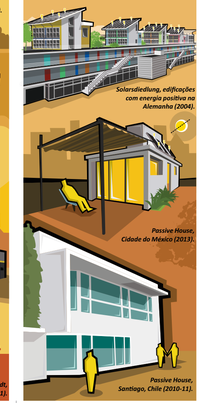
Após essa última etapa, as análises elaboradas conduziram as discussões dos resultados e as considerações finais do trabalho, indicando quais parâmetros das estratégias do conceito *Passive House* demonstraram ter maior contribuição na redução do consumo de energia e promoção da melhoria do conforto térmico. Adicionalmente, e de modo não menos importante, o estudo do dimensionamento das janelas e dos elementos de controle solar externos revelou que esses elementos são muito influentes no desempenho termoenergético das edificações, considerando-se ou não a aplicação do conceito *Passive House*.

CAPÍTULO 6. RESULTADOS

6.1 SÍNTESE HISTÓRICA DAS EDIFICAÇÕES PASSIVAS NO BRASIL E NO MUNDO

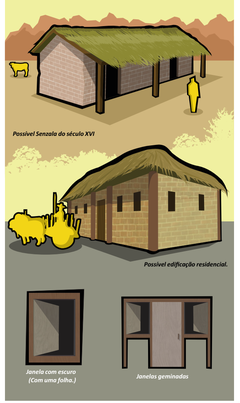
Nas próximas páginas, são apresentadas duas linhas do tempo que sintetizam em períodos as características da arquitetura passiva, relacionando esses elementos com o contexto ambiental, energético e tecnológico no âmbito nacional e internacional.

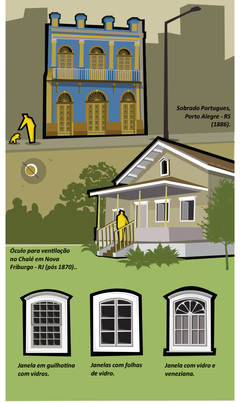
Outras duas linhas do tempo, uma nacional e outra internacional, são apresentadas em forma de listagem cronológica dos acontecimentos relacionados à arquitetura passiva, ao meio ambiente e à energia. A linha do tempo internacional é apresentada no Apêndice J e a nacional no Apêndice K.

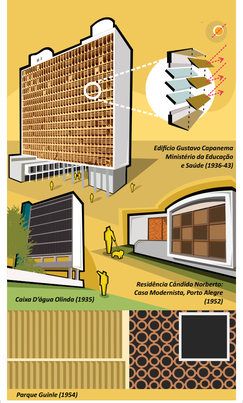
	Grécia Séc. XII a II a.C.	Roma Séc. VIII a.C. a V d.C.	Idade Média Séc. V a XV	Renascimento e Barroco Séc. XIV a XVIII	Pós-Rev. Industrial Séc. XVIII a XIX	1900 a 1930	1930 a 1940	1940 a 1950	1950 a 1960	1960 a 1980	1980 a 1990	1990 a 2000	Atualidade
	Idade Antiga		Idade Média		Idade Moderna				Idade Contemporânea				
	476		1453		1789								
Exemplos													
Características passivas/ativas	*Edificações utilizam estratégias passivas: orientação solar; proteção solar, uso de colunas que atuam no sombreamento. As estratégias ativas se reduzem ao uso de lenha para aquecimento artificial dos ambientes.*	*Edificações utilizam estratégias passivas: Orientação solar; proteção solar; massa térmica; efeito estufa com uso de vidro; resfriamento evaporativo; vegetação de folhas caducas. As estratégias ativas são utilizadas com intensidade para o aquecimento artificial do ar e da água por meio dos sistemas de hipocausto e caldário.*	*A arquitetura tinha preocupações defensivas e o conforto era mais espiritual que físico. Houve poucas evoluções quanto a estratégias passivas. Edificações utilizam estratégias passivas: uso de vidro para aquecimento de estufas e nas janelas; vidros coloridos auxiliam a controlar a radiação solar direta; arco ogival possibilitou uso abundante de luz natural nas catedrais góticas.*	*A diminuição do poder da Igreja e o Antropocentrismo aceleram os avanços em todas as áreas, incluindo os aspectos arquitetônicos e energéticos. Como estratégias passivas são utilizadas: arcadas e colunas anteriores à fachada; sistema de cortinas externas; efeito chaminé. Sistema "covoli" e "ventidotti"; invenção da mansarda. Barroco: predomínio crescente dos vãos sobre as paredes.*	*As transformações tecnológicas influenciaram a arquitetura, a relação com os materiais, as técnicas e com o clima. Estratégias passivas: Aquecedor solar de Morse; estufas solares; caixa de aquecimento solar; isolamento térmico de estufas; primeiro aquecedor solar. Tornou-se possível construir com materiais finos/leves permitindo a entrada da luz e da radiação solar na totalidade da fachada.*	*Petróleo surge como substituição ao carvão. Descoberta de novos poços de petróleos/gás (Califórnia, Iraque, Venezuela e Iran), locais anteriormente pensados como potenciais fontes de energia solar. Confiança energética: Petróleo/gás a preços baixos. Eletricidade possibilita microclimas controláveis, independentes do clima. Popularização da lâmpada elétrica ampliam jornadas de trabalho.*	*Edificações utilizam estratégias passivas: orientação solar; radiação solar direta, proteção solar (brises); primeiros diagramas solares. Ativas: ar-condicionado; lâmpada incandescente e florescente; sistema de aquecimento de piso. Tecnologias: vidro duplo e triplo, estudos quanto a orientação solar, diagramas solares e heliodon.*	*Até a primeira metade da década predomina as edificações passivas: orientação solar; proteção solar e massa térmica. A partir da segunda metade da década predomina as edificações com tecnologias ativas: ar-condicionado; lâmpada incandescente e florescente; sistema de aquecimento de piso. Tecnologias: vidro duplo e triplo, estudos quanto a orientação solar, diagramas solares e heliodon.*	*Edificações utilizam estratégias passivas: orientação solar; proteção solar; massa térmica é inventada a tecnologia fotovoltaica. Estratégias ativas: ar-condicionado; lâmpada incandescente e florescente; sistema de coleta, armazenamento e distribuição do calor solar, com auxílio de meios mecânicos e coletores solares independente da arquitetura.*	*Tecnologias passivas: orientação solar; proteção solar; massa térmica, parede Trombe, superisolamento e painel fotovoltaico. O ano de 1974 marca o início do superisolamento. Tecnologias ativas: trocador de calor. Até a década de 1970, cresce o uso do ar-condicionado em conjunto com edificações envidraçadas sem preocupação com eficiência energética. Nas décadas de 1970/80 a questão solar e energética não era significativa na academia.*	*As principais estratégias passivas: orientação e proteção solar; superisolamento; painel fotovoltaico; radiação solar para aquecimento direto e indireto, massa térmica para aquecer e resfriar, ventilação natural e etc. Esboço do conceito Passive House. Predomínio do vidro e uso crescente do ar-condicionado e meios artificiais. Uso de trocador de calor.*	*Estratégias passivas adotadas: orientação e proteção solar; superisolamento; painel fotovoltaico; radiação solar para aquecimento direto e indireto, massa térmica para aquecer e resfriar, ventilação natural e etc. Início de amplo uso de simulações computacionais de edificações. Popularização do conceito Passive House. Predomínio do uso de vidro e do ar-condicionado. Uso de trocador de calor.*	*Principais estratégias passivas: orientação e proteção solar; superisolamento; painel fotovoltaico; radiação solar para aquecimento direto e indireto, massa térmica para aquecer e resfriar; ventilação natural e coberturas e paredes verdes. Amplas simulações computacionais de edificações. Estudo/aplicação do conceito Passive House em climas quentes. Extenso uso de vidro e do ar-condicionado. Uso de trocador de calor.*
Síntese do período	**Arquitetura passiva solar e ativa para aquecimento dos ambientes. Nascia no ocidente a arquitetura solar.**	**Arquitetura passiva solar, uso de vidro e massa térmica. Arq. ativa com aquecimento do ar e da água.**	**Arquitetura passiva negligenciada em função da segurança e do plano espiritual.**	**Predomino estético e compositivo e retomada de alguns princípios da arquitetura passiva.**	**Revolução dos materiais e técnicas construtivas.**	**Início da era do petróleo e primeiras experiências com casas solares na era moderna.**	**Primeiras experiências com casas solares nos Estados Unidos.**	**Consolidação das casas solares nos Estados Unidos.**	**Popularização do ar-condicionado, da lâmpada florescente e das casas solares ativas.**	**Predomínio das casas solares passivas. Início do superisolamento.**	**Início da certificação do superisolamento e primeiros exemplos de casas experimentais passivas na América Latina.**	**Consolidação do superisolamento e do conceito Passive House**	**Adaptação do conceito Passive House em climas quentes e a busca do consumo quase nulo e da energia positiva**
Situação energética/ambiental	*Energia motriz mais eficiente e solicitada é a do homem (mão de obra escrava). Era utilizada a madeira para aquecer as edificações no frio. A procura pela madeira devastou as árvores, e o uso do carvão foi regulado. A escassez de madeira e lenha elevaram os preços dos combustíveis.*	*Utilização de moinhos com força animal ou hidráulica, porém, dependência da mão de obra escrava. Consumo de madeira muito grande: para a indústria, para a construção de barcos, para as casas, para aquecer banhos públicos e particulares. A crise de combustível elevou o custo da madeira e fez com que os romanos adotassem técnicas gregas de arquitetura solar.*	*A escravidão foi diminuindo, gradualmente, e a força humana foi substituída pela tração animal e fontes renováveis, como o moinho hidráulico e eólico. A energia hidráulica teve tanta importância na Idade Média quanto o petróleo teve no século XX. O consumo de lenha devastou florestas. O domínio da Igreja dificultava o desenvolvimento de novas tecnologias.*	*A energia baseava-se na lenha, tração animal e fontes renováveis hidráulica/vento. As rodas d'água são aperfeiçoadas. Diminui o poder da Igreja e o Antropocentrismo acelera avanços: aprimoramento da navegação à vela; tecnologia mecânica e as primeiras tentativas de usar o vapor.*	*As máquinas substituem a energia muscular. Dependência do carvão/madeira. Início da era dos combustíveis fósseis: carvão mineral é usado em larga escala e petróleo é industrializado. Energia solar é estudada como alternativa. No final do séc. XIX, é inventada a lâmpada incandescente. A eletricidade é usada no transporte público e para iluminar as ruas das cidades. Surge o telégrafo elétrico, telefone, gramofone e o cinema. Desenvolvimento Pós-Revolução Industrial é apoiado em energia não renovável: gás natural/petróleo.*	*Estudos quanto à radiação solar e à projeção da sombra das edificações. Estratégias passivas utilizadas: orientação solar; aquecimento de água; estudo solar. Ativas: ar-condicionado, lâmpada elétrica; independente sistema de coleta, armazenamento e distribuição do calor solar com auxílio de meios mecânicos. Materiais e técnicas construtivas: popularização do vidro e da estrutura.*	*Nos Estados Unidos, o interesse maior pela eficiência energética surgiu devido a Segunda Guerra Mundial, quando havia potencial escassez de energia. Estados Unidos e países europeus buscavam o aquecimento com radiação solar para diminuir os gastos energéticos.*	*Ligeira quebra na pesquisa e desenvolvimento sobre a energia solar durante a Segunda Guerra Mundial (1939-1945). Depois da Guerra a preocupação com o esgotamento dos combustíveis fósseis potencializou a urgência para viabilização da casa solar. Entre 1947 e 1948 a produção global de petróleo aumenta, mas não chega aos Estados Unidos, a casa solar moderna torna-se importante nas discussões energéticas.*	*Pós-Segunda Guerra Mundial (1939-1945) até década de 1970 houve poucos problemas energéticos nos EUA. O petróleo barato diminuiu o interesse em fontes energéticas alternativas. As companhias elétricas/gás dos EUA incentivavam o consumo, aumentando a popularidade de aquecimento mecânico. Crença de que a energia nuclear é a solução energética do futuro.*	*O petróleo era abundante e barato, a energia renovável não era um tema de importância. Até 1961, o carvão era a principal fonte primária de energia no mundo, quando foi ultrapassado pelo petróleo. Em 1960, foi fundada a OPEP. Em 1973, a Crise Internacional do Petróleo eleva o seu preço, ocorrendo novamente em 1979.*	*Os preços da energia cairam, porém, a preservação ambiental está cada vez mais incluída na questão energética. No final da década de 1980, diminuiu o custo da produção de eletricidade, tornando-se mais viável o uso doméstico. Em 1986, acontece o acidente nuclear em Chernobyl, e ambientalistas se colocam contra as usinas nucleares.*	*Em 1991, houve uma nova crise do petróleo, gerando impactos econômicos e ecológicos. Crescimento do uso de programas computacionais para simular o consumo e energético de edificações. Em 1996, tem início o desenvolvimento do programa computacional EnergyPlus, tornando-se referência para estudos acadêmicos de desempenho energético.*	*Em 2011, há um desastre na usina nuclear de Fukushima/Japão demonstrando os perigos das usinas nucleares. Preocupações com eficiência energética e com o meio ambiente são generalizadas. A União Europeia visa reduzir 90% dos gases do efeito estufa até 2050 e, a partir de 2021, todos os edifícios sejam com consumo quase zero (NZEB). As edificações representam cerca de 40% do consumo de energia primária e 24% da emissão de gases com efeito de estufa.*

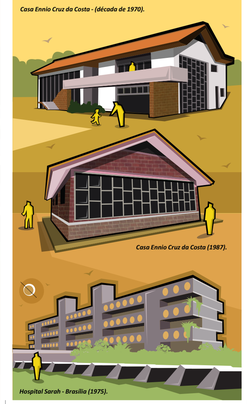
LINHA DO TEMPO DA ARQUITETURA PASSIVA NO MUNDO

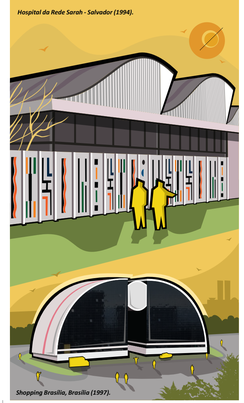
Exemplos

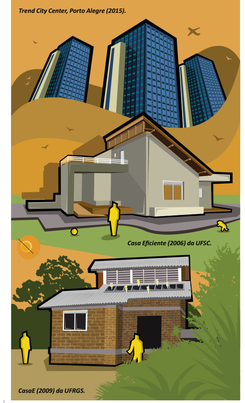












Características passivas/ativas

Não há registro das primeiras moradias pelo provável uso de materiais vegetais. Nas edificações indígenas: Uso de tecnologias para climas quentes e frios: ventilação natural, filtro da radiação solar direta, ventilação por efeito chaminé, massa térmica para aquecimento e resfriamento; cobertura vegetal permeável a ventilação e impermeável à radiação solar, etc. Ocas sem divisões internas, facilitando a circulação do ar. Uso de rede auxilia a troca de calor. Uso de redes.	Uso da tecnologia indígena para adaptação ao clima local. Predomina o uso de materiais vegetais. As janelas são com "escuro" e, algumas vezes, geminadas. Uso de redes.	Taipa de pilão ou adobe; paredes externas com dimensões de 30 cm a 120 cm. Telha de barro: permite saída do ar quente. Elementos de controle da radiação solar, ventilação e privacidade: rótulas; gelosias; muxarabi; urupemas; alpendres/varandas, pátios centrais. Uso de redes.	Alvenaria de tijolos permite mais espaço para janelas. Janelas com vidro, guilhotina, veneziana. Uso de pátio interno; revestimento externo com cal/azulejo refletem os raios solares. Óculos para ventilação do ático, bandeira internas e externas, forros ventilados. Pé-direito elevado e porão. Uso de redes em menor escala.	Uso de varandas, grandes beirais, cor predominantemente branca e uso de azulejos que refletem os raios solares.	Uso de elementos de controle solar: brises (verticais, horizontais, mistos, fixos e móveis), cobogós e varandas. Telhado verde e pilotis que permitem a circulação do ar. Cor predominantemente branca e uso de azulejos que refletem os raios solares.	Arquitetura com predomínio de fechamentos em vidro e tendências puristas. Uso abundante de ar-condicionado e meios artificiais para adequação climática.	Casas experimentais utilizam estratégias passivas: radiação solar para aquecimento direto e indireto, massa térmica para aquecimento e resfriamento, ventilação natural, orientação solar da edificação, etc. Predomínio de grandes fechamentos em vidro e uso abundante de ar-condicionado e meios artificiais para adequação climática.	Desenvolvimento e utilização de programas computacionais nacionais com vistas a aumentar o conforto térmico e a eficiência energética das edificações. Na arquitetura, predomina grandes fechamentos em vidro e uso abundante de ar-condicionado e meios artificiais para adequação climática.	Desenvolvimento e utilização de programas computacionais nacionais de eficiência energética. Casas experimentais passivas: radiação solar para aquecimento direto e indireto, massa térmica para aquecer e resfriar ventilação natural, orientação solar da edificação, painéis fotovoltaicos e etc. Popularização de coberturas/paredes verdes. Estudos da aplicação do conceito Passive House. Predomínio estético de fechamentos em vidro e uso crescente do ar-condicionado (de pouca eficiência). Construções populares financiadas pelo governo pouco consideram o clima.

Pré-história Brasileira

Período anterior à colonização

Séc. XVI

1500 — 1530

Pré-colonial

Séc. XVII e XVIII

Período Colonial

Séc. XIX

1815 — 1822 — 1889

Reino Unido — *Período Imperial*

1900 a 1930

Primeira República (República Velha)

1930 a 1960

1930 — 1945

"Era Vargas" — *Quarta República*

1960 a 1970

1964

Ditadura Militar

1970 a 1990

1985

1990 a 2000

Sexta República

Atualidade

Síntese do período

Predomínio de construções de moradias com uso de materiais locais, integradas ao clima e de baixo impacto ambiental.	**Chegada dos europeus ao Brasil e adaptação com tecnologias indígenas.**	**Período de grande influência da arquitetura árabe.**	**Extinção da influência árabe com a chegada da Família Real ao Brasil. Início da influência da industrialização na arquitetura brasileira.**	**A arquitetura busca uma identidade nacional: Dois movimentos ganham força, o neocolonial e o modernismo. Busca-se elementos de adaptação ao clima.**	**A arquitetura moderna brasileira valoriza/se apropria de elementos de adaptação climática, como: brise-soleil e cobogós.**	**Arquitetura passiva perde espaço: A arquitetura brasileira pós-Brasília - influência norte-americana e negligência com as questões climáticas e energéticas**	**Arquitetura passiva ganha força. Crise do Petróleo, projetos bioclimáticos e casas experimentais.**	**Primeiros esforços para laboratórios de Conforto Ambiental, uso/desenvolvimento de programas computacionais e discussões iniciais quanto à normatização.**	**Consolidação dos Labs. de Conforto, uso/desenvolvimento de programas computacionais. "Apagões". Lei de Eficiência Energética e normatizações entram em vigor.**

Situação energética/ambiental

Utilização em pouca escala de lenha para fazer fogo para cozimento de alimentos, proteção contra animais, aquecimento e iluminação do ambiente.	*As principais fontes de energia no Brasil Colonial foram a energia hidráulica (por meio do uso da roda d'água), energia eólica, tração animal (principalmente de bois) e humana (escravos). Foram utilizadas, predominantemente, nos engenhos de açúcar do nordeste brasileiro (início séc. XVI até XIX). Nos engenhos também era utilizada lenha para alimentar as fornalhas. A partir do século XVIII, a energia humana, tração animal, hidráulica e da lenha também foram fundamentais para o desenvolvimento da atividade mineradora no interior do país. A mão de obra escrava foi abundantemente explorada em diversas atividades. Os primeiros escravos africanos chegaram ao Brasil em 1538. Por muito tempo, as principais fontes de energia para iluminar foram velas de cera, candeeiros e lamparinas que queimavam diferentes tipos de óleo animal (peixe, baleia e lobo marinho) e vegetal (mamona e coco). As velas de cera eram utilizadas para a iluminação de edificações, residências, comerciais e religiosas. O óleo de baleia era o combustível mais utilizado para iluminar as ruas das cidades, sendo, depois da lenha, da água, da tração animal e da mão de obra escrava, a fonte de energia mais importante do período colonial.*	*Nos engenhos, a utilização de lenha provocava grande desmatamento, sendo substituída pelo bagaço de cana e, posteriormente, pelo uso da máquina a vapor. A eletricidade surgiu, no Brasil, em 1879; no Rio de Janeiro, onde também surgiu a primeira iluminação externa pública, em 1881. Em 1887, entrou em operação o primeiro usina hidrelétrica do país na cidade de Diamantina (MG). Porto Alegre foi a primeira capital do país a possuir iluminação pública elétrica. A primeira linha de bondes elétricos é inaugurada, no Rio de Janeiro, em 1892. A Lei Áurea foi assinada, em 1888, e decreta o fim da escravidão.*	*Em 1903, foi aprovada a primeira lei sobre o uso de energia elétrica no país. Até a primeira década do século XX, foi construído no país um grande número de pequenas usinas elétricas, sendo empregada, predominantemente, na iluminação pública e particular, nos bondes utilizados para o transporte coletivo e para as indústrias.*	*Até 1940 a principal fonte primária de energia era a lenha. Depois da Segunda Guerra Mundial (1939-1945), a industrialização, urbanização e o desenvolvimento dos transportes rodoviários aumentaram o consumo de energia. A eletricidade era usada nas cidades, no setor de serviço e na indústria. O petróleo e o gás eram usados nos transportes e nas indústrias. Aumenta a preocupação com a petróleo nacional e a Petrobras é criada.*	*Em 1960, foi criado o Ministério das Minas e Energia e, em 1962, a Eletrobras, cujo objetivo era a coordenação técnica, administrativa e financeira do setor elétrico. O governo visava centralizar as decisões dos investimentos para o setor.*	*Ganham impulsos os estudos da álcool como combustível e o Proálcool foi criado. Investimento na construção das Usinas Nucleares Angra I, II e III, e a usina Hidrelétrica de Itaipu. Criação do Programa Brasileiro de Etiquetagem para fornecer informações sobre o desempenho dos produtos e do Procel, visando fomentar a eficiência energética.*	*Há poucas novidades no desenvolvimento de projetos arquitetônicos passivos e as discussões centralizam-se na implementação da eficiência energética e do conforto ambiental na arquitetura, que serviriam de suporte para publicação de normas nas próximas décadas. O Proálcool se desenvolveu de forma acelerada até meados da década de 1990 e, em 1992, entra em operação a primeira turbina de energia eólica do Brasil. O consumo de eletricidade cresceu após o Plano Real devido ao aumento do poder aquisitivo dos brasileiros e do consumo de eletrodomésticos.*	*Apagões no Brasil levam ao racionamento de energia e a proibição das lâmpadas incandescente. A descoberta do petróleo no Pré-Sal, em 2007, vende um futuro sem dependência do petróleo externo. País busca ampliar e diversificar o fornecimento de energia mediante a construção de hidrelétricas, parques fotovoltaicos e eólicos. O Brasil é o maior consumidor de energia primária da América Latina e sexto maior do mundo (dados de 2015). As edificações consomem 51,1% da energia gerada no país. Aproximadamente, 82% da energia gerada é renovável (dados de 2016).*

a.C. — d.C.

escala gráfica temporal

LINHA DO TEMPO DA ARQUITETURA PASSIVA NO BRASIL

6.2 CLASSIFICAÇÃO DO NÍVEL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DA ENVOLTÓRIA (RTQ-R) E DIAGNÓSTICO TERMOENERGÉTICO

6.2.1 Atendimento aos pré-requisitos da envoltória

Para a classificação do nível de eficiência energética da envoltória, consoante o estabelecido pelo RTQ-R, verificou-se inicialmente o atendimento aos pré-requisitos específicos da envoltória para as zonas de permanência prolongada das edificações referenciais (Residências ZB1, ZB2 e ZB3).

- *Residência ZB1*

As Tabelas 6-1 e 6-2 referem-se à análise dos pré-requisitos das paredes externas e da cobertura, respectivamente.

Tabela 6-1: Verificação do atendimento aos pré-requisitos nas paredes externas Residência ZB1.

ZT	α (adimensional)			U (W/m²K)			CT (kJ/m²K)		
	Req.	Valor	Atende?	Req.	Valor	Atende?	Req.	Valor	Atende?
ZT1 (Dorm1)	S/E	0,2	Sim	≤ 2,50	1,92	Sim	≥ 130	202	Sim
ZT2 (Dorm2)		0,2	Sim		1,92	Sim		202	Sim
ZT3 (Suíte Casal)		0,2	Sim		1,92	Sim		202	Sim
ZT4 (Estar)		0,2	Sim		1,92	Sim		202	Sim

S/E = sem exigência; α= Absortância solar; U= Transmitância térmica; CT= Capacidade térmica.

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Tabela 6-2: Verificação do atendimento aos pré-requisitos na cobertura Residência ZB1

ZT	α (adimensional)			U (W/m²K)			CT (kJ/m²K)		
	Req.	Valor	Atende?	Req.	Valor	Atende?	Req.	Valor	Atende?
ZT1 (Dorm1)	S/E	0,25	Sim	≤ 2,30	0,83	Sim	S/E	250,5	Sim
ZT2 (Dorm2)		0,25	Sim		0,83	Sim		250,5	Sim
ZT3 (Suíte Casal)		0,25	Sim		0,83	Sim		250,5	Sim
ZT4 (Estar)		0,25	Sim		0,83	Sim		250,5	Sim

S/E = sem exigência; α= Absortância solar; U= transmitância térmica; CT= Capacidade térmica.

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

As Tabelas 6-3 e 6-4 referem-se à verificação quanto ao pré-requisito do RTQ-R de ventilação natural, ao passo que a Tabela 6-5 diz respeito à iluminação natural.

Tabela 6-3: Verificação do atendimento ao pré-requisito de ventilação para Residência ZB1.

Zona térmica	Área de piso (m²)	Janela		% ventilação em relação ao piso	Requisito (%)	Atende?
		Área de Janela (m²)	Área de abertura (m²)			
ZT1 (Dorm1)	11,58	3,36	3,36	29,02	≥ 8	Sim
ZT2 (Dorm2)	11,58	3,36	3,36	29,02		Sim
ZT3 (Suíte Casal)	27,30	4,46	4,46	16,34		Sim
ZT4 (Estar)	85,22	28,14	18,27	21,44		Sim

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Tabela 6-4: Verificação do atendimento ao pré-requisito de ventilação cruzada para Residência ZB1.

Fachada com maior área de abertura (A_1)	Somatório das áreas de aberturas nas demais fachadas (A_2)	Resultado (A_2/A_1)	Requisito	Atende?
	Sem exigência			Sim

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Tabela 6-5: Verificação do atendimento ao pré-requisito de iluminação natural.

Zona térmica	Área de piso (m²)	Área de abertura (m²)	% em relação ao piso	Requisito (%)	Atende?
ZT1 (Dorm1)	11,58	3,36	29,02	≥ 12,5	Sim
ZT2 (Dorm2)	11,58	3,36	29,02		Sim
ZT3 (Suíte Casal)	27,30	4,46	16,34		Sim
ZT4 (Estar)	85,22	28,14	33,02		Sim

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

- Residência ZB2

As Tabelas 6-6 e 6-7 referem-se à análise dos pré-requisitos das paredes externas e da cobertura; as Tabelas 6-8 e 6-9 tratam da verificação quanto ao pré-requisito de ventilação natural e a Tabela 6-10 apresenta os dados relativos à iluminação natural.

Tabela 6-6: Verificação do atendimento aos pré-requisitos nas paredes externas Residência ZB2.

ZT	α (adimensional)			U (W/m²K)			CT (kJ/m²K)		
	Req.	Valor	Atende?	Req.	Valor	Atende?	Req.	Valor	Atende?
ZT1 (Dorm1)		0,2	Sim		**1,27**	Sim		195	Sim
ZT2 (Dorm2)		0,2	Sim		**1,27**	Sim		195	Sim
ZT3 (Dorm3)	S/E	0,2	Sim	≤ 2,50	**1,27**	Sim	≥ 130	195	Sim
ZT4 (Suíte Casal)		0,2	Sim		**1,27**	Sim		195	Sim
ZT5 (Estar)		0,2	Sim		**1,27**	Sim		195	Sim

S/E = sem exigência; α= Absortância solar; U= Transmitância térmica; CT= Capacidade térmica.

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Tabela 6-7: Verificação do atendimento aos pré-requisitos na cobertura Residência ZB2.

ZT	α (adimensional)			U (W/m²K)			CT (kJ/m²K)		
	Req.	Valor	Atende?	Req.	Valor	Atende?	Req.	Valor	Atende?
ZT1 (Dorm1)		0,25	Sim		0,58	Sim		233,82	Sim
ZT2 (Dorm2)		0,25	Sim		0,58	Sim		233,82	Sim
ZT3 (Dorm3)	S/E	0,25	Sim	≤ 2,30	0,58	Sim	S/E	233,82	Sim
ZT4 (Suíte Casal)		0,25	Sim		0,58	Sim		233,82	Sim
ZT5 (Estar)		0,25	Sim		0,58	Sim		233,82	Sim

S/E = sem exigência; α= Absortância solar; U= transmitância térmica; CT= Capacidade térmica.

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Tabela 6-8: Verificação do atendimento ao pré-requisito de ventilação para Residência ZB2.

Zona térmica	Área de piso (m²)	Janela		% ventilação em relação ao piso	Requisito (%)	Atende?
		Área de Janela (m²)	Área de abertura (m²)			
ZT1 (Dorm1)	12,38	2,16	1,08	8,72		Sim
ZT2 (Dorm2)	12,81	2,16	1,08	8,43		Sim
ZT3 (Dorm3)	12,91	2,16	1,08	8,36	≥ 8	Sim
ZT4 (Suíte Casal)	11,04	2,16	1,08	9,47		
ZT5 (Estar)	47,47	19,13	9,57	20,16		Sim

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Tabela 6-9: Verificação do atendimento ao pré-requisito de ventilação cruzada para Residência ZB2.

	Fachada com maior área de abertura (A_1)		Somatório das áreas de aberturas nas demais fachadas (A_2)		Resultado (A_2/A_1)	Requisito	Atende?
	Área de Janela	Área de abertura	Área de janela	Área de abertura			
Fachada	Norte		Sul, leste e oeste		-	-	-
Área (m²)	16,19	8,41	29,98	15,48	1,84	≥ 0,25	Sim

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Tabela 6-10: Verificação do atendimento ao pré-requisito de iluminação natural para Residência ZB2.

Zona térmica	Área de piso (m²)	Área de abertura (m²)	% em relação ao piso	Requisito (%)	Atende?
ZT1 (Dorm1)	12,81	2,16	16,86	≥ 12,5	Sim
ZT2 (Dorm2)	12,38	2,16	17,45		Sim
ZT3 (Suíte Casal)	11,40	2,16	18,95		Sim
ZT4 (Estar)	47,47	19,13	40,30		Sim

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

- Residência ZB3

As Tabelas 6-11 e 6-12 referem-se, respectivamente, à análise dos pré-requisitos das paredes externas e da cobertura da Residência ZB3.

Tabela 6-11: Verificação do atendimento aos pré-requisitos nas paredes externas Residência ZB3.

ZT	α (adimensional)			U (W/m²K)			CT (kJ/m²K)		
	Req.	Valor	Atende?	Req.	Valor	Atende?	Req.	Valor	Atende?
ZT1 (Dorm1)	≤ 0,6 ou > 0,6	0,2	Sim	≤ 3,70 ou ≤ 2,50	1,49	Sim	≥ 130	192,0	Sim
ZT2 (Dorm2)		0,2	Sim		1,49	Sim		192,0	Sim
ZT3 (Suíte Casal)		0,2	Sim		1,49	Sim		192,0	Sim
ZT4 (Estar)		0,2	Sim		1,49	Sim		192,0	Sim

α= Absortância solar; U= Transmitância térmica; CT= Capacidade térmica.

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Tabela 6-12: Verificação do atendimento aos pré-requisitos na cobertura Residência ZB3.

ZT	α (adimensional)			U (W/m²K)			CT (kJ/m²K)		
	Req.	Valor	Atende?	Req.	Valor	Atende?	Req.	Valor	Atende?
ZT1 (Dorm1)	≤ 0,6 ou > 0,6	0,25	Sim	≤ 2,30 ou ≤ 1,50	0,73	Sim	S/E	277,5	Sim
ZT2 (Dorm2)		0,25	Sim		0,73	Sim		277,5	Sim
ZT3 (Suíte Casal)		0,25	Sim		0,73	Sim		277,5	Sim
ZT4 (Estar)		0,25	Sim		0,73	Sim		277,5	Sim

S/E = sem exigência; α= Absortância solar; U= transmitância térmica; CT= Capacidade térmica.

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

As Tabelas 6-13 e 6-14 referem-se à verificação quanto ao pré-requisito de ventilação natural elaborado pelo RTQ-R; a Tabela 6-15 trata da questão da iluminação natural.

Tabela 6-13: Verificação do atendimento ao pré-requisito de ventilação para Residência ZB3.

Zona térmica	Área de piso (m²)	Janela		% ventilação em relação ao piso	Requisito (%)	Atende?
		Área de Janela (m²)	Área de abertura (m²)			
ZT1 (Dorm1)	13,49	5,19	2,60	19,27	≥ 8%	Sim
ZT2 (Dorm2)	12,23	5,19	2,60	21,26		Sim
ZT3 (Suíte Casal)	16,35	4,32	2,16	13,21		Sim
ZT4 (Estar)	65,62	30,75	15,38	23,44		Sim

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Tabela 6-14: Verificação do atendimento ao pré-requisito de ventilação cruzada para Residência ZB3.

	Fachada com maior área de abertura (A_1)		Somatório das áreas de aberturas nas demais fachadas (A_2)		Resultado (A_2/A_1)	Requisito	Atende?
	Área de Janela	Área de abertura	Área de janela	Área de abertura			
Fachada	Leste		Norte, sul e oeste		-	-	-
Área (m²)	17,51	9,9	37,67	24,05	2,42	≥ 0,25	Sim

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Tabela 6-15: Verificação do atendimento ao pré-requisito de iluminação natural para Residência ZB3.

Zona térmica	Área de piso (m²)	Área de abertura (m²)	% em relação ao piso	Requisito (%)	Atende?
ZT1 (Dorm1)	13,49	8,69	64,42	≥ 12,5%	Sim
ZT2 (Dorm2)	12,23	8,69	71,05		Sim
ZT3 (Suíte Casal)	16,35	4,32	26,42		Sim
ZT4 (Estar)	67,63	30,78	45,51		Sim

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Após a verificação dos pré-requisitos específicos da envoltória, foi realizada a classificação de seu nível de eficiência energética e o diagnóstico termoenergético para as Residências ZB1, ZB2 e ZB3, utilizando-se, para tanto, o método de simulação computacional do RTQ-R, descrito no item 4.4.1.

6.2.2 Classificação do nível de eficiência energética da envoltória, pelo método de simulação do RTQ-R.

Conforme descrito na metodologia, item 5.4, na etapa de classificação do nível de eficiência energética da envoltória e no diagnóstico termoenergético, realizou-se a simulação computacional termoenergética para cada edificação referencial do estudo de caso, Residências ZB1, ZB2 e ZB3, mantendo-se todas as características originais, sem alteração de nenhum parâmetro arquitetônico ou construtivo. Para isso, foram utilizadas duas configurações indicadas pelo RTQ-R (INMETRO, 2012b):

a1. Ventilação natural (VN): ventilação natural durante 24 horas do dia em todo o ano (janelas e portas abertas a 20°C).

a2. Ar-condicionado (AC): ar-condicionado das 21 às 8h (acionado quando a temperatura estiver inferior a 22°C ou superior a 24°C) e, das 9 às 20h, ventilação natural (janelas e portas abertas a 20°C).

Para a leitura dos resultados apresentados a seguir, é necessária a verificação da Tabela 5-23, disponível no item 5.4.1.

- *Residência ZB1*

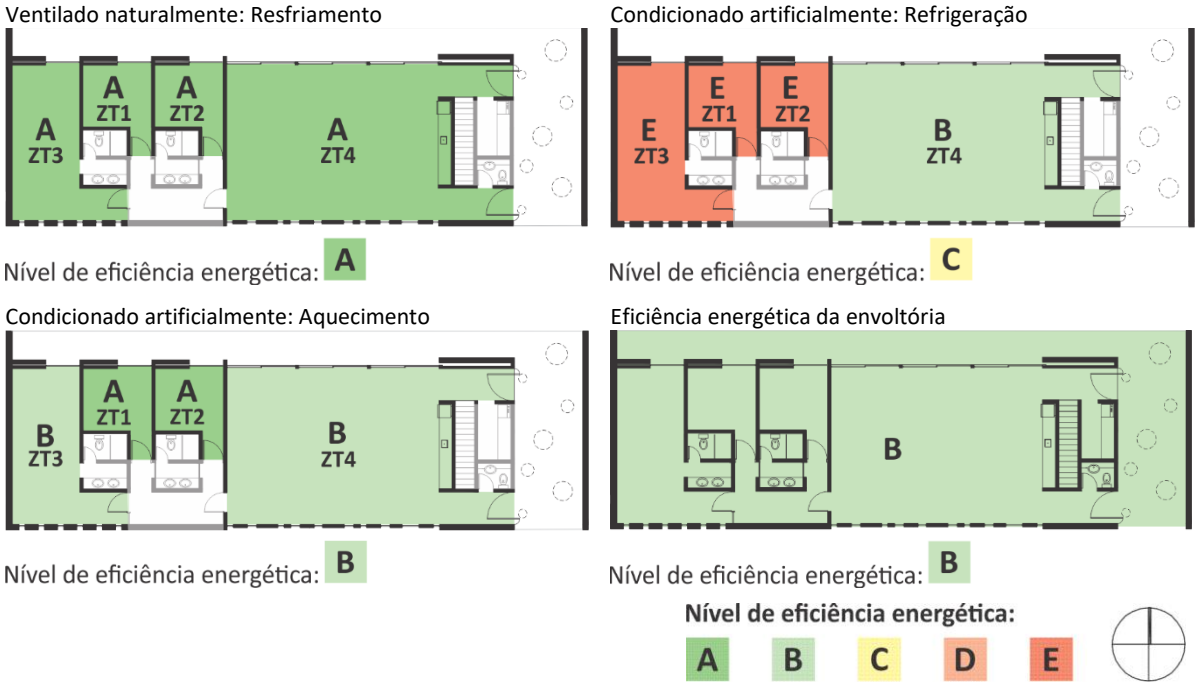
Na Residência ZB1, com a edificação ventilada naturalmente, a envoltória foi classificada como nível A. Os graus-hora de resfriamento foram inferiores a 143 (nível A) para as quatro zonas térmicas, ou seja, a edificação ventilada naturalmente exibe uma somatória baixa de graus com temperaturas superiores aos 26ºC durante o ano.

Quanto ao condicionamento artificial (AC), a envoltória para refrigeração foi classificada como nível C, enquanto que para aquecimento foi identificada como sendo de nível B. O consumo para refrigeração das zonas ZT1 (Dorm1), ZT2 (Dorm2) e ZT3 (Suíte) foi superior a 2,851 kWh/m².a (nível E), ao passo que na ZT4 (Estar) ficou entre 0,713 e 1,426 kWh/m².a (nível B). O consumo para aquecimento das duas zonas térmicas ZT1 (Dorm1) e ZT2 (Dorm2) foi menor do que 16,7 kWh/m².a (nível A) e para a ZT3 (Estar) e a ZT4 (Suíte) fixou-se entre 16,7 e 33,4 kWh/m².a (nível B).

O equivalente numérico da envoltória foi determinado com a Equação 4 (item 5.4.1) e obteve como resultado um valor de 4,22, o que classifica a envoltória como nível B.

A Figura 6-1 apresenta os resultados da classificação do nível de eficiência energética da envoltória da Residência ZB1 e o Apêndice E traz os valores detalhados na Tabela E-1.

Figura 6-1: Classificação do nível de eficiência energética da envoltória da Residência ZB1.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

- Residência ZB2

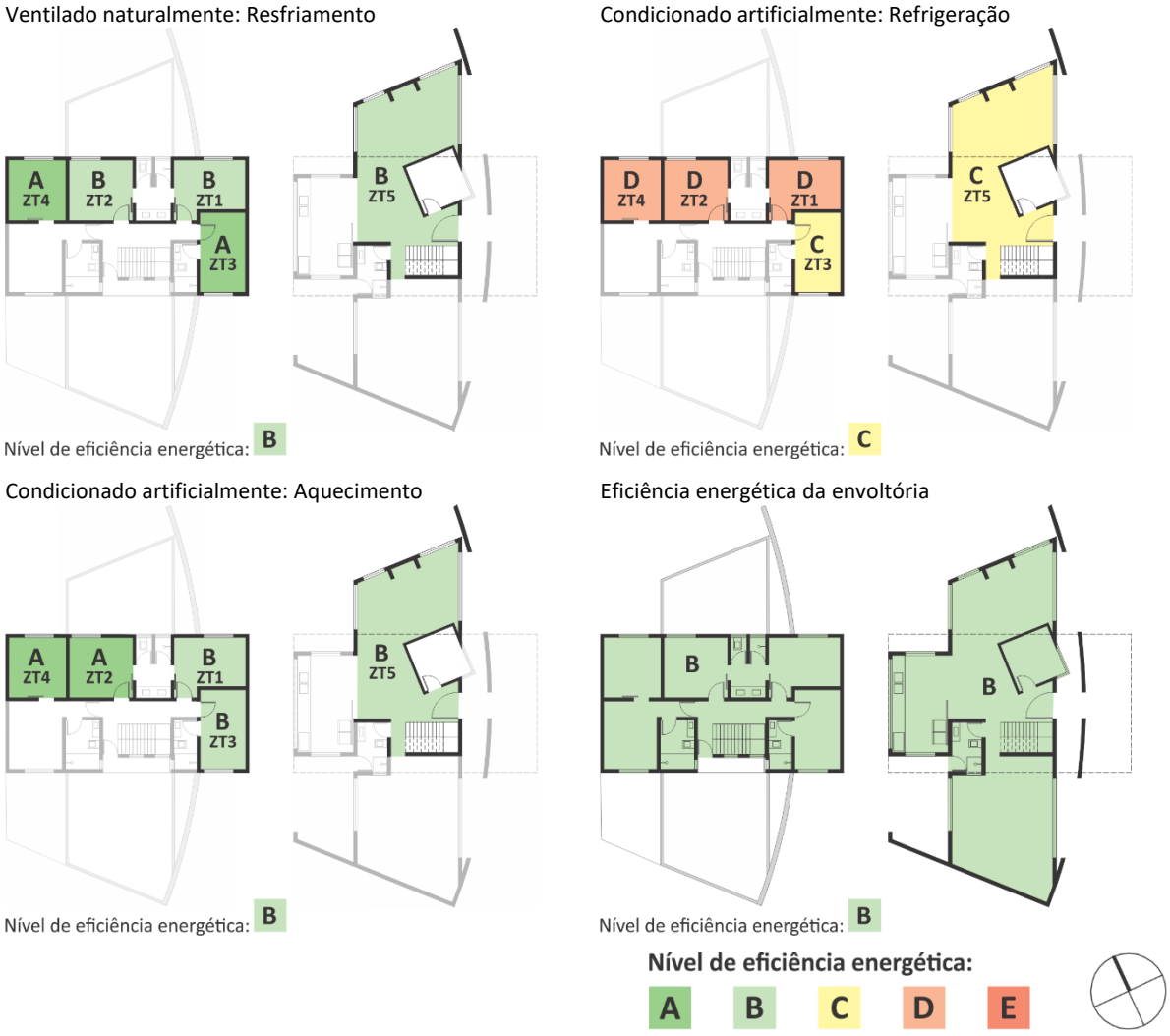
Quando ventilada naturalmente, a envoltória da Residência ZB2 foi classificada como nível B. As ZT1 (Dorm1), ZT2 (Dorm2) e ZT5 (Estar) apresentaram um total de graus-hora de resfriamento anual entre o intervalo de 2310 e 4396, atingindo também o nível B, enquanto as ZT3(Dorm3) e ZT4 (Suíte) apresentaram valores inferiores a 2310, sendo classificadas como nível A.

Quanto ao condicionamento artificial (AC), a classificação da envoltória para refrigeração foi de nível C, e, para aquecimento, nível B. O consumo para aquecimento nas duas zonas térmicas ZT2 (Dorm2) e ZT4 (Suíte Casal) foi menor do que 15,591 kWh/m².a (nível A) e nas zonas ZT1 (Dorm1), ZT3 (Dorm3) e ZT5 (Estar) ficou entre 15,591 e 31,182 kWh/m².a (nível B). O consumo para refrigeração na ZT1 (Dorm1), ZT2 (Dorm2) e ZT4 (Suíte) ficou entre 16,727 e 22,166kWh/m².a (nível D), e na ZT3 (Dorm3) e ZT5 (Estar) manteve-se entre 11,288 e 16,727 kWh/m².a (nível C).

O equivalente numérico da envoltória foi determinado com a Equação 4 (item 5.4.1), obtendo como resultado o valor de 4,23, que classifica a envoltória no nível B.

A Figura 6-2 apresenta os resultados da classificação do nível de eficiência energética da envoltória da Residência ZB2 e o Apêndice E apresenta na Tabela E-2 os valores detalhados.

Figura 6-2: Classificação do nível de eficiência energética da envoltória da Residência ZB2.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

- Residência ZB3

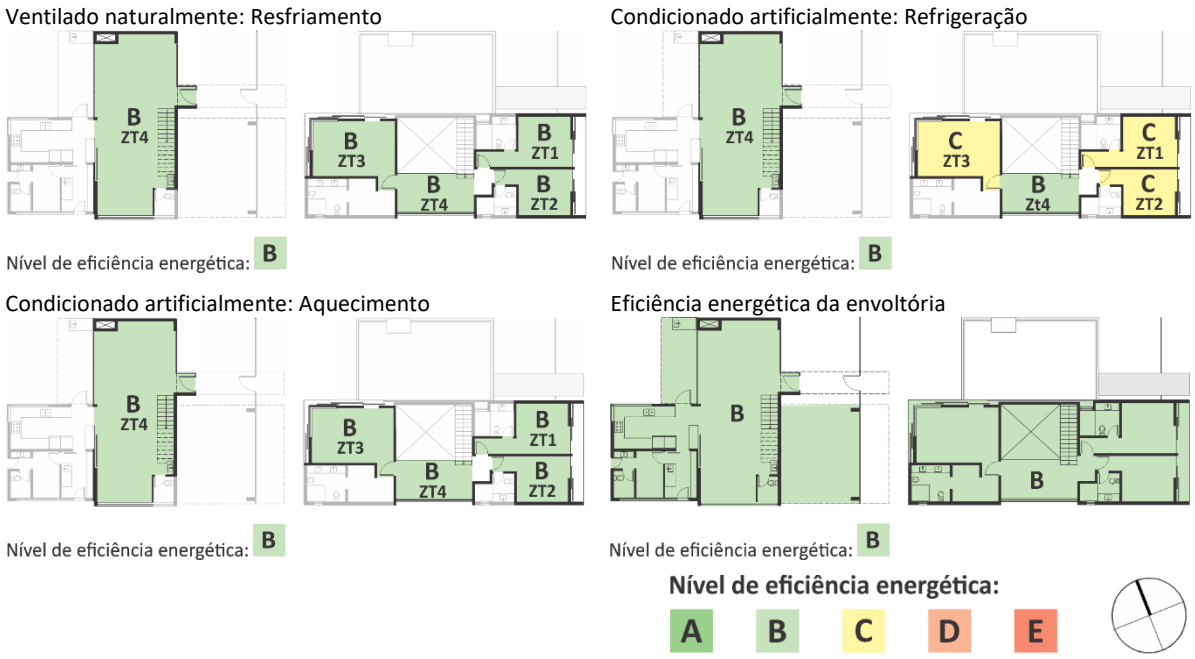
Todas as zonas térmicas da Residência ZB3 estiveram entre 822 e 1643 graus-hora anuais, atingindo assim a classificação B do nível de eficiência energética da envoltória relativo à ventilação natural.

A classificação da envoltória quanto ao condicionamento artificial (AC) foi B para refrigeração e aquecimento. O consumo para refrigeração para as ZT1 (Dorm1), ZT2 (Dorm2) e ZT3 (Dorm3) ficou entre 12,284 e 17,677 kWh/m².a, obtendo o nível C, sendo que para a ZT4 (Estar) os valores ficaram entre 6,89 e 12,284 kWh/m².a, obtendo, assim, o nível B. O consumo para aquecimento de todas as zonas térmicas ficou entre 6,429 e 12,858 kWh/m².a, recebendo a classificação B.

O equivalente numérico da envoltória foi determinado com a Equação 4 (item 5.4.1), e obteve o resultado de 4,00 que classifica a envoltória como nível B.

A Figura 6-3 apresenta os resultados da classificação do nível de eficiência energética da envoltória da Residência ZB3; e o Apêndice E apresenta na Tabela E-3 os valores detalhados.

Figura 6-3: Classificação do nível de eficiência energética da envoltória da Residência ZB3.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Embora todas as edificações referenciais tenham obtido nível B na classificação energética geral da envoltória, o condicionamento artificial (AC) por refrigeração das Residências ZB1 e ZB2 levou essas edificações a serem caracterizadas pelo nível C. Isso ocorre devido à exigência do RTQ-R de um consumo muito menor para refrigeração do que para o aquecimento nessas duas Zonas Bioclimáticas, conforme pode ser verificado na Tabela 5-23, do item 5.4.1. Enquanto que para obter nível A na ZB1 é preciso ter um consumo para aquecimento abaixo de 16,7 (kWh/m².a), para a refrigeração é necessário atingir um valor próximo a 0,713 kWh/m².a. O mesmo ocorre na ZB2, pois, nesse caso, enquanto que para obter o nível A para a refrigeração deve-se ter um consumo inferior a 5,849 kWh/m².a, para o aquecimento é necessário utilizar menos do que 15,591 kWh/m².a. Na ZB3, os valores para atingir nível A para aquecimento e refrigeração são mais próximos.

6.2.3 Diagnóstico termoenergético das edificações referenciais

De um modo análogo ao que foi descrito no item 6.2.2, o diagnóstico termoenergético também foi realizado por meio de simulação computacional, investigando as Residências Referenciais ZB1, ZB2 e ZB3 ventiladas naturalmente (VN) e condicionadas artificialmente (AC). Em um processo de ventilação natural, as janelas e portas são abertas durante todos os dias do ano, quando a temperatura interna

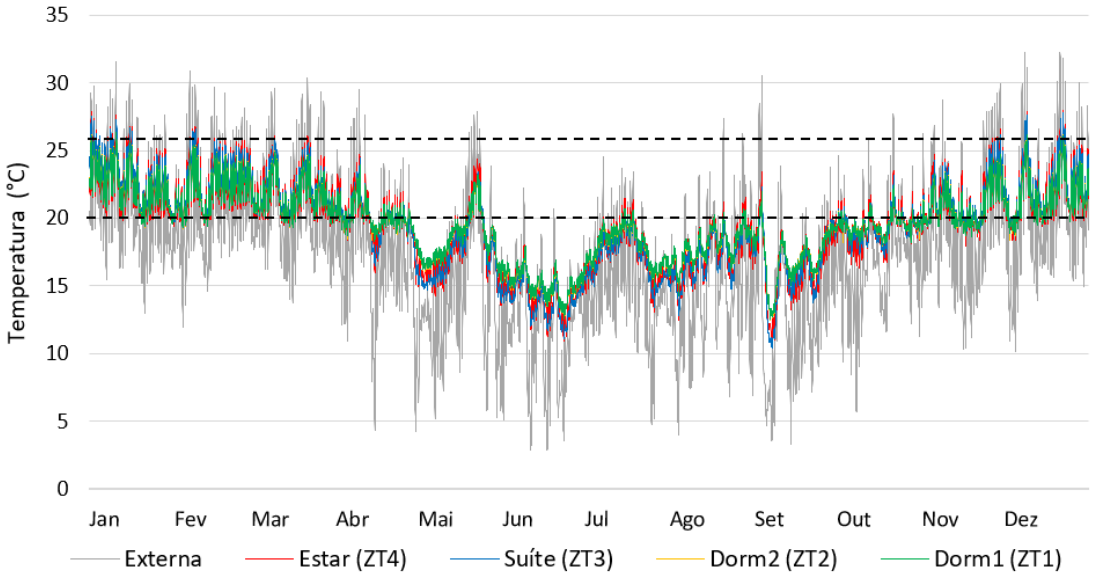
atingir 20°C. Em um processo de condicionamento artificial, o ar-condicionado é acionado das 21 às 8h, quando a temperatura interna for inferior a 22°C ou superior a 24°C.

- Residência ZB1

- Análise da edificação com ventilação natural (VN)

O gráfico da Figura 6-4 ilustra a temperatura externa de Bento Gonçalves em comparação com os dados da simulação computacional relativos à temperatura interna dos ambientes de permanência prolongada: Estar (ZT4), Suíte (ZT3), Dorm2 (ZT2) e Dorm1 (ZT1). No gráfico, destaca-se a área correspondente a uma variação entre 20 e 26°C, temperatura de conforto indicada pelo conceito *Passive House* para climas quentes (PASSIVE-ON, 2007).

Figura 6-4: Gráfico das temperaturas da Residência Referencial ZB1 ventilada naturalmente (VN).

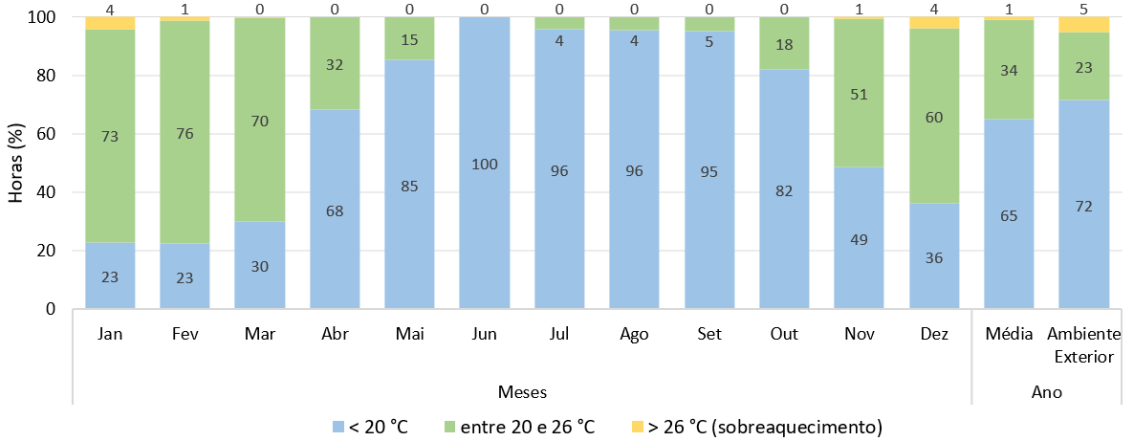


Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A residência Referencial ZB1, ventilada naturalmente, apresentou menor amplitude térmica no interior em comparação ao exterior, isso para todos os ambientes de permanência prolongada. Notou-se que todos os meses do ano apresentam, em algum momento, a temperatura interna de todos ambientes fora da faixa de conforto, porém, entre abril e outubro essa diferença é mais acentuada, apresentando valores inferiores a 20°C. Entre novembro e fevereiro, todos ambientes analisados apresentam valores de temperatura superiores a 26°C. Dentre os ambientes analisados, a ZT1 (Dorm1) e a ZT2 (Dorm2) mantiveram-se mais próximas da temperatura de conforto e, em contrapartida, a ZT3 (Suíte Casal) e a ZT4 (Estar) foram detectadas como os ambientes que passam por períodos maiores do ano fora da faixa de conforto, tanto no verão quanto no inverno; tal fato se justifica principalmente pela maior área de superfície externa desses espaços (ZT3 e ZT4).

O gráfico da Figura 6-5 apresenta a média percentual mensal e anual de temperaturas internas e externas menores do que 26°C (desconforto por frio), entre 20 e 26°C (conforto) e maiores do que 26°C (sobreaquecimento[1]) da Residência ZB1 ventilada naturalmente.

Figura 6-5: Percentual de horas em conforto e desconforto da Residência Referencial ZB1 ventilada naturalmente (VN).



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Com o gráfico da Figura 6-5, é possível verificar que em todos meses do ano o desconforto por frio no interior da edificação é elevado, se acentuando entre os meses de junho e setembro. No mês de junho, todas as horas apresentam temperaturas inferiores a 20°C nos ambientes internos. O sobreaquecimento é presente entre novembro e fevereiro, com valores de referência em torno dos 5%. O percentual de horas em desconforto por temperaturas inferiores a 20°C é, em média, de 65% do tempo total no interior da edificação.

A Tabela 6-16 apresenta de forma resumida a média percentual anual das temperaturas internas e externas menores do que 26°C, entre 20 e 26°C e maiores do que 26°C.

Tabela 6-16: Média percentual anual de horas em conforto e desconforto na Residência Referencial ZB1 ventilada naturalmente.

Temperatura	Ambiente Exterior (%)	Interior (%)
< 20 °C	71,70	65,21
entre 20 e 26 °C	23,20	33,96
> 26 °C (sobreaquecimento)	5,10	0,82

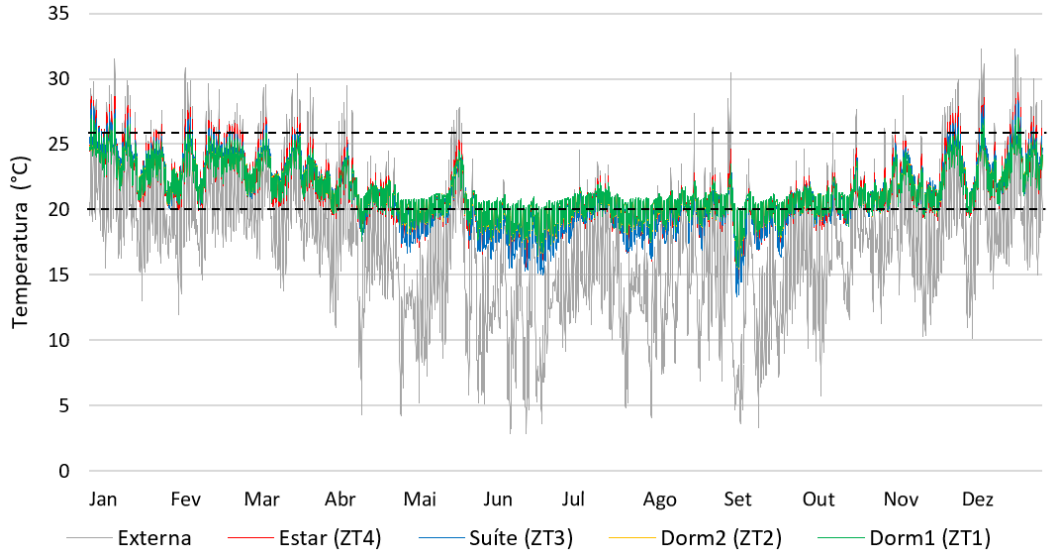
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

[1] Percentual de horas do ano que ultrapassam os 26ºC.

- Análise da edificação condicionada artificialmente (AC)

O gráfico referente à Tabela 6-6 ilustra a temperatura externa de Bento Gonçalves em comparação com os dados da simulação computacional relativos à temperatura interna dos ambientes de permanência prolongada condicionados artificialmente (AC).

Figura 6-6: Gráfico das temperaturas da Residência Referencial ZB1 com condicionamento artificial (AC).



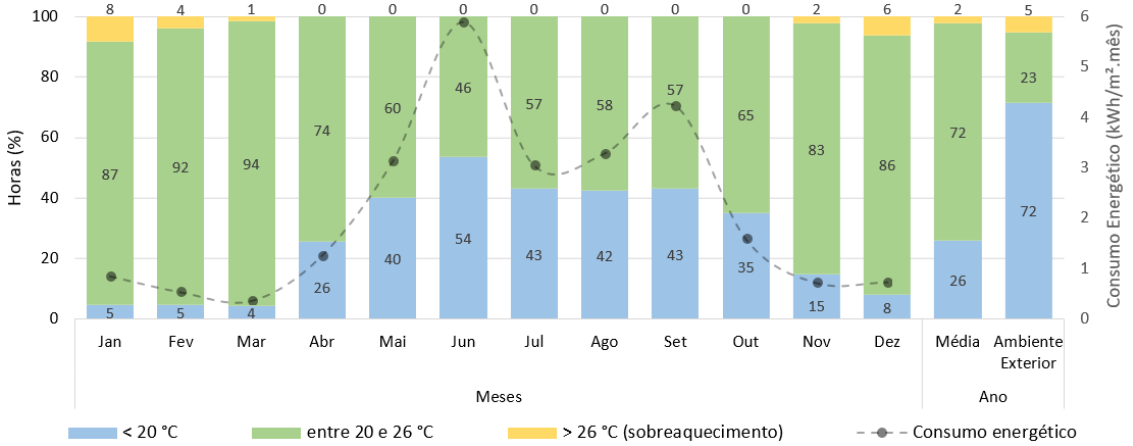
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Analisando as simulações com uso de ar-condicionado (AC), a amplitude térmica no interior se manteve menor do que com o uso de ventilação natural em todos os ambientes de permanência prolongada. Novamente, nota-se que todos os meses do ano apresentam temperatura interna de todos os ambientes investigados fora da faixa de conforto, contudo, essa diferença é mais acentuada entre os meses de abril e outubro, quando há grandes intervalos de tempo com temperaturas inferiores a 20°C. Entre novembro e fevereiro, é possível verificar principalmente temperaturas superiores a 26°C. Assim como na simulação com ventilação natural, a ZT1 (Dorm1) e a ZT2 (Dorm2) mantiveram um intervalo maior dentro da temperatura adequada e a ZT3 (Suíte) e a ZT4 (Estar) configuraram-se como os ambientes de maior período fora da faixa de conforto.

O gráfico da Figura 6-7, apresenta a média percentual mensal e anual das temperaturas internas e externas menores do que 26°C, entre 20 e 26°C e maiores do que 26 °C, referentes à Residência ZB1, além de indicar o consumo energético para o condicionamento térmico artificial (AC). Com o condicionamento artificial, o percentual anual de horas com temperaturas dentro da zona de conforto aumenta em todos os ambientes, tendo maior expressão entre junho e setembro. Entre esses meses, o desconforto por frio, taxado entre 95 e 100% com a ventilação natural, passa para valores entre 42 e 54% com a edificação condicionada artificialmente. O consumo energético total para o

condicionamento térmico acaba, assim, sendo maior nos meses frios, apresentando o valor mais elevado, superior a 6 kWh/m².mês, em junho.

Figura 6-7: Percentual de horas em conforto e desconforto da Residência Referencial ZB1 e o consumo energético (AC).



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A Tabela 6-17 apresenta de forma resumida a média percentual anual das temperaturas internas e externas menores do que 26°C, entre 20 e 26°C e maiores do que 26 °C, comparando os dados descritos anteriormente fornecidos pela Residência Referencial ZB1 ventilada naturalmente (VN) e condicionada artificialmente (AC). Nesse quadro, observa-se que o percentual de horas anuais com temperaturas dentro do intervalo de conforto aumentou de 33,96 para 71,59% com a edificação condicionada artificialmente; porém, o sobreaquecimento também teve um aumento com o condicionamento artificial, haja vista que passou de 0,82 para 1,78%.

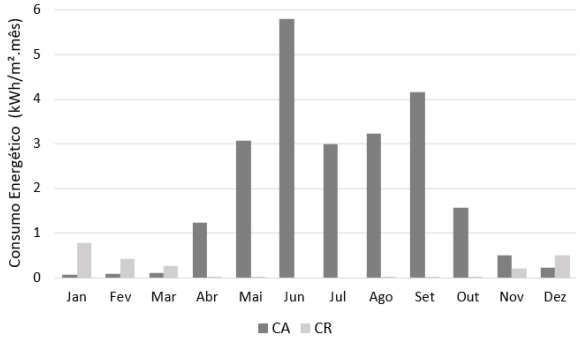
Tabela 6-17: Média percentual anual de horas em conforto e desconforto na Residência ZB1 ventilada naturalmente e condicionada artificialmente.

Temperatura	**Ambiente Exterior (%)**	**Interior**	
		Ventilada naturalmente (VN) (%)	**Condicionada Artificialmente (AC) (%)**
< 20 °C	71,70	65,21	26,63
entre 20 e 26 °C	23,20	33,96	71,59
> 26 °C (sobreaquecimento)	5,10	0,82	1,78

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Os gráficos da Figura 6-8 apresentam o consumo energético mensal (AC) por metro quadrado de refrigeração (CR) e de aquecimento (CA) nos ambientes de permanência prolongada. Conforme é possível verificar, de forma geral o maior consumo energético para aquecimento é nos períodos frios e o maior consumo de energia para refrigeração é nos períodos quentes.

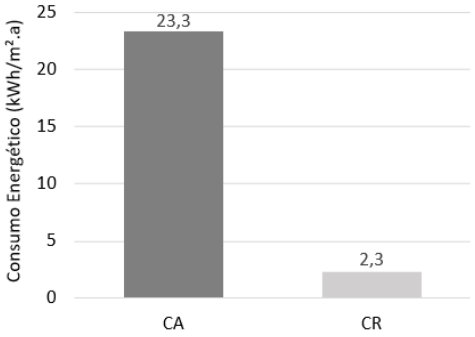
Figura 6-8: Consumo energético mensal (AC) de refrigeração (CR) e aquecimento (CA) na Residência Referencial ZB1.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

O gráfico da Figura 6-9 apresenta o consumo energético (AC) anual por metro quadrado de refrigeração (CR) e de aquecimento (CA) nos ambientes de permanência prolongada. Conforme constatado, o consumo anual para aquecimento (23,3 kWh/m².a) é muito superior ao consumo de refrigeração (2,3kWh/m².a).

Figura 6-9: Consumo energético anual (AC) para aquecimento e refrigeração na Residência Referencial ZB1.



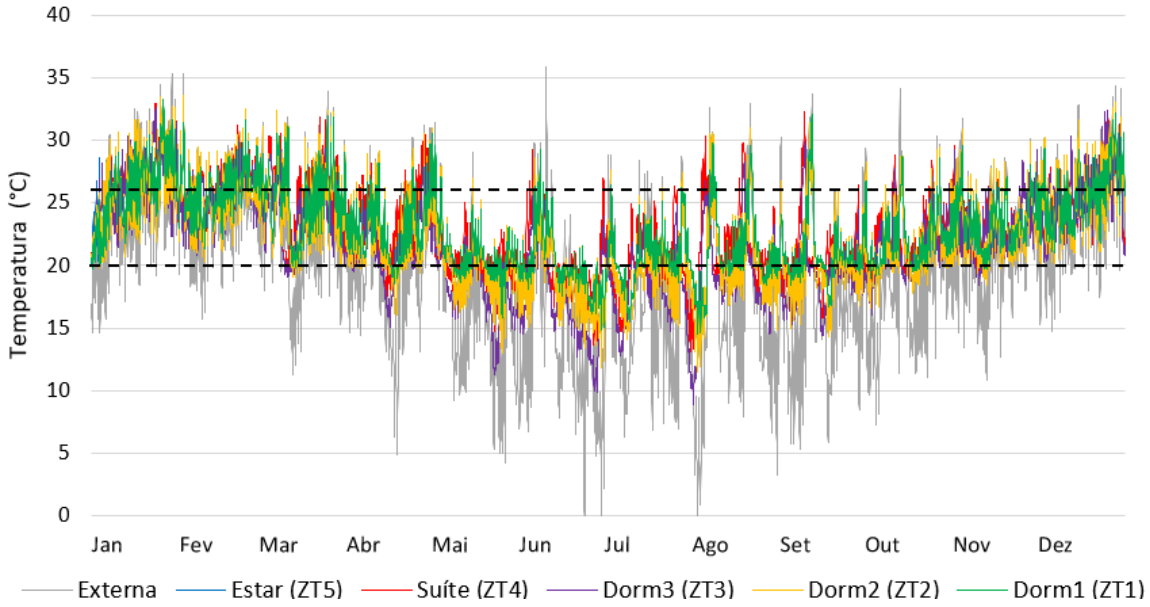
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

- Residência ZB2

- Análise da edificação com ventilação natural (VN)

O gráfico da Figura 6-10 representa a temperatura externa de Santa Maria e as temperaturas internas dos ambientes de permanência prolongada ventilados naturalmente, sendo eles: Estar (ZT5), Suíte (ZT4), Dorm3 (ZT3), Dorm2 (ZT2) e Dorm1 (ZT1).

Figura 6-10: Gráfico das temperaturas da residência ZB2 ventilada naturalmente (VN).

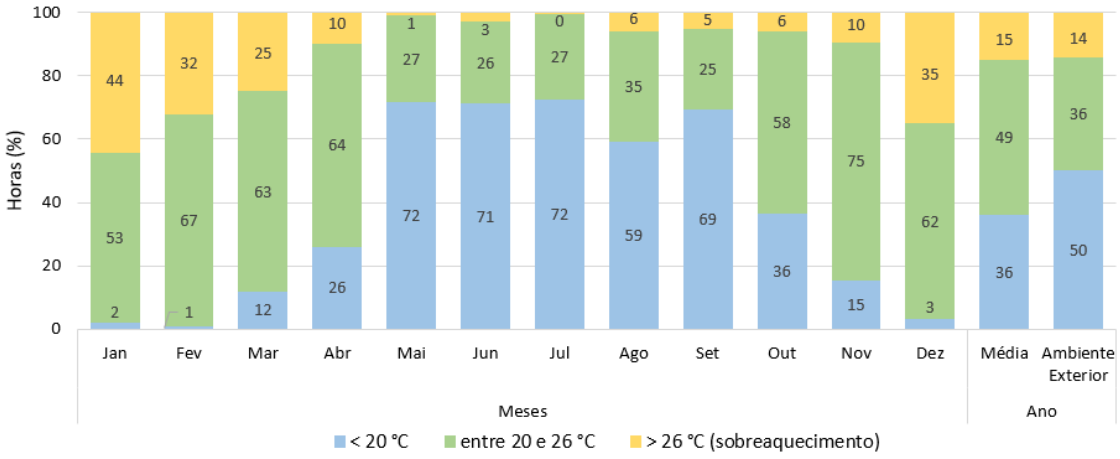


Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A residência Referencial ZB2 apresentou menor amplitude térmica no interior comparativamente ao exterior em todos os ambientes de permanência prolongada. Novamente, constatou-se que cada mês do ano apresentou, em algum momento, a temperatura interna dos ambientes fora da faixa de conforto, sendo que entre abril e outubro são mais presentes valores inferiores a 20°C e, entre outubro e abril, são mais frequentes temperaturas superiores a 26°C.

O gráfico da Figura 6-11, indica a média percentual mensal e anual das temperaturas internas e externas dos valores de referência já mencionados (< 26°C, entre 20 e 26°C e > 26°C), relativos à Residência Referencial ZB2, ventilada naturalmente. Em todos os meses do ano, o desconforto é superior a 25% das horas, sendo que entre abril e novembro predomina o desconforto por frio e de dezembro a março o desconforto por calor. Em média, o desconforto por frio prevalece, representando 37% das horas do ano, enquanto que o desconforto por calor, i.e., o sobreaquecimento, equivale a aproximadamente 15% das horas do ano.

Figura 6-11: Percentual de horas em conforto e desconforto da Residência ZB2 ventilada naturalmente (VN).



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A Tabela 6-18 de forma resumida, a média percentual anual das temperaturas internas e externas menores do que 26°C, entre 20 e 26°C e maiores do que 26°C.

Tabela 6-18: Média percentual anual de horas em conforto e desconforto na Residência ZB2 ventilada naturalmente (VN).

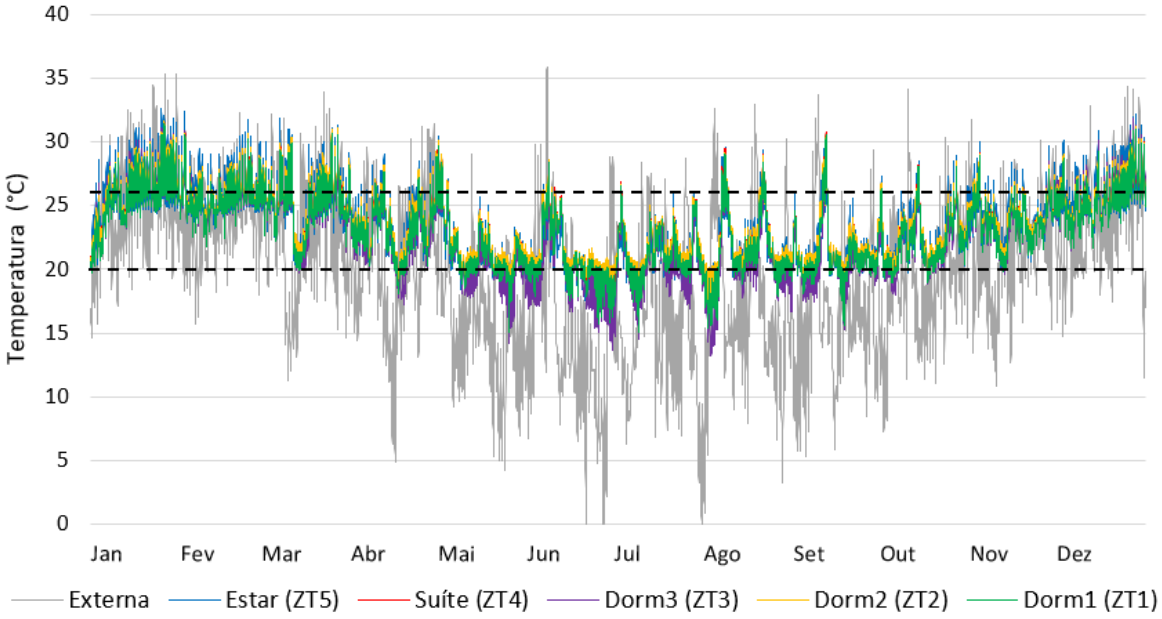
Temperatura	Ambiente Exterior (%)	Interior (%)
< 20 °C	50,0	36,59
entre 20 e 26 °C	35,6	48,61
> 26 °C (sobreaquecimento)	14,3	14,80

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

- Análise da edificação condicionada artificialmente (AC)

O gráfico da Tabela 6-12 ilustra a temperatura externa de Santa Maria e a temperatura interna dos ambientes de permanência prolongada condicionados artificialmente (AC) da Residência Referencial ZB2.

Figura 6-12: Gráfico das temperaturas da Residência Referencial ZB2 com condicionamento artificial (AC).

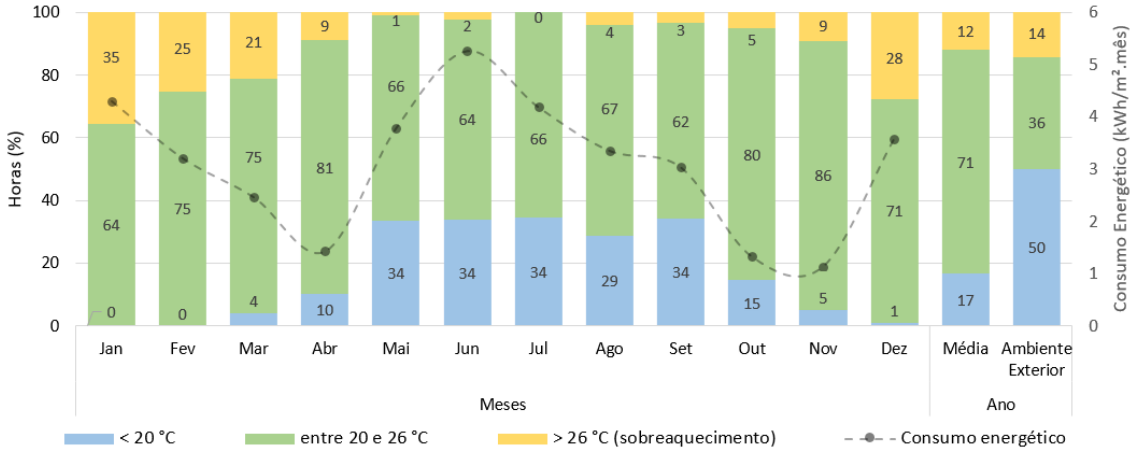


Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Note-se que a amplitude térmica no interior da edificação se manteve menor do que com a edificação ventilada naturalmente em todos ambientes de permanência prolongada. Há registro de temperatura interna dos ambientes analisados fora da faixa de conforto em todos os meses do ano, sendo o desconforto por frio registrado entre maio e outubro e entre outubro e maio o desconforto por calor.

O gráfico da Figura 6-13, em comparação com o gráfico da Figura 6-11, demonstra que o percentual de horas com temperaturas dentro da zona de conforto aumenta em todo o ano com o condicionamento artificial (AC), tendo mais expressão nos meses entre maio e setembro, quando os valores passam de 25 a 35% de horas em conforto para 62 a 67%. O consumo energético para condicionamento térmico acaba sendo maior nos meses frios, e o valor mais elevado é registrado em junho, estimado em aproximadamente 5,5 kWh/m².mês.

Figura 6-13: Percentual de horas em conforto e desconforto da Residência Referencial ZB2 e o consumo energético (AC).



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A Tabela 6-19 retrata de forma resumida a média percentual anual das temperaturas internas e externas da Residência Referencial ZB2 ventilada naturalmente (VN) e condicionada artificialmente (AC). É importante destacar que o percentual de horas com temperaturas dentro do intervalo de conforto aumentou de 48,61% para 71,40% com a edificação condicionada artificialmente. O desconforto por frio diminuiu de 36,59% para 16,68% e o sobreaquecimento de 14,80% para 11,92%.

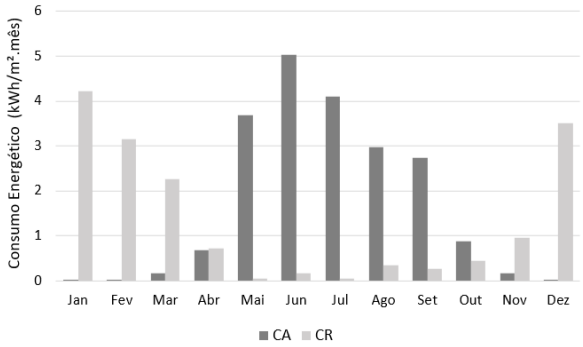
Tabela 6-19: Média percentual anual de horas em conforto e desconforto na Residência Referencial ZB2 ventilada naturalmente (VN) e condicionada artificialmente (AC).

Temperatura	Ambiente Exterior (%)	Interior	
		Ventilada naturalmente (VN) (%)	Condicionada Artificialmente (AC) (%)
< 20 °C	50,0	36,59	16,68
entre 20 e 26 °C	35,6	48,61	71,40
> 26 °C (sobreaquecimento)	14,3	14,80	11,92

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

O consumo energético mensal (AC) por metro quadrado de refrigeração (CR) e de aquecimento (CA) nos ambientes de permanência prolongada é apresentado no gráfico Figura 6-14. Entre maio e outubro, o maior gasto energético com condicionamento térmico deve-se ao aquecimento, e, entre novembro e abril, gasta-se mais com refrigeração.

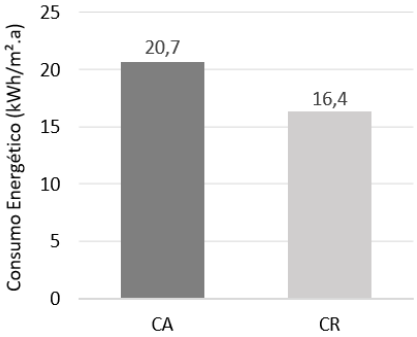
Figura 6-14: Consumo energético mensal (AC) de refrigeração (CR) e aquecimento (CA) na Residência ZB2.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

O gráfico da Figura 6-15 apresenta especificamente o consumo energético (AC) anual por metro quadrado de refrigeração (CR) e de aquecimento (CA) nos ambientes de permanência prolongada. O consumo anual para aquecimento (20,7 kWh/m².a) é superior ao consumo de refrigeração (16,4kWh/m².a).

Figura 6-15: Consumo energético (AC) anual para aquecimento e refrigeração na Residência ZB2.



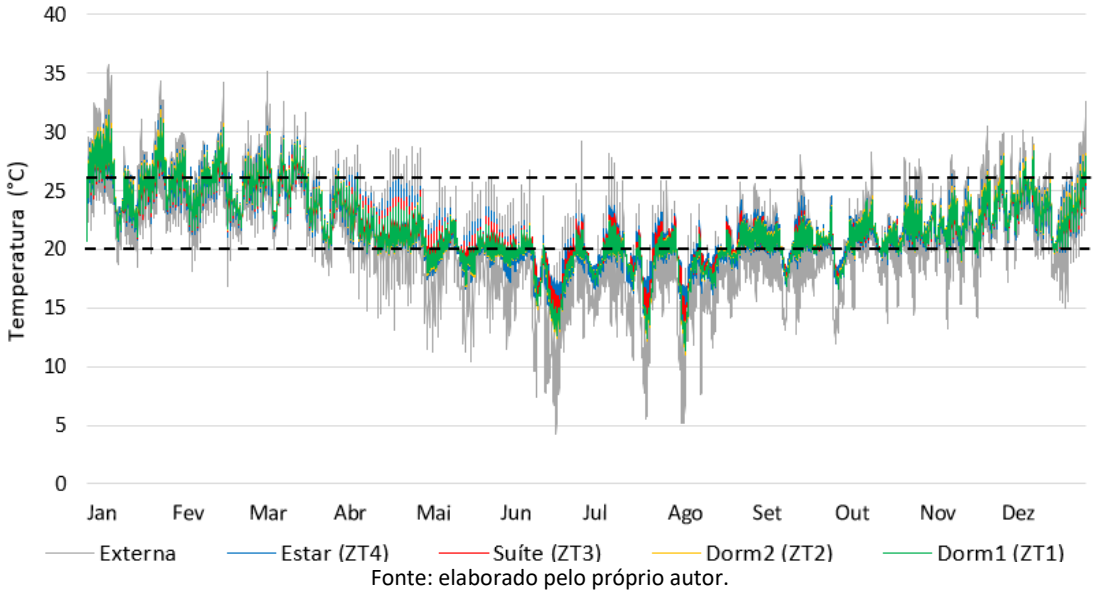
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

- Residência ZB3

- Análise da edificação com ventilação natural

As temperaturas internas dos ambientes de permanência prolongada da Residência ZB3 e as temperaturas externas são apresentadas no gráfico da Figura 6-16.

Figura 6-16: Gráfico das temperaturas da Residência Referencial ZB3 ventilada naturalmente (VN).

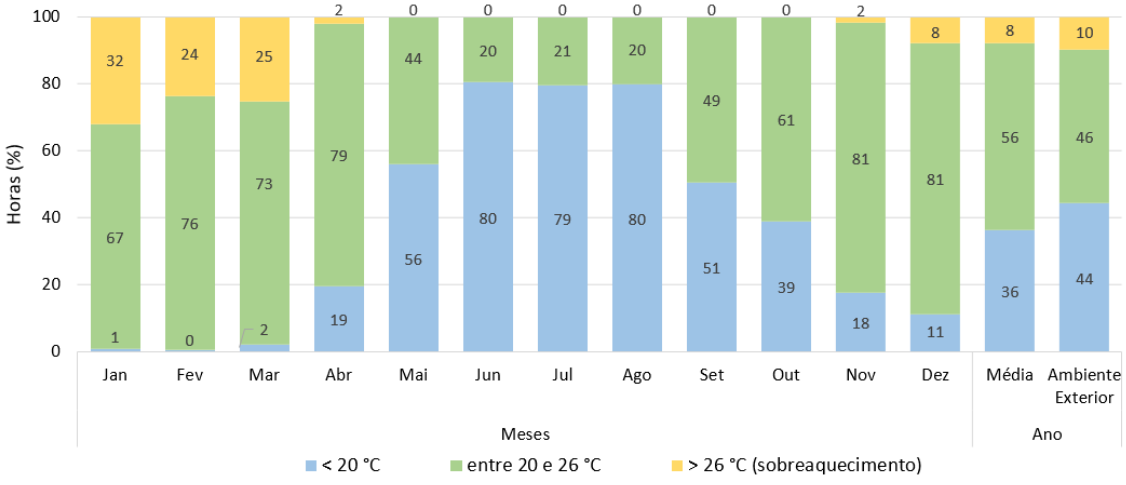


Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A amplitude térmica dos ambientes de permanência prolongada, com a edificação ventilada naturalmente, é menor do que a amplitude térmica externa. Em todos os meses do ano, foram registradas temperaturas internas (em todos os ambientes) distantes da faixa de conforto.

A média percentual mensal e anual das temperaturas internas e externas em conforto e desconforto da Residência Referencial ZB3 ventilada naturalmente (VN) é apresentada no gráfico da Figura 6-17. Entre abril e dezembro, predomina o desconforto por frio, alcançando percentuais de 79 e 80% nos meses de junho a agosto, e entre janeiro e março nota-se que há mais desconforto por sobreaquecimento. Em média, predomina o desconforto por frio, representando 36% das horas do ano, enquanto o desconforto por calor, o sobreaquecimento, representa apenas 8% das horas do ano.

Figura 6-17: Percentual de horas em conforto e desconforto da Residência ZB3 ventilada naturalmente (VN).



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A Tabela 6-20 ilustra resumidamente a média percentual anual das temperaturas internas e externas menores do que 26°C, entre 20 e 26°C e, por fim, maiores do que 26°C.

Tabela 6-20: Média percentual anual de horas em conforto e desconforto na Residência ZB3 ventilada naturalmente (VN).

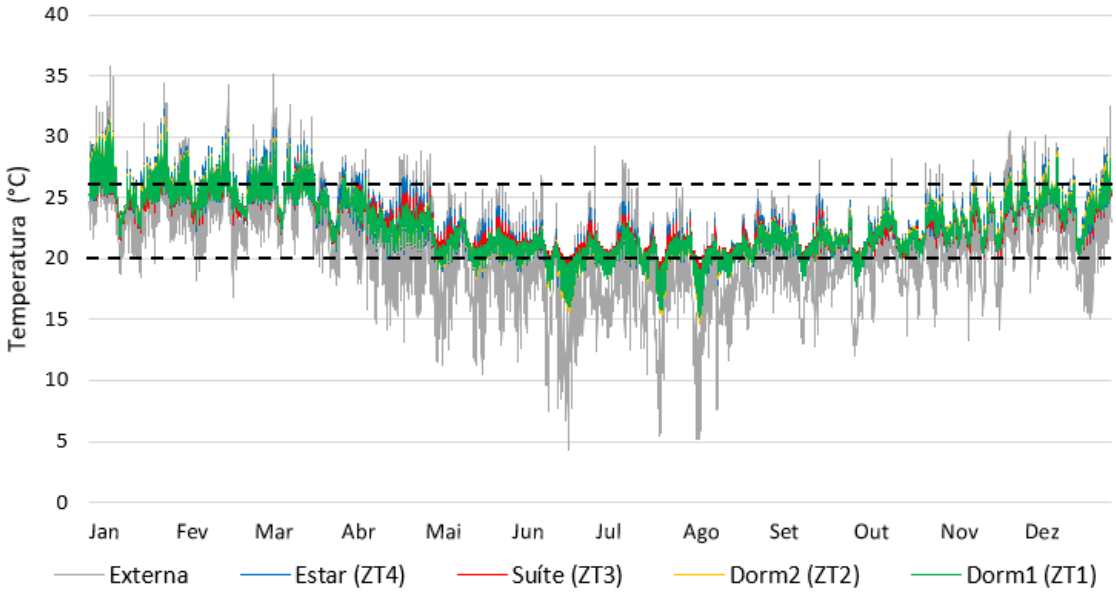
Temperatura	Ambiente Exterior (%)	Interior (%)
< 20 °C	44,26	36,37
entre 20 e 26 °C	45,91	55,98
> 26 °C (sobreaquecimento)	9,83	7,65

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

- Análise da edificação condicionada artificialmente (AC)

O gráfico da Figura 6-18 representa a temperatura externa da cidade de Santa Maria e a temperatura interna dos ambientes de permanência prolongada condicionados artificialmente (AC).

Figura 6-18: Gráfico das temperaturas da Residência Referencial ZB3 com condicionamento artificial (AC).



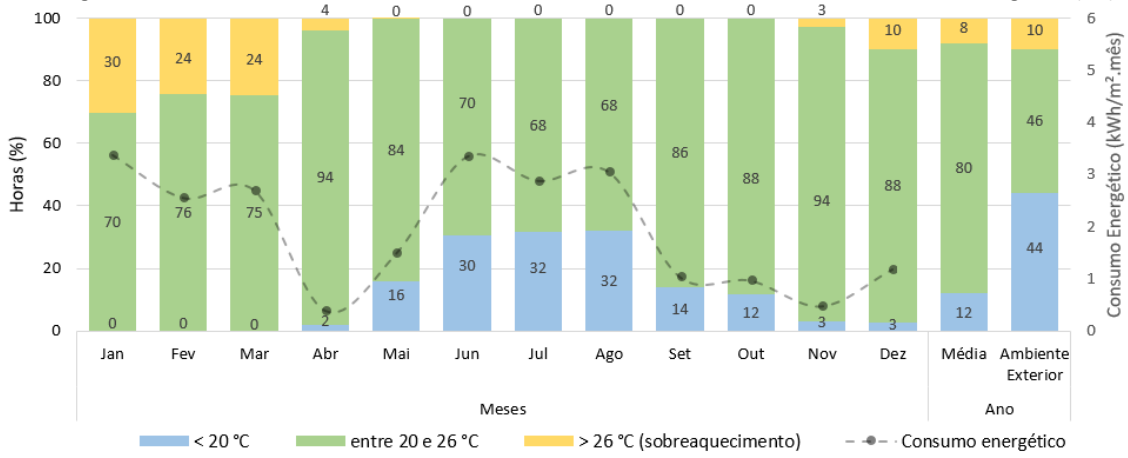
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A amplitude térmica no interior de todos ambientes de permanência prolongada da edificação foi menor com a edificação condicionada artificialmente (AC) do que com ventilação natural (VN). Notadamente, em todos os meses do ano registram-se temperaturas internas fora da faixa de conforto, para todos os ambientes, sendo que entre junho e agosto é mais perceptível o desconforto por frio e entre dezembro e março o sobreaquecimento.

O gráfico da Figura 6-19 apresenta a média percentual mensal e anual das temperaturas internas e externas menores do que 26°C, entre 20 e 26°C e maiores do que 26°C, além de demonstrar o consumo energético para o condicionamento térmico (AC) artificial da Residência Referencial ZB3. O percentual

de horas referente a temperaturas dentro da zona de conforto aumenta em todo o ano com o condicionamento artificial, com elevação mais significativa nos meses entre maio e setembro, que passam a exibir um conforto térmico em torno dos 84 a 86%, em oposição aos 20 e 40% registrados anteriormente. O maior consumo energético para condicionamento térmico é nos meses de janeiro e junho, com consumo aproximadamente 3,3 kWh/m².mês.

Figura 6-19: Percentual de horas em conforto e desconforto da Residência ZB3 e o consumo energético (AC).



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A Tabela 6-21 apresenta de forma sintética a média percentual anual das menores temperaturas internas e externas em conforto e desconforto encontradas para a Residência Referencial ZB3 em duas situações: ventilada naturalmente (VN) e condicionada artificialmente (AC). O percentual de horas com temperaturas dentro do intervalo de conforto aumentou de 55,98% para 80,13% com a edificação condicionada artificialmente, ao passo que o desconforto por frio diminuiu de 36,37% para 11,97%, note-se, porém, que o sobreaquecimento aumentou em 0,25%.

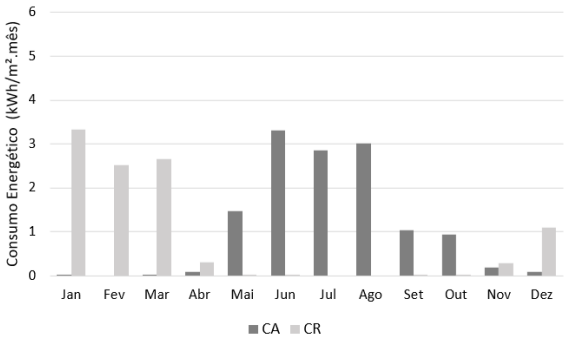
Tabela 6-21: Média percentual anual de horas em conforto e desconforto na Residência ZB3 ventilada naturalmente (VN) e condicionada artificialmente (AC).

Temperatura	Exterior (%)	Interior	
		Ventilada naturalmente (VN) (%)	Condicionada Artificialmente (AC) (%)
< 20 °C	44,26	36,37	11,97
entre 20 e 26 °C	45,91	55,98	80,13
> 26 °C (sobreaquecimento)	9,83	7,65	7,90

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

O consumo energético (AC) mensal por metro quadrado de refrigeração (CR) e de aquecimento (CA) nos ambientes de permanência prolongada é apresentado no gráfico da Figura 6-20, sendo o consumo energético com aquecimento mais significativo entre os meses de maio e outubro, e o consumo de refrigeração mais expressivo entre dezembro e março.

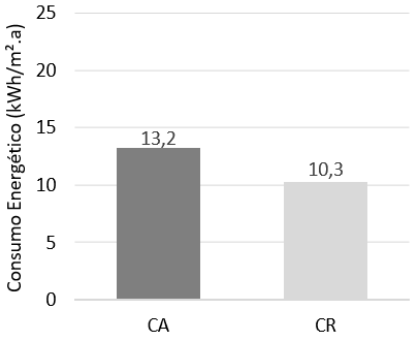
Figura 6-20: Consumo energético (AC) mensal de refrigeração (CR) e aquecimento (CA) na Residência ZB3.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

O total do consumo energético (AC) anual por metro quadrado de refrigeração (CR) e de aquecimento (CA) nos ambientes de permanência prolongada, por sua vez, é apresentado no gráfico da Figura 6-21. Conforme constatado, o consumo anual para aquecimento (13,2 kWh/m².a) é superior ao consumo de refrigeração (10,3 kWh/m².a).

Figura 6-21: Consumo energético (AC) anual para aquecimento e refrigeração na Residência ZB3.



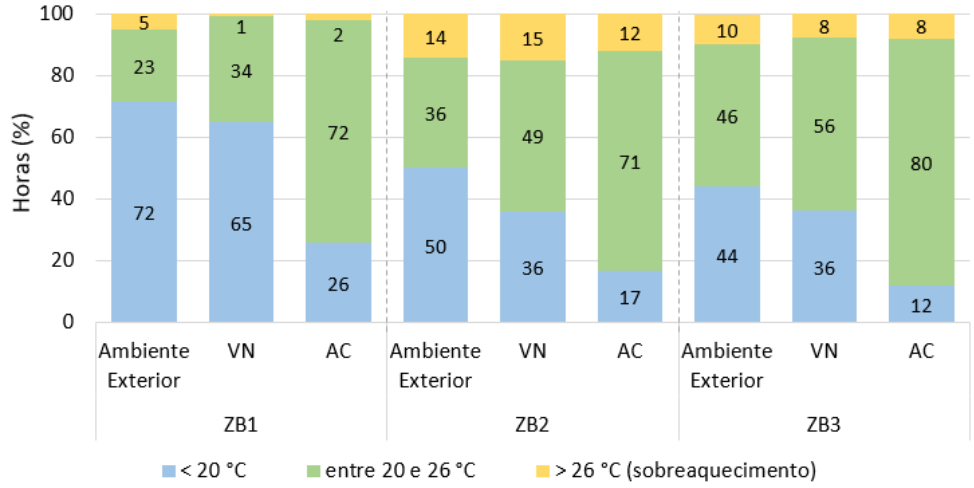
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

6.2.4 Síntese dos resultados

Este item tem como objetivo realizar uma breve síntese dos resultados apresentados para a classificação do nível de eficiência energética da envoltória (RTQ-R) e para o diagnóstico termoenergético.

O gráfico da Figura 6-22 apresenta comparativamente o percentual da média mensal e anual das temperaturas internas e externas menores do que 26°C, entre 20 e 26°C e maiores do que 26°C, registradas nas habitações referenciais ZB1, ZB2 e ZB3, tanto ventiladas naturalmente (AC) quanto condicionadas artificialmente (CA).

Figura 6-22: Percentual de horas em conforto e desconforto da Residência ZB1, ZB2 e ZB3 ventilada naturalmente (VN) e condicionadas artificialmente (AC).

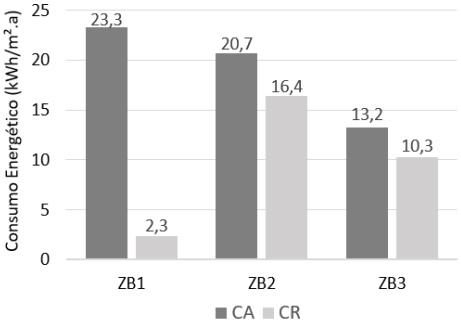


Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Em todos os casos, as edificações atuam como amenizadores do clima do ambiente exterior, e o percentual de horas em que permanecem entre 20 e 26°C, sendo ventiladas naturalmente, é maior do que o registrado para o ambiente externo, aumentando significativamente com o condicionamento térmico. Com relação às temperaturas fora do intervalo entre 20 e 26°C, predominam em todos os casos temperaturas inferiores a 20°C, tanto no ambiente externo como no interior das edificações ventiladas naturalmente (VN) e condicionadas artificialmente (AC). Entre as cidades estudadas, a cidade de Bento Gonçalves (ZB1) apresenta o maior percentual de horas fora do intervalo entre 20 e 26°C, sendo 72% das horas do ano abaixo dos 20°C, o que, consequentemente, reflete em um maior desconforto por frio na Residência ZB1, entre as edificações analisadas, que varia entre 65% com a edificação ventilada naturalmente (VN) e 26% com a edificação condicionada artificialmente (AC). A cidade de Santa Maria (ZB2) é a que exibe maior percentual de horas com temperaturas superiores a 26°C, atingindo 14% das horas do ano.

O gráfico da Figura 6-23 indica o consumo energético anual para aquecimento (CA) e refrigeração (CR) das Residências Referenciais ZB1, ZB2 e ZB3, condicionadas artificialmente (AC). A Residência ZB1, edificação presente na cidade em estudo com o maior intervalo de horas fora das temperaturas entre 20 e 26°C, apresenta o maior consumo energético para aquecimento dos casos investigados, atingindo 23,3 kWh/m².a. Além disso, a diferença entre o consumo de aquecimento e de refrigeração da Residência ZB1 é também a maior entre os casos de estudo, haja vista que o aquecimento utiliza 21 kWh/m².a. a mais do que o consumo de refrigeração. As Residências ZB2 e ZB3 também consomem mais energia anual com o aquecimento, porém a diferença entre o consumo de aquecimento e o de refrigeração é menor do que na Residência ZB1, com o registro de 4,3 kWh/m².a e 2,9 kWh/m².a, respectivamente.

Figura 6-23: Consumo energético (AC) de aquecimento (CA) e refrigeração (CR) das Residências ZB1, ZB2 e ZB3.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A Residência ZB1, construída para o clima de Bento Gonçalves, teve resultados mais distantes das temperaturas no intervalo entre 20 e 26ºC. Com a ventilação natural e condicionada artificialmente, essa residência apresenta um percentual máximo de 2% das horas do ano com temperaturas superiores aos 26°C. Porém, no inverno, passa por grandes períodos com temperaturas inferiores a 20°C, seja quando ventilada naturalmente (VN), com uma média anual de 65%, ou quando condicionada artificialmente (AC), com uma média anual de 27%. Essas informações são comprovadas pela análise do consumo energético de aquecimento e refrigeração da edificação. O consumo anual para aquecimento é aproximadamente dez vezes superior ao consumo para a refrigeração. Com isso, é possível verificar que a Residência ZB1 carece de estratégias arquitetônicas passivas de aquecimento, seja por meio da diminuição do sombreamento, da diminuição das janelas ou, então, do aumento do isolamento térmico para evitar a perda de calor do ambiente interno para o exterior.

A Residência ZB2, construída para o clima de Santa Maria, passa por períodos com temperaturas inferiores a 20ºC e superiores a 26ºC em todos os meses do ano, tanto quando ventilada naturalmente (VN) ou quando condicionada artificialmente (AC). Essa habitação registra 36% das horas do ano com temperaturas inferiores a 20ºC, quando ventilada naturalmente, e 17% quando condicionada artificialmente. O percentual de temperaturas superiores a 26ºC é de 15% quando ventilada naturalmente e de 12% das horas do ano quando condicionada artificialmente. Portanto, a ZB2 apresenta um percentual significativo de horas do ano com temperaturas fora do intervalo entre 20 e 26ºC. O consumo energético (AC) anual para aquecimento é superior ao consumo de refrigeração, com uma taxa de aproximadamente 21%. Nesse caso, é possível constatar a necessidade de estratégias para aquecimento e refrigeração da edificação, tais como a utilização de elementos de controle solar ao norte, para amenizar o aquecimento no interior da edificação nas estações quentes e permitir a entrada da radiação solar nas estações frias.

A Residência ZB3, construída para o contexto climático de Florianópolis, teve períodos de temperatura fora do intervalo entre 20 e 26ºC durante todo o ano, tanto com ventilação natural (VN) quanto com ventilação condicionada artificialmente (AC). Quando ventilada naturalmente e condicionada

artificialmente, a edificação apresentou, em média, 8% de temperaturas superiores a 26ºC, alcançando valores próximos aos 30% em alguns meses. Do total monitorado, em 36% das horas a residência registrou temperaturas inferiores a 20ºC, quando ventilada naturalmente, e 12% das horas quando condicionada artificialmente. O consumo energético (AC) anual para aquecimento é superior ao consumo de refrigeração, atingindo aproximadamente os 22%.

Da mesma forma que observou-se para a Residência ZB2, é possível constatar a necessidade de criação de estratégias para amenizar o desconforto por frio e por sobreaquecimento na ZB3, visando diminuir o consumo energético com condicionamento artificial (AC). Uma possível solução é o aumento das dimensões dos elementos de controle solar a norte, leste e oeste, para atenuar o aquecimento do interior da edificação nas estações quentes e permitir a entrada da radiação solar nas estações frias.

Quanto à análise das edificações ZB1, ZB2 e ZB3 sob condicionamento artificial (AC), é importante considerar, na interpretação dos resultados, que o sistema de ar-condicionado é acionado somente à noite, das 21 às 8h, quando a temperatura interna é inferior a 22°C ou superior a 24°C. Caso as edificações adotassem isolamento térmico nos fechamentos opacos, as trocas de calor do interior da edificação com o ambiente externo seriam minimizadas e o consumo energético para aquecimento e resfriamento com o uso do ar-condicionado teria uma redução substancial. Nesse sentido, é importante destacar que o desempenho termoenergético das edificações poderia ser melhorado caso, além das estratégias passivas básicas já utilizadas nas edificações em estudo, houvesse interferência na constituição dos materiais construtivos dos fechamentos, como, por exemplo, a inserção de isolamento térmico.

6.3 APLICAÇÃO OTIMIZADA DAS ESTRATÉGIAS *PASSIVE HOUSE*

Nesta etapa, foi realizada a otimização com algoritmo evolutivo multiobjetivo para atender aos requisitos das estratégias do conceito *Passive House* para climas quentes, conforme descrito no item 3.3, para as três edificações referenciais, ZB1, ZB2 e ZB3. Os parâmetros dinâmicos, apresentados no item 5.5, consistiram na espessura do isolamento térmico e na solução de janelas por orientação solar, na estanqueidade e na ventilação mecânica com recuperador de calor, visando minimizar o consumo energético e diminuir o percentual de horas em desconforto durante o ano.

Conforme descrito no item 5.5 da metodologia, todas as edificações otimizadas com o conceito *Passive House* utilizam o sistema de ventilação mecânica com recuperador de calor (MVHR) durante as 24 horas do dia. Para edificações que não alcançaram os critérios definidos pelo conceito *Passive House* para clima quente, ou seja, que ultrapassaram o consumo máximo individual para aquecimento e resfriamento de 15 kWh/m².a, e apresentaram um sobreaquecimento de 10% das horas de um ciclo anual, adicionou-se um novo parâmetro no processo de otimização que permite simular a ventilação

híbrida, com o sistema MVHR em conjunto com a ventilação natural através da abertura das janelas. A abertura das janelas foi definida pela otimização para dois períodos do ano, estações quentes e frias, entre as temperaturas internas de 21 e 30ºC. As estações frias foram definidas entre o equinócio de outono (21/03) e primavera (21/09) e as estações quentes entre o equinócio de primavera (21/09) e de outono (21/03).

Para a análise dos resultados, é importante considerar que nas edificações ZB1, ZB2 e ZB3, quando condicionadas artificialmente (AC), o sistema de ar-condicionado é acionado somente à noite, das 21 às 8h, sob temperaturas internas inferiores a 22°C ou superiores a 24°C, conforme descrito no item 5.4.1. O Quadro 6-1 resume o acionamento de cada sistema de condicionamento térmico para as edificações Referenciais (AC), edificações *Passive House* (PH) e edificações *Passive House* com ventilação natural (PH VN).

Quadro 6-1: Acionamento dos sistemas de condicionamento térmico das edificações AC, PH e PH VN.

Edificações e sistemas de Condicionamento térmico		**Horas do dia (h)**	**Acionamento**	**Detalhes em:**
Referencial AC	Ar-condicionado	21:00 – 8:00	a) aquecimento quando a temperatura do ambiente < 22°C; b) refrigeração quando a temperatura do ambiente >24 °C.	Item 5.4.1
		8:00 – 21:00	Ventilado naturalmente: a) temperatura do ambiente ≥ 20°C; b) temperatura externa < que a temperatura interna.	
PH	MVHR	24h	- Quando não for necessário recuperar calor, é utilizado *Bypass*; - Temperatura inferior aos 20°C: é acionado uma resistência de climatização para aquecimento; - Temperatura superior aos 26°C: é acionado um condensador para resfriamento.	Item 5.5.4
PH VN	MVHR com Ventilação natural (ventilação híbrida)	24h	- Quando não for necessário recuperar calor, é utilizado *Bypass*; - Temperatura inferior aos 20°C: é acionado uma resistência de climatização para aquecimento; - Temperatura superior aos 26°C: é acionado um condensador para resfriamento; - Possibilidade de abertura das janelas entre as temperaturas de 21 e 30°C (temperatura definida pela otimização).	Item 5.5.4 e 5.5

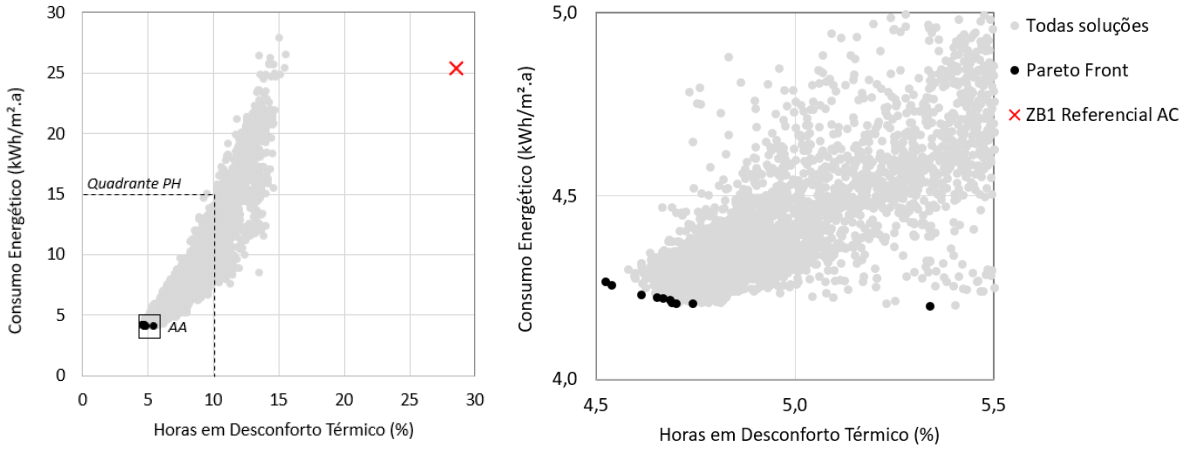
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

6.3.1 Residência ZB1

O gráfico da Figura 6-24 apresenta todas as simulações realizadas para otimização, e o *Pareto Front* definido pelas melhores soluções, isto é, a combinação de parâmetros, representando ainda o Quadrante PH e a ZB1 Referencial AC. Todas as soluções contidas no Quadrante PH cumprem com os critérios mínimos da *Passive House* para clima quente, ou seja, respeitam um consumo energético individual para refrigeração e aquecimento que não ultrapasse 15 kWh/m².a e apresentam um

sobreaquecimento máximo de 10% das horas do ano. Na Figura 6-24b, à direita, é destacado o *Pareto Front* da Área Ampliada (AA), para melhor interpretação e visualização.

Figura 6-24: Resultado das simulações de otimizações: Residência ZB1 PH.



a) Todas as simulações e ZB1 Referencial AC b) Área Ampliada (AA)

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Comparando-se o resultado da simulação da Residência ZB1 Referencial AC, com os resultados simulados para otimização PH, verifica-se que todas as soluções apresentam uma melhora no desempenho conjunto entre o consumo energético e a diminuição das horas em desconforto térmico. Um número significativo das simulações fica dentro do Quadrante PH, demonstrando que há milhares de combinações possíveis que geram soluções que alcançam os critérios *Passive House* para um clima quente.

A Tabela 6-22 apresenta o consumo energético para aquecimento (CA), refrigeração (CR) e o percentual de temperaturas em desconforto por frio (abaixo dos 20°C) e em desconforto por sobreaquecimento (superior aos 26°C) da solução da otimização do Ponto Médio do *Pareto Front* (PFM) e da solução mais próxima ao vértice do Quadrante PH (VPH), em comparação com a Residência ZB1 Referencial AC. Todas as soluções verificadas do PFM e do VPH atendem aos critérios da *Passive House*. A solução do PFM apresenta 1,85 kWh/m².a como consumo energético de refrigeração e 2,37 kWh/m².a como valor de aquecimento, com um sobreaquecimento de 1,95% das horas do ano. A solução do VPH, mesmo exibindo valores superiores aos encontrados pelo PFM, apresenta o consumo energético para refrigeração, aquecimento, e uma taxa de sobreaquecimento (em %) que atendem, com uma margem significativa, aos critérios estabelecidos pelo conceito *Passive House*.

Tabela 6-22: Requisitos para consumo energético e sobreaquecimento para o conceito *Passive House*.

Soluções	Sistema de condicionamento térmico	Consumo energético (kWh/m².a)			Desconforto térmico (%)			Atende aos requisitos PH?
		CR	CA	Total	<20 ºC	>26 ºC	Total	
ZB1 Referencial AC	AC	2,30	23,3	25,6	26,63	1,78	28,41	Não
PH (PFM)	MVHR	1,85	2,37	4,22	2,78	1,95	4,69	Sim
PH (VPH)	MVHR	2,20	12,87	15,08	8,22	1,96	10,18	Sim

Legenda: Valores não atendidos pelo Conceito *Passive House* para climas quentes

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A Tabela 6-23 apresenta comparativamente as soluções das estratégias *Passive House* do Ponto Médio do *Pareto Front* (PFM) e do ponto mais próximo do vértice do Quadrante PH (VPH).

Tabela 6-23: Resultados das soluções *Passive House* para a ZB1 PH (PFM e VPH).

Estratégias *Passive House*		Especificação do parâmetro	PH (PFM)		PH (VPH)	
			e*	U**	e*	U**
	Isolamento Térmico	Cobertura	0,15	0,14	0,09	0,21
		Piso	0,015	1,26	0,02	1,02
		Fachada Norte	0,15	0,16	0,08	0,27
		Fachada Sul	0,15	0,16	0,07	0,30
		Fachada Leste	0,15	0,16	0,02	0,65
		Fachada Oeste	0,15	0,17	0,13	0,19
	Janela Eficiente	Fachada Norte	Vidro Triplo/PH		Vidro Duplo	
		Fachada Sul	Vidro Duplo/PH		Vidro Simples	
		Fachada Leste	Vidro Duplo/PH		Vidro Laminado	
	Estanqueidade	Infiltração (h^{-1})	0,016		0,042	
	Ventilação Mecânica com Recuperador de Calor (MVHR)	Renovação de ar médio (h^{-1})	0,75		0,64	
		Bypass (h^{-1})	1,45		1,23	
		Eficiência (%)	95		91	
		Tipo	Corrente cruzada		Corrente cruzada	

*e = espessura (m); **U = transmitância (W/(m².°C))

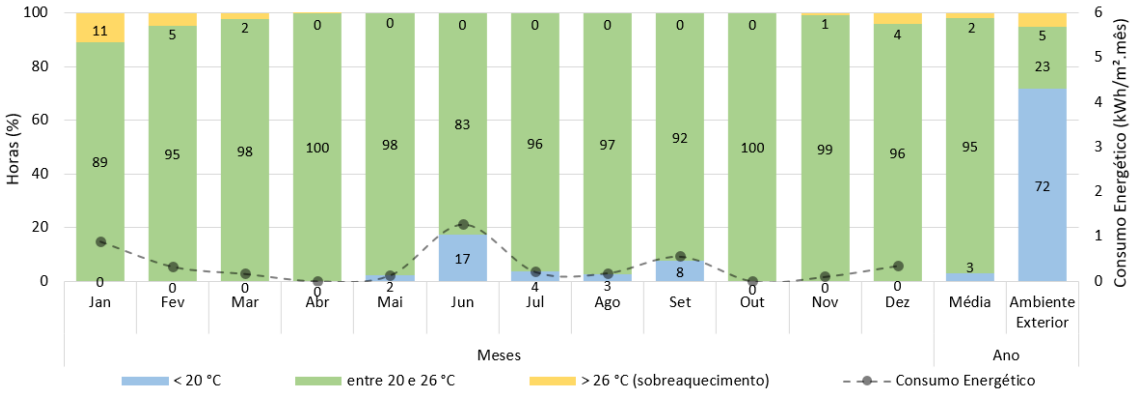
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

As soluções apresentadas na Tabela 6-23 demonstram que é possível alcançar os requisitos das estratégias *Passive House* por meio de um isolamento térmico a partir de 0,015 m. Na melhor solução, modelo PFM, com exceção da laje do piso, todos os fechamentos opacos apresentaram a maior espessura possível de isolamento térmico, ou seja, 15 cm. Aumentando-se o isolamento térmico das paredes e diminuindo a transmitância das janelas, conforme verificado na comparação entre PFM e VPH, o desempenho energético é melhorado e o desconforto térmico amenizado. Nos dois casos analisados, as melhores soluções apresentaram recuperador de calor de corrente cruzada com eficiência a partir dos 91%. Na solução PFM, a simulação conduziu a valores mais altos de renovação de ar (0,75 h^{-1}) e de *Bypass* (1,45 h^{-1}) e a uma menor infiltração (0,016 h^{-1}) do que no caso VPH.

Para a análise de desconforto e consumo energético, selecionou-se a solução definida pelo Ponto Médio do *Pareto Front* (PFM). O gráfico da Figura 6-25 apresenta a média percentual mensal e anual

das temperaturas internas e externas menores do que 26°C, entre 20 e 26°C e maiores do que 26°C (sobreaquecimento) da Residência ZB1 com o conceito *Passive House*, além de indicar o consumo energético para o condicionamento térmico artificial (MVHR). O percentual de conforto gira em torno de 83 a 100% das horas durante os meses do ano; o maior desconforto por sobreaquecimento é no mês de janeiro, com um percentual de 11%, e o maior desconforto por frio é em junho, com um total de 17% das horas abaixo dos 20ºC. Os maiores consumos energéticos com condicionamento térmico acontecem nos meses com maior percentual de desconforto, em janeiro e junho, com valores aproximados de 1 kWh/m².mês. Em um comparativo com o ambiente exterior, o percentual médio de horas no intervalo entre 20 e 26°C aumentou de 23% para 95% no ambiente interior.

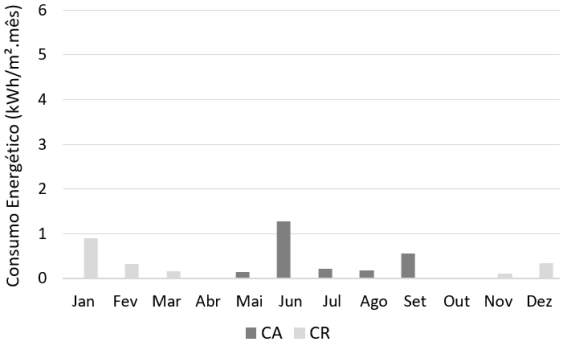
Figura 6-25: Percentual de horas em conforto, desconforto e o consumo energético (MVHR): Residência ZB1 PH (PFM).



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

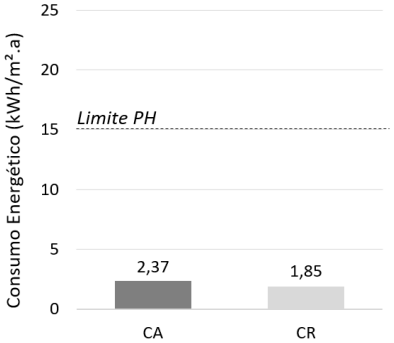
Os gráficos da Figura 6-26 apresentam o consumo energético mensal (MVHR) por metro quadrado de refrigeração (CR) e de aquecimento (CA) da Residência ZB1 com o conceito *Passive House* (PFM). Conforme se verifica, o maior consumo energético para aquecimento é no mês de junho e o maior consumo energético para refrigeração é no mês de janeiro. Com a análise do gráfico da Figura 6-27, conclui-se que o consumo energético anual despendido com aquecimento (CA) é superior (2,37 kWh/m².a) ao consumo para refrigeração (CR) (1,85 kWh/m².a).

Figura 6-26: Consumo energético mensal (MVHR) para aquecimento (CA) e refrigeração (CR).



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Figura 6-27: Consumo energético anual (MVHR) para aquecimento (CA) e refrigeração (CR).



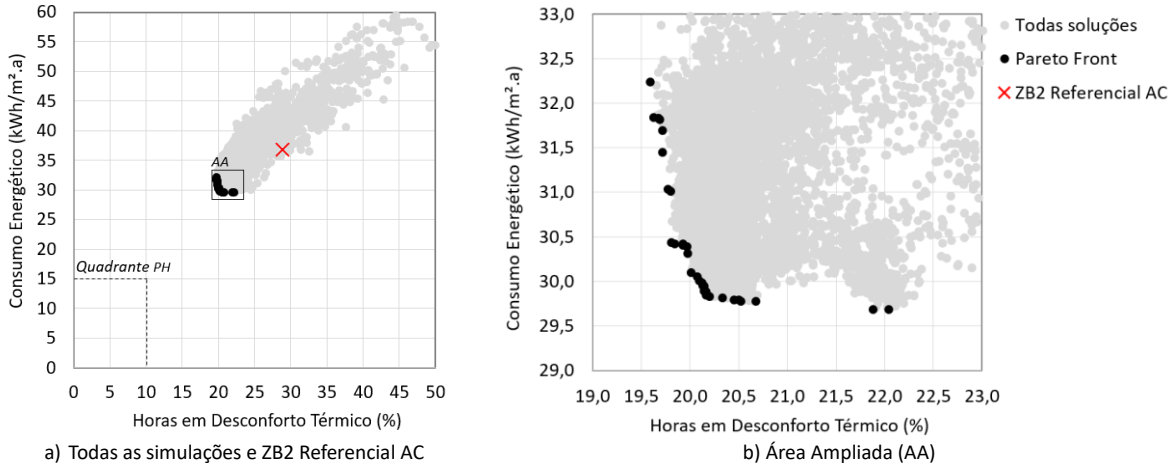
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Conforme verificado anteriormente no diagnóstico termoenergético, item 6.2.3, a Residência ZB1 sem a aplicação das estratégias *Passive House* apresenta elevada necessidade de aquecimento. Com a aplicação das estratégias *Passive House*, o uso de fechamentos opacos e transparentes com baixa transmitância teve grande contribuição para manutenção de uma temperatura interna elevada e a diminuição do consumo energético anual.

6.3.2 Residência ZB2

O gráfico da Figura 6-28 apresenta todas as simulações realizadas para otimização, e o *Pareto Front* definido pelas melhores soluções, i.e., a combinação de parâmetros, além de representar o Quadrante PH e a ZB2 Referencial AC. Todas as soluções contidas no Quadrante PH cumprem com os critérios mínimos da *Passive House* para clima quente, ou seja, o consumo energético individual para refrigeração e aquecimento não ultrapassa 15 kWh/m².a, e o sobreaquecimento atinge uma taxa máxima de 10% das horas do ano. Na Figura 6-28b, à direita, para melhor interpretação e visualização, é destacado o *Pareto Front* da Área Ampliada (AA). Nenhuma das soluções simuladas ficou dentro do Quadrante PH.

Figura 6-28: Resultado das simulações de otimizações: Residência ZB2 PH.



a) Todas as simulações e ZB2 Referencial AC b) Área Ampliada (AA)

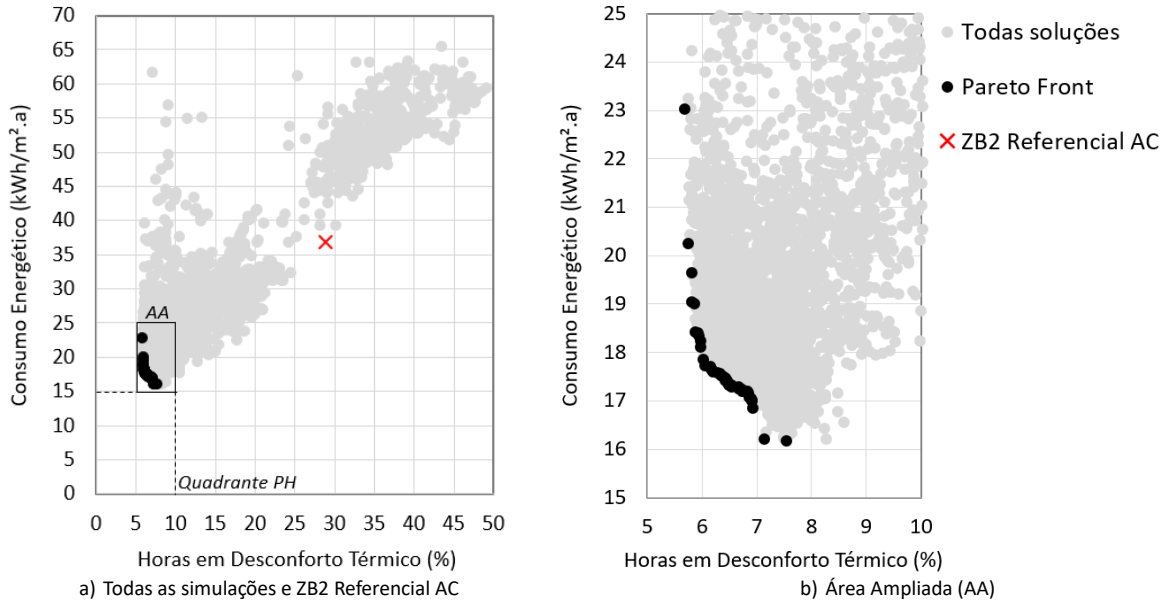
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Os resultados da simulação para aplicação otimizada do conceito *Passive House* para a Residência ZB2 não alcançaram os critérios mínimos de consumo energético e sobreaquecimento, conforme pode ser verificado na Tabela 6-24. A solução definida pelo PH (PFM) apresenta um consumo energético de aquecimento de 5,14 kWh/m².a e, para refrigeração, atinge 24,88 kWh/m².a, com uma taxa de sobreaquecimento em torno de 17,13%. Como não foram atendidos os critérios mínimos do conceito *Passive House*, foi adicionado um novo parâmetro, que considera a ventilação natural em conjunto com o MVHR, a ventilação híbrida (ver metodologia, item 5.5). Verificou-se, assim, a necessidade de

um novo ciclo de otimização com a adição de um parâmetro dinâmico de ventilação natural, identificado pela tendência dos resultados nos quais os valores do sistema de ventilação mecânica com recuperador de calor aproximavam-se dos índices máximos de *Bypass*. Desse modo, constatou-se que era necessária uma capacidade maior de renovação de ar, que só seria possível atingir por meio da ventilação natural com a abertura das janelas.

O gráfico da Figura 6-29 apresenta o conjunto do novo grupo de simulações realizadas para otimização do conceito PH com recurso à estratégia de ventilação híbrida, ou seja, o sistema de ventilação natural em conjunto com o MVHR (PH VN). O gráfico da Figura 6-29 demonstra que nenhuma das soluções encontradas pelo novo conjunto de simulações permaneceu dentro do Quadrante PH.

Figura 6-29: Resultado das simulações de otimizações: Residência ZB2 PH VN.



a) Todas as simulações e ZB2 Referencial AC

b) Área Ampliada (AA)

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A Tabela 6-24 ilustra o consumo energético para aquecimento (CA), refrigeração (CR) e o índice de desconforto térmico da solução do Ponto Médio do *Pareto Front* com o conceito *Passive House,* PH (PFM). Além disso, trata da solução do Ponto Médio do *Pareto Front* com o conceito *Passive House* com ventilação natural, PH VN (PFM), e da solução do ponto mais próximo ao vértice do Quadrante PH ventilado naturalmente, PH VN (VPH), em comparação com a Residência ZB2 Referencial AC.

Tabela 6-24: Requisitos para consumo energético e sobreaquecimento para o conceito *Passive House*.

Soluções	Sistema de condicionamento térmico	Consumo energético (kWh/m².a)			Desconforto térmico (%)			Atende aos requisitos PH?
		CR	CA	Total	<20 °C	>26 °C	Total	
ZB2 Referencial AC	AC	16,40	20,70	37,1	16,68	11,92	28,6	Não
PH (PFM)	MVHR	24,88	5,15	30,01	3,05	17,13	20,18	Não
PH VN (PFM)	MVHR	15,05	2,45	17,50	0,32	6,08	6,40	Não
PH VN (VPH)	MVHR	13,88	2,32	16,20	0,35	7,18	7,52	Sim

Legenda: Valores não atendidos pelo Conceito *Passive House* para climas quentes

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A Tabela 6-25 apresenta as temperaturas para abertura das janelas nas estações quentes e frias. A abertura das janelas acontece em temperaturas muito próximas nas duas soluções, PFM e VPH, com o mesmo valor médio de 23,2°C. O melhor desempenho termoenergético com a ventilação híbrida, sistema (MVHR) com ventilação natural, acontece com a abertura de janelas com a temperatura mais elevada nos meses frios. Nas estações quentes, as janelas são abertas com 22,5°C, enquanto que nas estações frias a abertura das janelas acontece com a temperatura um pouco mais alta, girando em torno de 23,8°C.

Tabela 6-25: Abertura de janelas.

Soluções	Parâmetros de simulação	Temperatura para abertura de janela (°C)		
		Estações Quentes*	Estações Frias*	Média
PH VN (PFM)	21 e 30°C	22,5	23,8	23,2
PH VN (VPH)		22,5	23,9	23,2
Média		**22,5**	**23,9**	**23,2**

* estações frias: entre os equinócios de outono (21/03) e primavera (21/09); estações quentes: entre os equinócios de primavera (21/09) e outono (21/03).

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Para análise das estratégias adotadas, do conforto e desconforto térmico e do consumo energético, será utilizada a solução PH VN (VPH), que corresponde à única solução analisada que atendeu aos critérios *Passive House*, com consumo de aquecimento e refrigeração inferiores a 15 kWh/m².a, individualmente, e com uma taxa de sobreaquecimento menor do que 10%.

A Tabela 6-26 expõe os resultados das estratégias *Passive House* para a solução do ponto mais próximo ao vértice do Quadrante PH ventilado naturalmente, PH VN (VPH). O isolamento variou por volta de 0,10 m para a laje do piso, 0,095 m em média para as paredes externas, 0,13 m para a cobertura e 0,04 m para parede interna, com uso de vidro Duplo/PH em todas as orientações das fachadas e com a aplicação de um sistema recuperador de corrente cruzada com 94% de eficiência. A renovação de ar interior média de todos os ambientes foi de 0,55h^{-1}, sendo que o *bypass* apresentou um valor de 1,41 h^{-1} e a infiltração uma taxa de 0,04h^{-1}.

Tabela 6-26: Resultados das soluções para a Residência ZB2 PH VN (VPH).

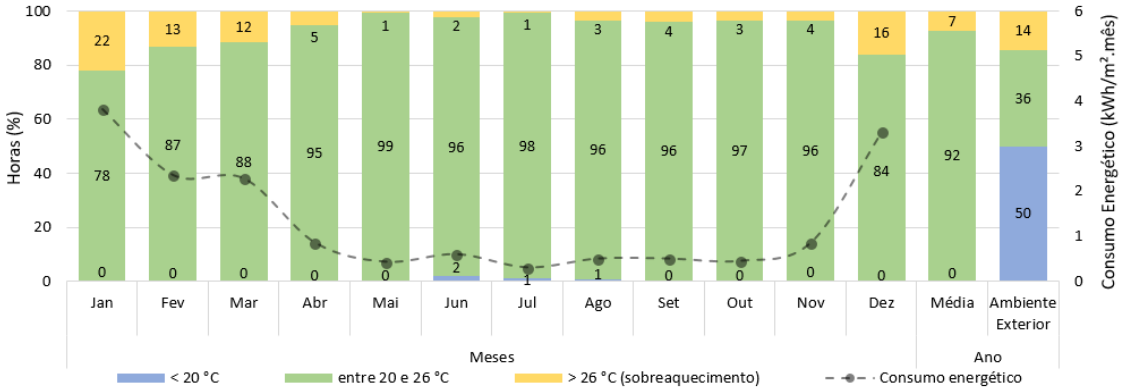
Estratégias *Passive House*		**Especificação do parâmetro**	**PH VN (VPH)**	
			e*	U**
	Isolamento Térmico	Cobertura/Terraço	0,13	0,15/0,19
		Laje do Piso	0,10	0,25
		Fachada Norte	0,10	0,22
		Fachada Sul	0,07	0,30
		Fachada Leste	0,09	0,24
		Fachada Oeste	0,12	0,19
		Parede Sul Interna	0,04	0,54
	Janela Eficiente	Fachada Norte	Vidro Duplo/PH	
		Fachada Sul	Vidro Duplo/PH	
		Fachada Leste	Vidro Duplo/PH	
		Fachada Oeste	Vidro Duplo/PH	
	Estanqueidade	Infiltração (h^{-1})	0,04	
	Ventilação Mecânica com Recuperador de Calor (MVHR)	Renovação de ar médio (h^{-1})	0,55	
		Bypass (h^{-1})	1,41	
		Eficiência (%)	94	
		Tipo	Corrente cruzada	

*e = espessura (m); **U = transmitância (W/(m².°C))

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

O gráfico da Figura 6-30 ilustra o percentual mensal das temperaturas internas em desconforto térmico da solução PH VN (VPH) da Residência ZB2, em comparação com as temperaturas externas inferiores a 20ºC, superiores a 26ºC e entre 20 e 26ºC, além de indicar o consumo energético para o condicionamento térmico artificial (MVHR). O percentual de conforto foi entre 78 e 99% das horas durante os meses do ano, e atingiu uma média anual de 92%. O maior desconforto por sobreaquecimento ocorre no mês de janeiro, com um percentual de 22%, e o maior desconforto por frio ocorre no mês de junho, com um total de 2% das horas abaixo dos 20ºC. Os maiores consumos com condicionamento térmico acontecem nos meses com maior percentual de desconforto por sobreaquecimento, de dezembro a março. Nesse caso, é possível perceber a importância da diminuição da temperatura interna da edificação, que pode ser alcançada com a adoção de mais elementos de controle solar externos para melhor sombrear os ambientes nos períodos quentes. Em comparação com o ambiente exterior, o percentual médio de horas no intervalo entre 20 e 26°C aumentou de 36% para 92% no ambiente interior.

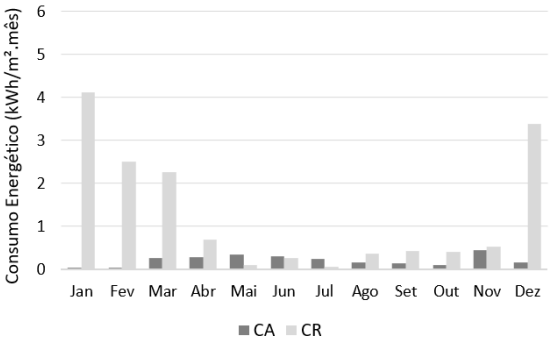
Figura 6-30: Percentual de horas em conforto, desconforto e o consumo energético (MVHR): Residência ZB2 PH VN (VPH).



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

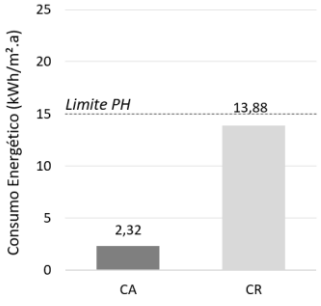
Com o gráfico da Figura 6-31, é possível verificar que os maiores consumos energéticos para aquecimento são nos meses de maio, junho e novembro, ao passo que os maiores consumos de energia para refrigeração são em janeiro e dezembro. O gráfico da Figura 6-32 demonstra que o consumo anual com refrigeração (CR) é muito superior (13,88 kWh/m².a) ao o consumo de aquecimento (CA) (2,32 kWh/m².a). Novamente, o resultado aponta para uma necessidade de diminuição do aquecimento dos ambientes nos períodos quentes; uma possível solução para atenuação desse problema seria utilizar elementos de controle solar externos na fachada norte para o aumento de sombreamento nos meses de maior temperatura.

Figura 6-31: Consumo energético mensal (MVHR) para aquecimento (CA) e refrigeração (CR).



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Figura 6-32: Consumo energético anual (MVHR) para aquecimento (CA) e refrigeração (CR).

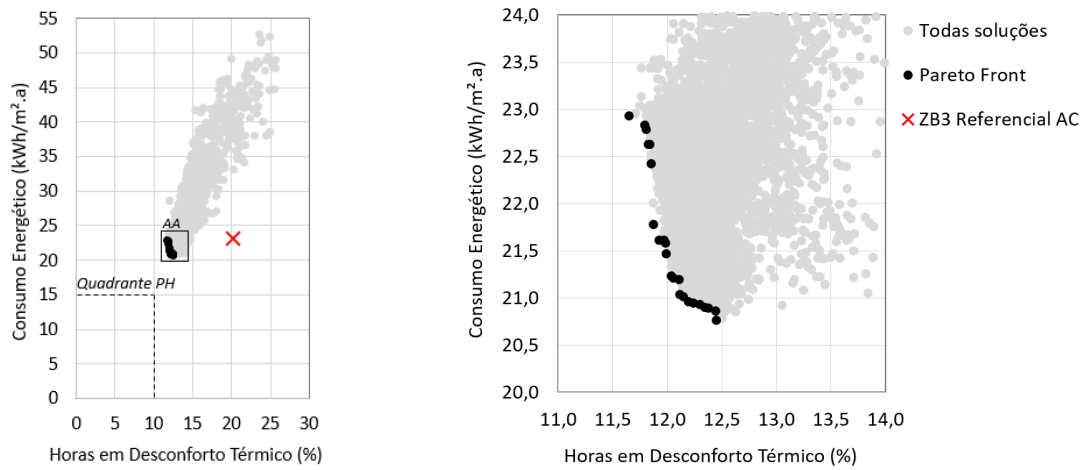


Fonte: elaborado pelo próprio autor.

6.3.3 Residência ZB3

O gráfico da Figura 6-33 apresenta todas as simulações realizadas para otimização da Residência ZB3, com as estratégias do conceito *Passive House*, o *Pareto Front*, o Quadrante PH e a ZB3 Referencial AC. Na Figura 6-33b, à direita, destaca-se o *Pareto Front* da Área Ampliada (AA) para uma melhor interpretação e visualização da informação.

Figura 6-33: Resultado das simulações de otimizações: Residência ZB3 PH.



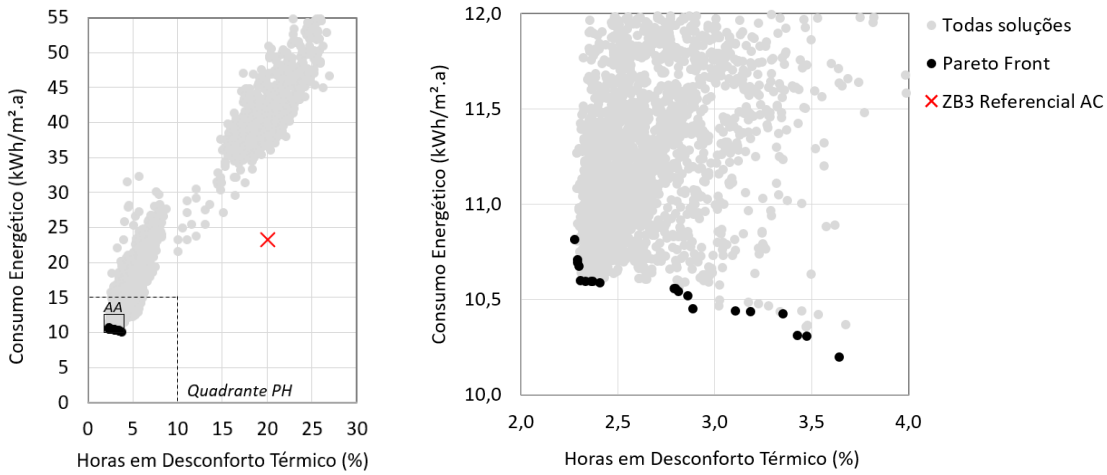
a) Todas as simulações e ZB3 Referencial AC b) Área Ampliada (AA)

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Embora o consumo total de energia e o desconforto térmico do Ponto Médio do *Pareto Front*, PH (PFM), sejam inferiores ao ZB3 Referencial AC, o consumo com refrigeração ultrapassa os 15 kWh/m².a, não alcançando, portanto, os critérios da *Passive House* para clima quente (Tabela 6-27). Assim como no caso anterior, da Residência ZB2, também foram realizadas as simulações de otimização multiobjetivo com o uso de ventilação híbrida, já que não foram atendidos os critérios mínimos do conceito *Passive House* para o clima no qual a edificação está localizada.

O gráfico da Figura 6-34 apresenta o conjunto do novo grupo de simulações para otimização do conceito PH com o emprego da estratégia de ventilação natural (PH VN). Muitas das soluções otimizadas se encontram dentro do Quadrante PH, atingindo, assim, os critérios da *Passive House* para climas quentes.

Figura 6-34: Resultado das simulações de otimizações: Residência ZB3 PH VN.



a) Todas as simulações e ZB3 Referencial b) Área Ampliada (AA)

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A Tabela 6-27 expõe comparativamente os resultados do consumo energético e de desconforto térmico da ZB3 Referencial AC, a solução do ponto médio do *Pareto Front*, PH (PFM), a solução do Ponto Médio do *Pareto Front*, PH VN (PFM), e o ponto mais próximo ao vértice do Quadrante PH, PH VN (VPH). Das soluções analisadas, somente a solução PH (PFM) não atendeu aos critérios *Passive House* para climas quentes, com um consumo energético de refrigeração equivalente a 18,52 kWh/m².a.

Tabela 6-27: Requisitos de consumo energético e sobreaquecimento para o conceito *Passive House*.

Soluções	Sistema de condicionamento térmico	Consumo energético (kWh/m².a)			Desconforto térmico (%)			Atende aos requisitos PH?
		CR	CA	Total	<20 ºC	>26 ºC	Total	
ZB3 Referencial AC	AC	10,3	13,2	23,5	11,97	7,90	19,87	Sim
PH (PFM)	MVHR	18,52	2,73	21,25	2,49	9,61	12,10	Não
PH VN (PFM)	MVHR	9,63	0,93	10,56	0,65	2,15	2,75	Sim
PH VN (VPH)	MVHR	12,83	2,31	15,14	1,37	4,61	5,98	Sim

Legenda: Valores não atendidos pelo Conceito *Passive House* para climas quentes

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A Tabela 6-28 apresenta as temperaturas para abertura das janelas nas estações quentes e frias. Nas duas soluções, PFM e VPH, o melhor desempenho termoenergético com a ventilação híbrida, sistema MVHR com ventilação natural, acontece com a abertura das janelas em uma temperatura mais elevada nas estações frias. Notadamente, na solução com melhor desempenho termoenergético, a PFM, as janelas são abertas aos 22,3ºC nas estações quentes, enquanto que nas estações frias a abertura acontece com a temperatura de 24,0ºC.

Tabela 6-28: Abertura de janelas.

Soluções	Parâmetro	Temperatura para abertura de janela (ºC)		
		Estações Quentes*	Estações Frias*	Média
PH VN (PFM)	21 e 30ºC	22,3	24,0	23,2
PH VN (VPH)		23,0	24,0	23,5
Média		**22,7**	**24,0**	**23,0**

* estações frias: entre os equinócios de outono (21/03) e primavera (21/09); estações quentes: entre os equinócios de primavera (21/09) e outono (21/03).

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A Tabela 6-29 demonstra os resultados das estratégias *Passive House* para a solução PH VN (PFM) e PH VN (VPH). A solução com menor desempenho termoenergético, a PH VN (VPH), apresentou em média uma menor espessura de isolamento dos fechamentos opacos e a necessidade de um equipamento de ventilação mecânica com recuperador de calor de menor eficiência (91%). A solução com melhor desempenho termoenergético, a PFM, apresentou menor transmitância na cobertura, transmitância média intermediária nas paredes externas e maior na laje do piso. Entre o PH VN (PFM)

e o PH VN (VPH) não houve variação significativa no *Bypass* e na renovação média do ar. A infiltração foi de 0,029 h^{-1} para PH VN (PFM) e de 0,045 h^{-1} para o PH VN (VPH).

Tabela 6-29: Resultados das soluções para a Residência ZB3 PH VN (PFM e VPH).

Estratégias *Passive House*	**Especificação do parâmetro**	**PH VN (PFM)**		**PH VN (VPH)**	
		e*	U**	e*	U**
Isolamento Térmico	Cobertura/terraço	0,13	0,16/0,18	0,05	0,32/0,39
	Laje do Piso	0,09	0,29	0,002	6,48
	Fachada Norte	0,13	0,19	0,005	1,48
	Fachada Sul	0,11	0,22	0,07	0,32
	Fachada Leste	0,09	0,26	0,05	0,43
	Fachada Oeste	0,11	0,22	0,13	0,19
Janela Eficiente	Fachada Norte	Vidro Duplo/PH		Vidro Laminado	
	Fachada Sul	Vidro Duplo/PH		Vidro Duplo/PH	
	Fachada Leste	Vidro Laminado		Vidro Laminado	
	Fachada Oeste	Vidro Duplo/PH		Vidro Triplo/PH	
Estanqueidade	Infiltração (h^{-1})	0,029		0,045	
Ventilação Mecânica com Recuperador de Calor (MVHR)	Renovação de ar (h^{-1})	0,55		0,66	
	Bypass (h^{-1})	1,48		1,39	
	Eficiência (%)	94		91	
	Tipo	Corrente cruzada		Corrente cruzada	

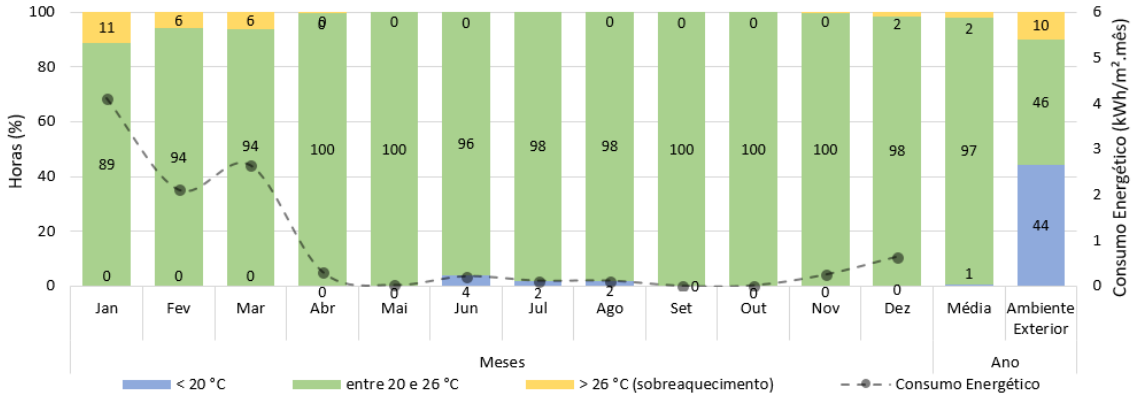
*e = espessura (m); **U = transmitância (W/(m².°C))

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Para a análise do conforto, desconforto e do consumo energético, será utilizada a solução com melhor desempenho termoenergético, a PH VN (PFM).

Conforme o gráfico da Figura 6-35 demonstra, o percentual de horas em conforto térmico no interior da edificação variou de 89 a 100% durante o ano; e o consumo energético para condicionamento térmico (MVHR) foi mais acentuado entre os meses de janeiro e fevereiro, período de maior desconforto por sobreaquecimento.

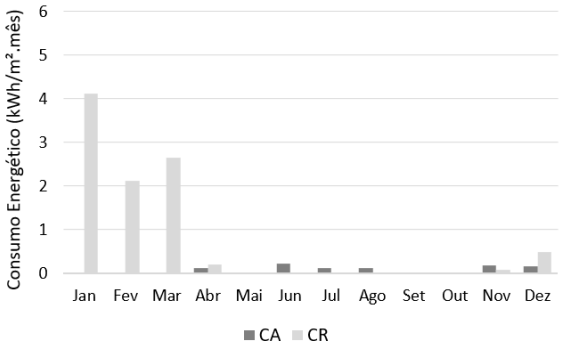
Figura 6-35: Percentual de horas em conforto, desconforto e o consumo energético (MVHR): Residência ZB3 PH VN (PFM).



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

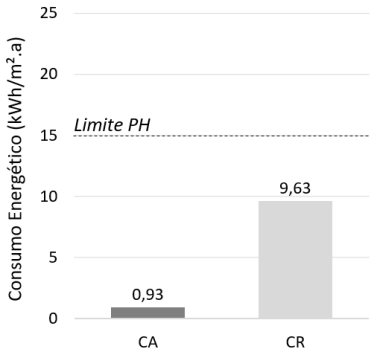
Os gráficos das Figuras 6-36 e 6-37 apresentam, respectivamente, o consumo energético (MVHR) mensal e anual de refrigeração (CR) e de aquecimento (CA) da Residência ZB3 PH VN (PFM). O maior consumo energético para aquecimento é nos meses de junho, novembro e dezembro, sendo o maior consumo de energia para refrigeração no mês de janeiro. O consumo anual com refrigeração (CR) (9,93 kWh/m².a) é aproximadamente dez vezes superior ao consumo de aquecimento (CA) (0,93 kWh/m².a). Esses resultados demonstram, portanto, que é necessário promover estratégias que minimizem o aquecimento no interior da edificação, uma possível solução para o problema consiste na diminuição das janelas ou no aumento do dimensionamento dos elementos de controle solar orientados a leste, oeste e norte.

Figura 6-36: Consumo energético mensal (MVHR) para aquecimento (CA) e refrigeração (CR).



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Figura 6-37: Consumo energético anual (MVHR) para aquecimento (CA) e refrigeração (CR).



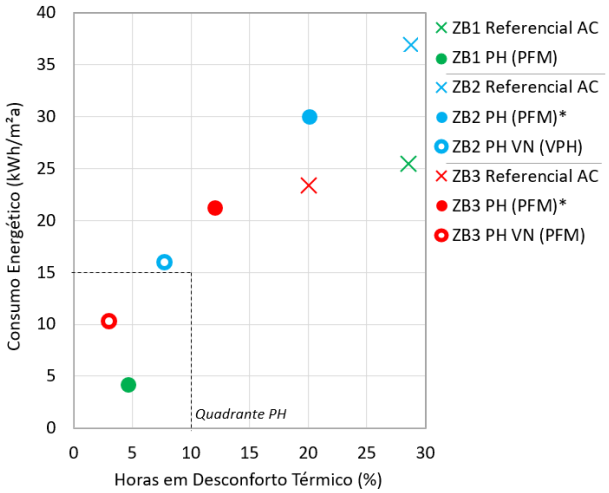
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

6.3.4 Síntese dos resultados

Nesta seção, objetiva-se realizar uma breve síntese dos resultados apresentados sobre a aplicação otimizada das estratégias *Passive House* nas edificações ZB1, ZB2 e ZB3.

A Figura 6-38 traz um gráfico que sintetiza os resultados das simulações de otimização para a aplicação do conceito *Passive House* nas residências ZB1, ZB2 e ZB3. É possível verificar que com a aplicação do conceito *Passive House* há uma diminuição considerável no consumo energético e no percentual de desconforto térmico anual. A Residência ZB1, com o conceito PH, foi a que apresentou melhor desempenho na relação entre consumo energético e diminuição das horas de desconforto térmico, em termos relativos. Com a adoção da ventilação natural em conjunto com o sistema de ventilação mecânica com recuperação de calor, ou seja, com a ventilação híbrida, as Residências ZB2 e ZB3 apresentaram diminuição no consumo energético e no desconforto térmico anual consideráveis, tendo, porém, um desempenho termoenergético inferior ao da Residência ZB1 PH.

Figura 6-38: Soluções das otimizações com conceito PH



*não atenderam aos critérios mínimos para PH para clima quentes.

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A Tabela 6-30 apresenta as temperaturas para abertura das janelas nas estações quentes e frias para as edificações residenciais ZB2 e ZB3 com a otimização da aplicação do conceito *Passive House*. Em todas as soluções, o melhor desempenho termoenergético com a ventilação híbrida, sistema MVHR com ventilação natural, acontece com a abertura de janelas com a temperatura mais elevada nas estações frias. Como nas estações quentes o maior consumo energético com condicionamento é para refrigeração, justifica-se a abertura das janelas para renovação do ar interno a uma temperatura inferior do que é observado nas estações frias, quando o consumo energético para aquecimento é mais elevado; tal fato justifica, inclusive, a abertura das janelas a uma temperatura mais elevada em estações frias do que nas estações quentes.

Tabela 6-30: Abertura de janelas.

Edificações	Soluções	Parâmetro	Temperatura para abertura de janela (ºC)		
			Estações Quentes*	Estações Frias*	Média
Residência ZB1	**PH (PFM)**	Sem abertura de janelas	-	-	-
	PH (VPH)		-	-	-
Residência ZB2	**PH VN (PFM)**	21 e 30ºC	22,5	23,8	23,2
	PH VN (VPH)		22,5	23,9	23,2
Residência ZB3	**PH VN (PFM)**		22,3	24,0	23,2
	PH VN (VPH)		23,0	24,0	23,5
Média			**22,6**	**23,9**	**23,3**

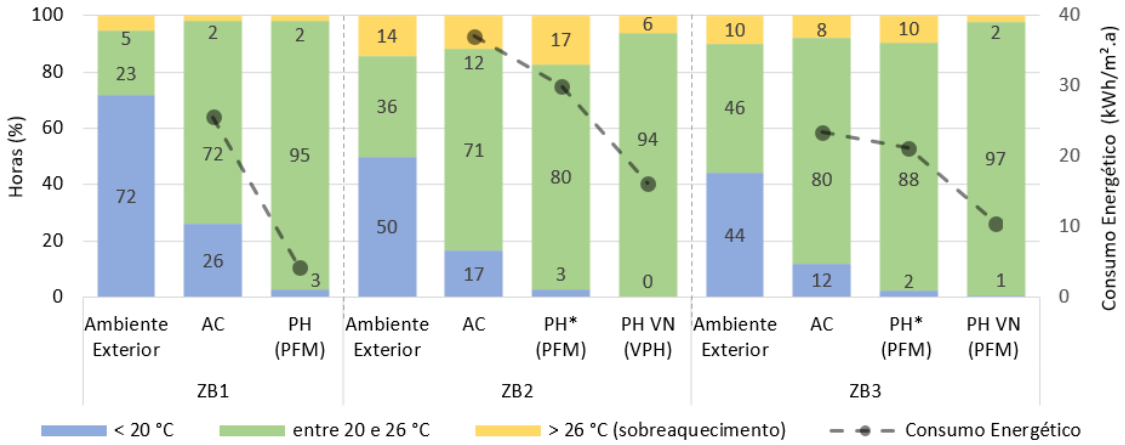
* estações frias: entre os equinócios de outono (21/03) e primavera (21/09); estações quentes: entre os equinócios de primavera (21/09) e outono (21/03).

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

O gráfico da Figura 6-39 apresenta, comparativamente, o percentual de conforto, desconforto e o consumo energético total com condicionamento térmico das Residências Referenciais ZB1, ZB2 e ZB3, condicionadas artificialmente (AC), com a aplicação otimizada do conceito *Passive House*, sem ventilação natural (PH) e com a ventilação híbrida, sistema MVHR com ventilação natural (PH VN).

Também é apresentado o percentual de horas com temperaturas inferiores a 20°C, superiores a 26°C e entre 20 e 26°C do ambiente externo.

Figura 6-39: Percentual de horas em conforto e desconforto e consumo energético anual.



* não atenderam aos critérios mínimos para PH para climas quentes.

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Em todos os casos analisados, o percentual de horas em conforto aumentou no interior da edificação com o uso das estratégias do conceito *Passive House* e, ao mesmo tempo, o consumo energético diminuiu. Note-se que mesmo estando inserida no clima com maior percentual de horas fora do intervalo entre 20 e 26°C das cidades analisadas, a Residência ZB1 conseguiu atender aos critérios *Passive House* sem a utilização de ventilação híbrida. Isso se deve, principalmente, à necessidade predominante de estratégias de aquecimento para esse clima, enquanto que para a ZB2 e a ZB3, mesmo apresentando índices de menor desconforto total, há um percentual considerável de horas em desconforto tanto por frio quanto por sobreaquecimento, exigindo estratégias que minimizem essas duas situações opostas, o que acaba por provocar um consumo com condicionamento térmico para aquecimento e refrigeração. Desse modo, foi necessário que as residências ZB2 e ZB3 adicionassem a ventilação natural para alcançarem os critérios mínimos da *Passive House* para climas quentes, aumentando assim o volume de renovações de ar interno que não eram suportados pelo sistema *Bypass* da ventilação mecânica com recuperador de calor. A adoção da ventilação natural em conjunto com o sistema MVHR, ventilação híbrida, pela abertura de janelas, nas edificações Residenciais ZB2 e ZB3, representou uma diminuição no consumo energético e um aumento no percentual de horas em conforto térmico, demonstrando que para climas com períodos de temperatura elevada, a ventilação natural pode ser necessária para aumentar as renovações de ar e diminuir a dependência de um sistema mecânico de maior potência.

A Tabela 6-31 apresenta de forma resumida as soluções das estratégias *Passive House* definidas pela abordagem do Ponto Médio do *Pareto Front* (PFM) e do ponto próximo ao vértice do Quadrante PH

(VPH) para as Residências ZB1, ZB2 e ZB3, além de indicar o consumo energético e o desconforto térmico de cada solução.

Tabela 6-31: Resultados resumidos das soluções *Passive House* para a ZB1, ZB2 e ZB3.

Estratégias PH	**Especificação do parâmetro**	**ZB1**				**ZB2**		**ZB3**			
		PH (PFM)		**PH (VPH)**		**PH VN (VPH)**		**PH VN (PFM)**		**PH VN (VPH)**	
		e*	U	e	U	e	U	e	U	e	U
Isolamento	Cobertura	0,15	0,14	0,09	0,21	0,13	0,17	0,13	0,17	0,05	0,36
	Laje do Piso	0,015	1,26	0,02	1,02	0,10	0,25	0,09	0,29	0,002	6,48
	Paredes Ext.	0,15	0,16	0,08	0,35	0,10	0,24	0,11	0,22	0,06	0,61
	Parede Int.	-	-	-	-	0,04	0,54	-	-	-	-
Janela Eficiente	Janelas utilizadas	Vidro Triplo/PH e Duplo/PH		Vidro Duplo, Simples e Laminado		Vidro Duplo/PH		Vidro Laminado e Duplo/PH		Vidro Laminado e Duplo/PH	
Estanqueidade	Infiltração (h^{-1})	0,016		0,042		0,040		0,029		0,045	
Ventilação Mecânica com Recuperador de Calor (MVHR)	Renovação de ar (%)	0,75		0,64		0,55		0,55		0,66	
	Bypass (h^{-1})	1,45		1,23		1,41		1,48		1,39	
	Eficiência (%)	95		91		94		94		91	
	Tipo	Corrente cruzada									
Consumo energético (MVHR) (kWh/m².a)	CR	1,85		2,20		13,88		9,63		12,83	
	CA	2,37		12,87		2,32		0,93		2,31	
	Total	**4,22**		**15,08**		**16,20**		**10,56**		**15,14**	
Desconforto térmico (%)	<20 ºC	2,78		8,22		0,35		0,65		1,37	
	>26 ºC	1,95		1,96		7,18		2,15		4,61	
	Total	**4,69**		**13,25**		**7,52**		**2,75**		**5,98**	

*e = espessura (m); **U = transmitância (W/(m².°C))

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

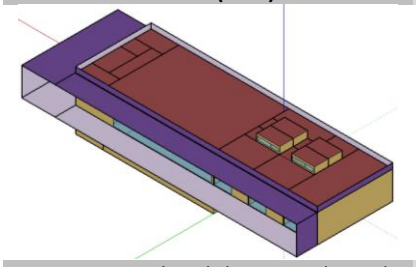
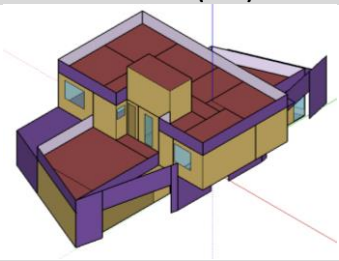
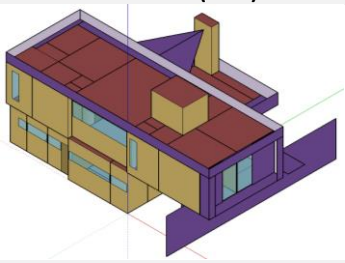
Analisando comparativamente as soluções otimizadas com a aplicação das estratégias do conceito *Passive House* nas edificações referenciais, é possível verificar a importância do isolamento térmico dos fechamentos opacos para a diminuição do consumo energético com condicionamento térmico e para a diminuição do desconforto. As soluções com melhor desempenho termoenergético foram construídas com maior espessura de isolamento térmico dos fechamentos opacos; todas as soluções utilizam janelas com Vidro Duplo em pelo menos uma orientação solar. As soluções com melhor desempenho termoenergético contam com recuperador de calor com eficiência entre 94 e 95%, sendo que em todas soluções analisadas a eficiência mínima necessária é de 91%.

Em todos os casos, as menores transmitâncias foram localizadas na cobertura, as intermediárias nas paredes externas e as maiores foram na laje do piso. A menor transmitância da cobertura e das paredes são justificáveis pela ampla área de exposição ao ambiente externo e a radiação solar, pela grande amplitude de temperatura entre o dia e a noite e entre as estações do ano. O piso interno, além de não estar exposto à radiação solar e ao ambiente externo, também compreende a menor amplitude

térmica, posto que está em contado com a massa térmica do solo, necessitando, assim, menor isolamento térmico.

Na Figura 6-40 são apresentados os modelos das edificações ZB1, ZB2 e ZB3 com as soluções do conceito *Passive House*, o percentual de redução do consumo energético e o percentual de redução do desconforto térmico em relação às edificações Referenciais AC. Para essa análise, foram utilizadas as soluções com melhores desempenhos termoenergéticos: ZB1 PH (PFM), ZB2 PH VN (VPH) e ZB3 PH VN (PFM).

Figura 6-40: Valores da redução do consumo energético e do desconforto térmico das Residências ZB1, ZB2 e ZB3 com a aplicação do conceito *Passive House* em relação às edificações referenciais.

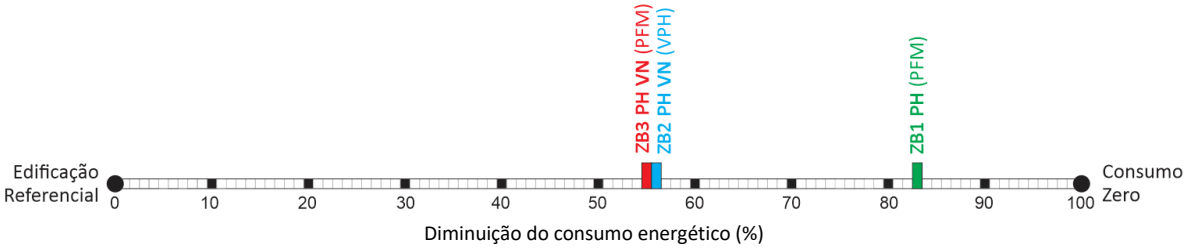
ZB1 PH (PFM)		**ZB2 PH VN (VPH)**	**ZB3 PH VN (PFM)**
			
Consumo energético (%)	-83,5 (MVHR)	-56,3 (MVHR)	-55,1 (MVHR)
Desconforto (%)	-83,5	-73,7	-86,2

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Conforme verificado na Figura 6-40, com a aplicação otimizada das estratégias do conceito *Passive House*, todas as edificações tiveram uma redução do consumo energético superior a 55% e uma redução no desconforto térmico acima dos 73%. O melhor desempenho termoenergético foi alcançado pela Residência ZB1, com uma redução de 83,5% do consumo energético e do desconforto térmico. As edificações presentes nas Zonas Bioclimáticas ZB2 e ZB3, que são caracterizadas por uma maior amplitude térmica, com temperaturas superiores a 26^{o}C e inferiores a 20^{o}C, registaram uma redução no consumo energético de 56,3%, sendo que a Residência ZB2 obteve uma diminuição de 73,7% na taxa de desconforto e de 55,1% no consumo energético, enquanto que a Residência ZB3 reduziu o desconforto em 86,2%.

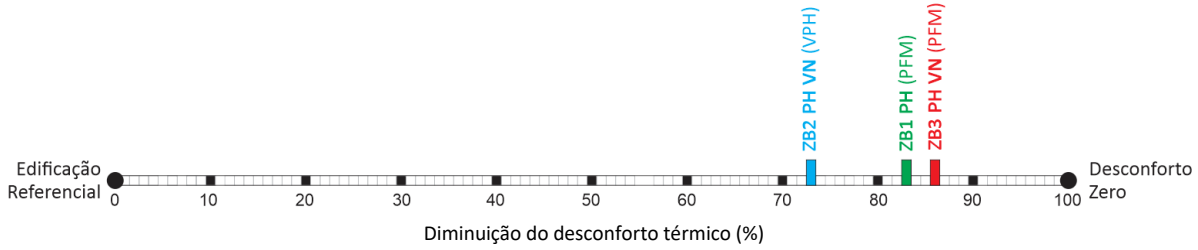
As Figuras 6-41 e 6-42 ilustram esquematicamente o percentual de diminuição do consumo energético e do desconforto térmico das edificações com o conceito *Passive House* em relação às edificações referenciais.

Figura 6-41: Comparativo da diminuição do consumo energético entre as soluções.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Figura 6-42: Comparativo da diminuição do desconforto entre as soluções.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

6.4 OTIMIZAÇÃO DO DIMENSIONAMENTO DE JANELAS E ELEMENTOS DE CONTROLE SOLAR EXTERNOS

Nesta etapa, utilizou-se, novamente, o algoritmo evolucionário multiobjetivo para a otimização de soluções de dimensionamento de janelas e elementos de controle solar externos nas Residências ZB1, ZB2 e ZB3 Referenciais, sem e com a otimização conjunta das estratégias *Passive House*. As edificações que foram otimizadas em conjunto com o conceito *Passive House* contaram com os mesmos parâmetros simulados da etapa anterior: o isolamento térmico, a estanqueidade, a ventilação mecânica com recuperador de calor e as janelas eficientes. A otimização teve como funções objetivo minimizar o consumo energético para condicionamento térmico e o percentual de horas em desconforto térmico.

Conforme descrito no item 5.5 da metodologia, todas as edificações otimizadas com o conceito *Passive House* utilizam o sistema de ventilação mecânica com recuperador de calor (MVHR) durante as 24 horas do dia. Para edificações que não alcançaram os critérios definidos pelo conceito *Passive House* para clima quente, ou seja, ultrapassaram o consumo máximo individual de 15 kWh/m².a para aquecimento e resfriamento e atingiram um sobreaquecimento de 10% do total de horas de um ciclo anual, adicionou-se um novo parâmetro no processo de otimização que permite simular a ventilação híbrida, com o sistema MVHR em conjunto com a ventilação natural através de abertura das janelas. O processo de abertura das janelas foi definido, assim, pela otimização para dois períodos do ano,

estações quentes e frias, entre as temperaturas internas de 21 e 30°C. As estações frias foram definidas entre os equinócios de outono (21/03) e primavera (21/09) e as quentes entre os equinócios de primavera (21/09) e outono (21/03).

Para a análise dos resultados, é importante lembrar que nas edificações ZB1, ZB2 e ZB3, em situação condicionada artificialmente (AC), o sistema de ar-condicionado é acionado somente à noite, das 21 às 8h, quando a temperatura interna for inferior a 22°C ou superior a 24°C, conforme descrito no item 5.4.1. O Quadro 6-2 resume o acionamento de cada sistema de condicionamento térmico para as edificações Referenciais (AC), edificações *Passive House* (PH) e edificações *Passive House* com ventilação naturalmente (PH VN).

Quadro 6-2: Acionamento dos sistemas de condicionamento térmico das edificações AC, PH e PH VN.

Edificações e sistemas de Condicionamento térmico		**Horas do dia (h)**	**Acionamento**	**Detalhes em:**
Referencial AC	Ar-condicionado	21:00 – 8:00	a) aquecimento quando a temperatura do ambiente < 22°C; b) refrigeração quando a temperatura do ambiente >24 °C.	Item 5.4.1
		8:00 – 21:00	Ventilado naturalmente: a) temperatura do ambiente ≥ 20°C; b) temperatura externa < que a temperatura interna.	
PH	MVHR	24h	- Quando não for necessário recuperar calor, é utilizado *Bypass*; - Temperatura inferior aos 20°C: é acionado uma resistência de climatização para aquecimento; - Temperatura superior aos 26°C: é acionado um condensador para resfriamento.	Item 5.5.4
PH VN	MVHR com Ventilação natural (ventilação híbrida)	24h	- Quando não for necessário recuperar calor, é utilizado *Bypass*; - Temperatura inferior aos 20°C: é acionado uma resistência de climatização para aquecimento; - Temperatura superior aos 26°C: é acionado um condensador para resfriamento; - Possibilidade de abertura das janelas entre as temperaturas de 21 e 30°C (temperatura definida pela otimização).	Item 5.5.4 e 5.5

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Para facilitar a leitura e a interpretação dos resultados, adotou-se as seguintes abordagem e nomenclatura:

a) Residências com otimização do dimensionamento de janelas e elementos de controle solar externos: Residência ZB1 DIM, Residência ZB2 DIM e Residência ZB3 DIM.

b) Residências com otimização do dimensionamento de janelas e elementos de controle solar externos em conjunto com a otimização das estratégias PH: Residência ZB1 DIM PH, Residência ZB2 DIM PH VN [2] e Residência ZB3 DIM PH VN[2].

[2] Na residência ZB2 e ZB3 foi adotado o conceito *Passive House* em conjunto com a ventilação natural (ventilação híbrida), visto que, apresentaram melhores resultados, conforme apresentado no item 6.3.

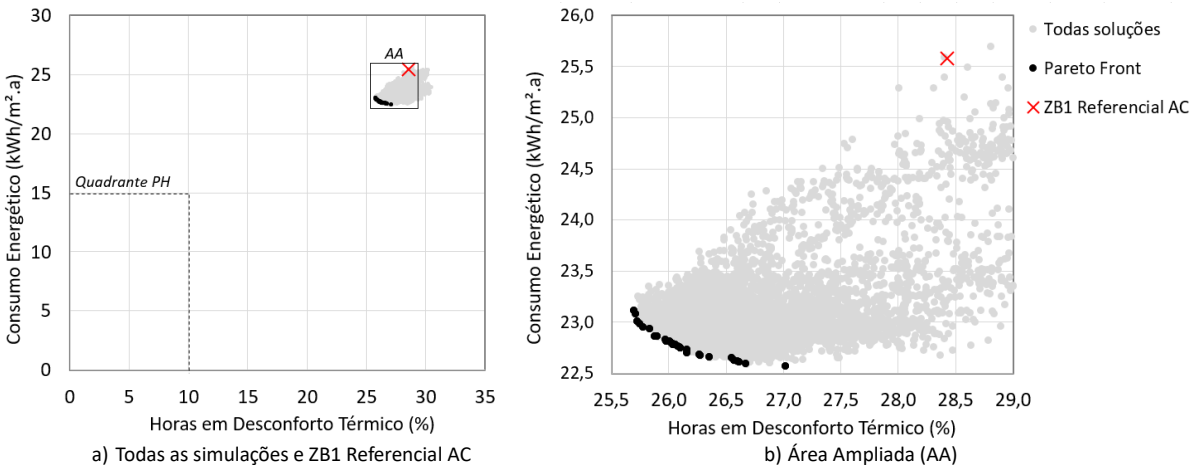
6.4.1 Residência ZB1

Neste item, apresenta-se a otimização de soluções de dimensionamento de janelas e elementos de controle solar externos da Residência ZB1, sem a aplicação do conceito *Passive House* (Residência ZB1 DIM) e em conjunto com a otimização das estratégias PH (Residência ZB1 DIM PH).

- *Residência ZB1 DIM*

A Figura 6-43 contém o gráfico com todas as 10.000 soluções (combinação de parâmetros) obtidas nas otimizações de dimensionamento de janelas e elementos de controle solar para a Residência ZB1, além de tratar do resultado da simulação da Residência ZB1 Referencial AC. Todas as soluções contidas no Quadrante PH, representado na Figura 6-43a, atingem os critérios de desempenho mínimo definidos pela *Passive House* para clima quente, ou seja, o consumo individual para refrigeração e aquecimento nesse caso não ultrapassa 15 kWh/m².a, assim como é respeitado o sobreaquecimento máximo de 10% das horas do ano. Na Figura 6-43b, destaca-se a definição do *Pareto Front* na Área Ampliada (AA).

Figura 6-43: Resultados das simulações para otimização do dimensionamento das janelas e elementos de controle solar externos: Residência ZB1 DIM.



a) Todas as simulações e ZB1 Referencial AC

b) Área Ampliada (AA)

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Comparando-se os resultados das simulações da Residência Referencial ZB1 AC com os resultados simulados para otimização do dimensionamento das janelas e dos elementos de controle solar externos, é possível verificar uma melhoria no desempenho energético e na diminuição das horas em desconforto térmico em praticamente todas as soluções. Porém, nenhuma solução simulada se encontra no Quadrante PH.

A Tabela 6-32 apresenta o consumo energético para aquecimento (CA), refrigeração (CR) e o percentual de temperaturas em desconforto por frio (abaixo dos 20°C) e por sobreaquecimento (superior aos 26°C) para a solução definida pelo Ponto Médio do *Pareto Front* (PFM), em comparação

com a Residência ZB1 Referencial AC. A solução definida pela abordagem PFM apresenta consumo energético total com condicionamento térmico de 22,79 kWh/m².a e desconforto de 25,94%, enquanto que a edificação Referencial ZB1 AC apresenta um consumo total de 25,6 kWh/m².a e taxa de 28,41% de desconforto.

Tabela 6-32: Consumo energético e desconforto térmico.

Soluções	Sistema de condicionamento térmico	Consumo energético (kWh/m².a)			Desconforto térmico (%)		
		CR	CA	Total	<20 ºC	>26 ºC	Total
ZB1 Referencial AC	AC	2,30	23,30	25,60	26,63	1,78	28,41
DIM (PFM)	AC	2,48	20,31	22,79	24,40	1,55	25,94

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A Tabela 6-33, apresenta o percentual de áreas das janelas relativas as áreas dos ambientes da Residência ZB1, os parâmetros mínimos e máximos utilizados na simulação além da solução de otimização definida pelo Ponto Médio do Pareto Front (PFM). Todos os ambientes apresentam uma redução da dimensão das janelas em comparação com a edificação Referencial AC, o Dorm1 (ZT1) e o Dorm2 (ZT2) apresentaram valores muito próximos aos parâmetros mínimos simulados.

Tabela 6-33: Resultado das dimensões das janelas otimizadas da Residência ZB1 DIM (PFM).

Ambiente	Janela/ Abertura (%)	Edificação Referencial AC		Parâmetros de simulação				PFM	
				Mínimo		Máximo			
		(m²)	(%)	(m²)	(%)	(m²)	(%)	(m²)	(%)
Dorm1 (ZT1)	**PJ-N2** 100%	4,16	35,92	1,68	14,51	8,19	70,73	1,69	14,59
Dorm2 (ZT2)	**PJ-N3** 100%	4,16	35,92	1,68	14,51	8,19	70,73	1,69	14,59
Suíte (ZT3)*	**PJ-N1** 100%	4,16	35,23	1,68	12,70	8,06	145,60	1,89	17,80
	J-S1 0%	1,12		0,22		13,78		0,78	
Estar (ZT4)	**J-S2** 100%	11,05	41,80	4,2	12,57	25,22	59,19	4,27	27,49
	PJ-N4 50%	24,57		6,51		25,22		19,16	
Média			**37,22**		**13,57**		**86,56**		**18,87**

* Cálculo relativo a 15m² (ambiente tem 27,3m²).

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A Tabela 6-34 traz um comparativo entre o percentual de janelas das fachadas definido pela abordagem do ponto Médio *Pareto Front* (PFM), com a ZB1 Referencial AC, e os valores mínimos e máximos simulados. A solução PFM indica uma diminuição do percentual de área de janela, tanto na fachada sul como na fachada norte. Ao norte houve uma redução de aproximadamente 34% da área total de janelas, passando de 59,07% para 38,96%; já ao sul, a diminuição da área total de janelas foi

mais significativa, representando aproximadamente 58%, passando de 24,08% para 9,99% da área da fachada.

Tabela 6-34: Percentual de janelas das fachadas dos ambientes de permanência prolongada pela orientação solar: Residência ZB1 DIM (PFM).

Fachada	Edificação Referencial AC (%)	Parâmetros de simulação		Resultados	
		Mínimo (%)	Máximo (%)	PFM (%)	Variação em relação ao Referencial (%)
Norte[1]	59,07	18,42	79,18	38,96	- 34,06
Sul[2]	24,08	6,94	62,18	9,99	- 58,52
Leste	-	-	-	-	
Oeste		-	-	-	
Média	**41,58**	**13,51**	**78,16**	**24,47**	**-46,29**

[1]Janela: PJ-N1, PJ-N2, PJ-N3, PJN4; [2]Janelas: J-S1, JS2

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Quanto ao dimensionamento dos elementos de proteção solar externos, a solução defendida pela abordagem do Ponto Médio do *Pareto Front* (PFM) foi de 0,28 m, uma redução de 86% da dimensão inicial, conforme apresentado na Tabela 6-35. Isso se justifica pela necessidade de aquecimento dos ambientes interiores, já que em todos os meses do ano são registradas temperaturas abaixo de 20°C em Bento Gonçalves (ver Figura 6-4, item 6.2.3).

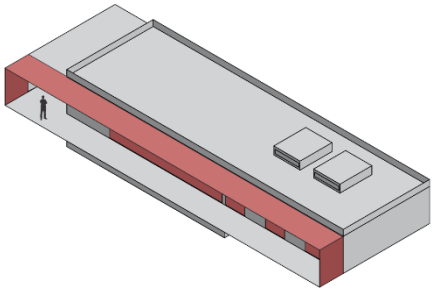
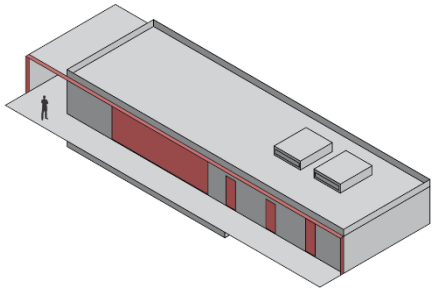
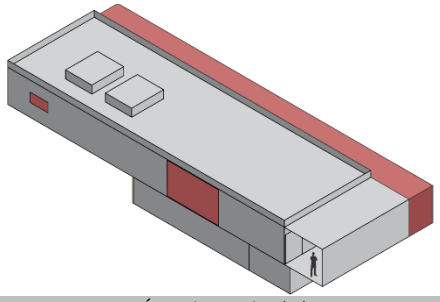
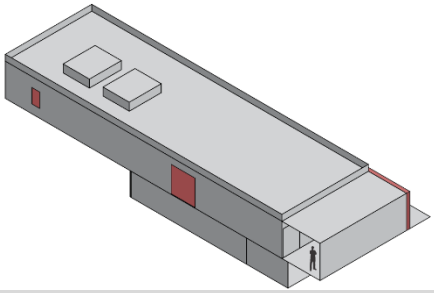
Tabela 6-35: Dimensionamento otimizado dos elementos de proteção solar da Residência ZB1 DIM (PFM).

Fachada	Disposição	Edificação Referencial AC (m)	Parâmetros de simulação: dimensão do elemento (m)		Resultados	
			Mínimo	Máximo	PFM (m)	Variação em relação ao Referencial (%)
Norte/Leste/Oeste	Horizontal/ Vertical	2,00	0,05	2,00	0,28	-86,00

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A Figura 6-44 apresenta o comparativo entre a Residência ZB1 Referencial AC e o resultado de otimização do dimensionamento das aberturas e dos elementos de controle solar externos definidos pela abordagem do Ponto Médio do *Pareto Front* (PFM).

Figura 6-44: Residência ZB1 DIM, percentual de variação do dimensionamento de janelas e elementos de controle solar externos.

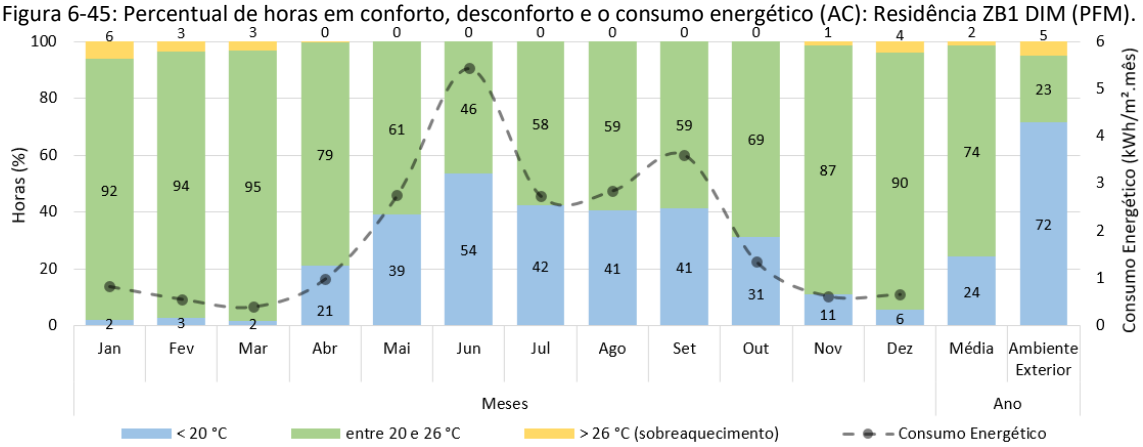
ZB1 Referencial AC*	DIM (PFM)
Isométrica sudeste	
	
Isométrica noroeste	
	
Área de Janelas (%)	-46,3
Dimen. el. controle solar ext. (%)	-86,0

*com janelas unificadas

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

O maior desconforto no caso da solução PFM aconteceu nos períodos de frio, entre maio e setembro, consequentemente, o consumo para condicionamento térmico (AC) dos ambientes foi também maior nesse período, conforme pode ser observado no gráfico da Figura 6-45.

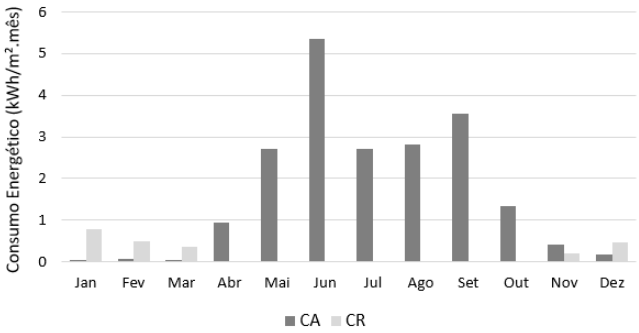
Figura 6-45: Percentual de horas em conforto, desconforto e o consumo energético (AC): Residência ZB1 DIM (PFM).



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

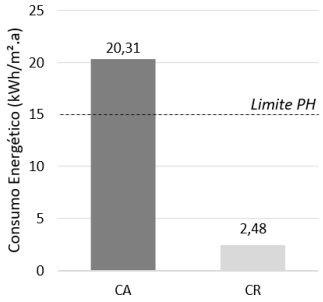
Os gráficos das Figuras 6-46 e 6-47 demonstram que o maior consumo (AC) de aquecimento (CA) do DIM (PFM) da Residência ZB1 foi no mês de junho, enquanto o consumo para refrigeração (CR) foi maior no mês de janeiro. O consumo anual para aquecimento foi aproximadamente dez vezes maior em relação ao consumo de refrigeração, apresentando uma diferença de 17,87 kWh/m².a.

Figura 6-46: Consumo energético mensal (AC) para aquecimento (CA) e refrigeração (CR).



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Figura 6-47: Consumo energético anual (AC) para aquecimento (CA) e refrigeração (CR).



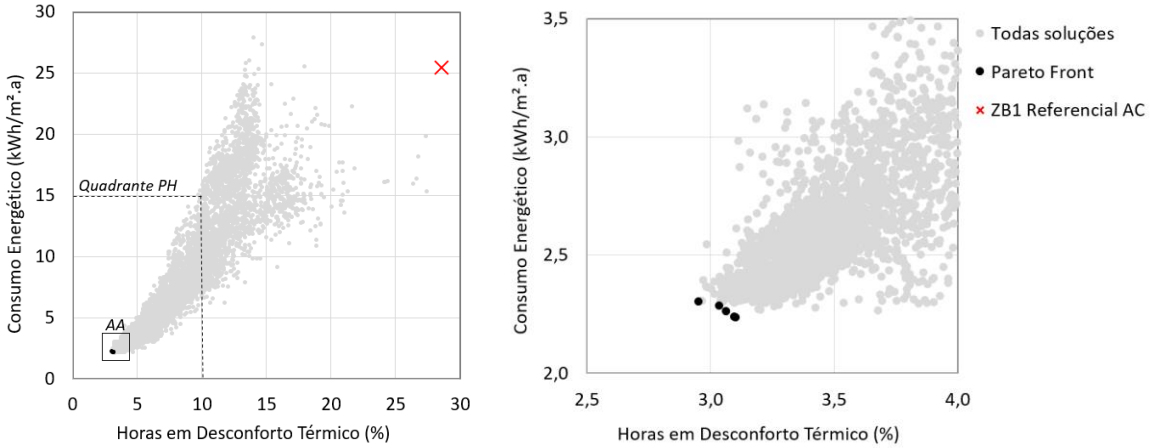
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Os resultados evidenciam que mesmo com a otimização dos elementos de controle solar e das janelas, o consumo energético para aquecimento da edificação continua elevado. Dessa forma, para que se obtenha um projeto ótimo do ponto de vista termoenergético, é necessário intervir na qualificação das tecnologias construtivas.

- *Residência ZB1 DIM PH*

A Figura 6-48 apresenta o gráfico com todos os resultados obtidos nas simulações de dimensionamento de janelas e de elementos de controle solar para a Residência ZB1 com a aplicação do conceito *Passive House,* além de trazer o resultado da simulação da Residência ZB1 Referencial AC. Com a Figura 6-48, verifica-se que um número significativo de soluções fica dentro do Quadrante PH, demonstrando que há milhares de combinações possíveis que alcançam os critérios *Passive House* para clima quente. Note-se que todas as soluções simuladas exibem melhores resultados da relação entre consumo e percentual de desconforto do que a edificação Referencial AC. Na Figura 6-48b, é destacado as soluções do Pareto Front na Área Ampliada (AA).

Figura 6-48: Resultados das simulações para otimização do dimensionamento das janelas e elementos de controle solar externos: Residência ZB1 DIM PH.



a) Todas as simulações e ZB1 Referencial AC

b) Área Ampliada (AA)

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A Tabela 6-36 apresenta os dados de consumo energético para aquecimento (CA) e refrigeração (CR) e o percentual de temperaturas registradas em situação de desconforto por frio e sobreaquecimento. Além disso, a tabela trata da otimização da solução definida pela abordagem do Ponto Médio do *Pareto Front* (PFM), e ainda do ponto mais próximo ao vértice do Quadrante PH (VPH), em comparação com a Residência ZB1 Referencial AC. A solução do PFM apresenta consumo de refrigeração de 1,39 kWh/m².a e aquecimento 0,85 kWh/m².a, bem como uma taxa de sobreaquecimento de 1,81% das horas do ano, enquanto que a solução VPH, mesmo com valores superiores aos encontrados pelo PFM, apresenta um consumo de refrigeração e um sobreaquecimento bem inferiores em relação aos requisitos estabelecidos pelo conceito *Passive House* para climas quentes.

Tabela 6-36: Requisitos de consumo energético e sobreaquecimento para o conceito *Passive House*.

Soluções	**Sistema de condicionamento térmico**	**Consumo energético (kWh/m².a)**			**Desconforto térmico (%)**			**Atende aos requisitos PH?**
		CR	CA	Total	<20 ºC	>26 ºC	Total	
ZB1 Referencial AC	AC	2,30	23,30	25,6	26,63	1,78	28,41	Não
DIM PH (PFM)	MVHR	1,39	0,85	2,24	1,29	1,81	3,10	Sim
DIM PH (VPH)	MVHR	2,25	12,79	15,04	8,31	2,31	10,61	Sim

Legenda: Valores não atendidos pelo Conceito *Passive House* para climas quentes

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A Tabela 6-37 apresenta os resultados das soluções das estratégias *Passive House* definidas pelo Ponto Médio do *Pareto Front* (PFM) e pelo ponto próximo ao vértice do Quadrante (VPH). De uma forma geral, há uma diminuição considerável da espessura do isolamento térmico dos fechamentos opacos e um aumento da transmitância das janelas da solução PFM para a solução VPH. Enquanto que a solução VPH especifica espessuras de isolamento entre 0,05 e 0,08 m, a solução PFM utiliza espessuras de 0,04 a 0,15 m. Nos dois casos, a relação entre a maior espessura de isolamento térmico e a menor transmitância é da cobertura, ao passo que a menor espessura e a maior transmitância dizem respeito à laje do piso. A melhor solução, o PFM, utilizou o vidro Duplo/PH em todas as fachadas, apresentando um menor valor de infiltração (0,0185 h^{-1}), uma maior renovação (0,74 h^{-1}) e um valor de *Bypass* equivalente a 1,29 h^{-1}. A eficiência da ventilação mecânica com recuperador é de 95% para a solução PFM e de 81% para a solução VPH.

Tabela 6-37: Resultados das soluções *Passive House* para a Residência ZB1 DIM PH (PFM e VPH).

Estratégias *Passive House*	**Especificação do parâmetro**	**PFM**		**VPH**	
		e*	U**	e*	U**
Isolamento	Cobertura	0,15	0,14	0,12	0,17
	Laje do Piso	0,04	0,58	0,05	0,48
	Fachada Norte	0,14	0,17	0,12	0,19
	Fachada Sul	0,15	0,16	0,08	0,27
	Fachada Leste	0,15	0,16	0,05	0,38
	Fachada Oeste	0,15	0,17	0,06	0,39
Janela Eficiente	Fachada Norte	Vidro Duplo/PH		Vidro Laminado	
	Fachada Sul	Vidro Duplo/PH		Vidro Laminado	
	Fachada Leste	Vidro Duplo/PH		Vidro Duplo/PH	
Estanqueidade	Infiltração (h^{-1})	0,0185		0,031	
Ventilação Mecânica com Recuperador de Calor (MVHR)	Renovação de ar (h^{-1})	0,74		0,61	
	Bypass (h^{-1})	1,29		1,02	
	Eficiência (%)	95		81	
	Tipo	Corrente cruzada		Corrente cruzada	

*e = espessura (m); **U = transmitância (W/(m².°C))

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A Tabela 6-38 traz um comparativo entre o percentual de área das janelas em relação à área total dos ambientes da Residência ZB1 Referencial AC, bem como demonstra o dimensionamento utilizado como parâmetro de simulação e o resultado da solução do ponto Médio do *Pareto Front* (PFM) e da solução mais próxima ao vértice do Quadrante (VPH). O percentual de janelas da solução PFM é menor do que da edificação Referencial AC, passando de 37,22 para 18,20%; o índice do VPH é ligeiramente maior, chegando a 39,48%.

Tabela 6-38: Resultado das dimensões das janelas otimizadas da Residência ZB1 DIM PH (PFM e VPH).

Ambiente	**Janela/ Abertura (%)**	**Edificação Referencial AC**		**Parâmetros de simulação**				**Resultado**			
				Mínimo		**Máximo**		**DIM PH (PFM)**		**DIM PH (VPH)**	
		(m²)	**(%)**	**(m²)**	**(%)**	**(m²)**	**(%)**	(m²)	(%)	(m²)	(%)
Dorm1 (ZT1)	**PJ-N2** 100%	4,16	35,92	1,68	14,51	8,19	70,73	1,72	14,85	4,48	38,69
Dorm2 (ZT2)	**PJ-N-** 100%	4,16	35,92	1,68	14,51	8,19	70,73	1,83	15,80	3,24	27,98
Suíte (ZT3)*	**PJ-N1** 100% **J-S1** 0%	4,16 1,12	35,23	1,68 0,22	12,70	8,06 13,78	145,60	3,86 0,44	28,67	3,78 5,3	60,53
Estar (ZT4)	**J-S2** 100% **PJ-N4** 50%	11,05 24,57	41,80	4,2 6,51	12,57	25,22 25,22	59,19	4,42 7,05	13,46	12,19 13,98	30,71
Médio			**37,22**		**13,57**		**86,56**		**18,20**		**39,48**

* Cálculo relativo a 15m² (ambiente tem 27,3m²).

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A Tabela 6-39 apresenta um comparativo entre o percentual de área de janela das fachadas das soluções PFM e VPH em relação à Residência ZB1 Referencial AC e os valores mínimos e máximos simulados. As soluções PFM e VPH apresentam uma redução considerável da área de janela, sendo que o PFM passa por uma redução média de 60%, aproximadamente, enquanto que o VPH reduz a área por volta de 45%. Os resultados demonstram que o melhor desempenho energético está associado, nesse caso, à diminuição da área de janela; isso ocorre porque a diminuição das janelas representa uma maior área de isolamento térmico proporcionado pelos fechamentos opacos, o que auxilia na manutenção das temperaturas internas e diminui o consumo energético com condicionamento térmico (MVHR). Porém, é preciso levar em consideração que o consumo energético e o conforto térmico estão associados também ao dimensionamento dos elementos de controle solar externos e às estratégias do conceito *Passive House*. Neste estudo, buscou-se precisamente uma combinação de ambas essas estratégias.

Tabela 6-39: Percentual de janelas das fachadas dos ambientes de permanência prolongada pela orientação solar: Residência ZB1 DIM PH (PFM e VPH).

Fachada	Edificação Referencial AC	Parâmetros de simulação		Resultados			
		Mínimo	Máximo	PFM	Variação em relação ao Referencial	VPH	Variação em relação ao Referencial
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Norte[1]	59,07	18,42	79,18	23,06	- 60,97	40,64	-31,23
Sul[2]	24,08	6,94	62,18	9,61	- 60,08	9,61	-60,08
Leste	-	-		-	-	-	-
Oeste	-	-		-		-	-
Média				16,34	-60,53	25,12	-45,66

[1] Janelas: PJ-N1, PJ-N2, PJ-N3, PJN4; [2] Janelas: J-S1, JS2

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Quanto ao dimensionamento dos elementos de proteção solar externos, a solução PFM teve uma redução de 47,5%, ao passo que o VPH passou por uma redução de 67,0%, conforme apresentado na Tabela 6-40. Todos os meses do ano registram temperatura abaixo de 20°C em Bento Gonçalves (ver Figura 6-4, item 6.2.3), justificando, assim, a diminuição do elemento de controle solar horizontal na fachada norte haja vista a necessidade que os ambientes exibem em obter maior aquecimento através da radiação solar. Com o conceito *Passive House*, nos dois casos analisados, ou seja, as soluções PFM e VPH, a redução dos elementos de controle solar externos foi menos expressiva, 47,5 e 67,0%, do que na otimização do dimensionamento sem o conceito *Passive House*, que foi de 86%. Sem o conceito *Passive House*, a redução dos elementos de controle solar externos foi mais elevada para permitir maior aproveitamento da radiação solar para aquecer os ambientes interiores já que essa solução não conta com isolamento térmico dos fechamentos opacos.

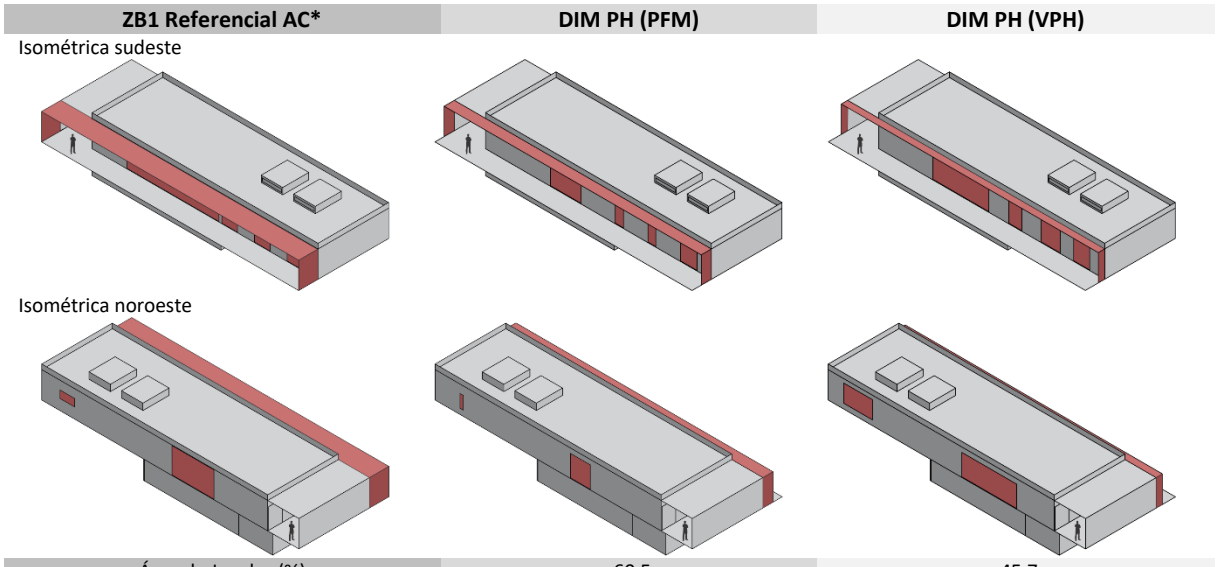
Tabela 6-40: Dimensionamento otimizado dos elementos de proteção solar da Residência ZB1 DIM PH (PFM e VPH).

Fachada	Disposição	Edificação Referencial AC	Parâmetros de simulação: dimensão do elemento (m)		Resultados			
					PFM	Variação em relação ao Referencial	VPH	Variação em relação ao Referencial
		(m)	Mínimo	Máximo	(m)	(%)	(m)	(%)
Norte/Leste /Oeste	Horizontal/ Vertical	2,00	0,05	2,00	1,05	-47,5	0,66	-67,0

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A Figura 6-49 apresenta os modelos da Residência ZB1 AC em comparação com as soluções de dimensionamento de janelas e de elementos de proteção externas das soluções PFM e VPH, com aplicação do conceito *Passive House*. As duas soluções analisadas conduziram a uma redução na área de janelas e no dimensionamento dos elementos de controle solar externos. Esse resultado demonstra a necessidade de diminuir as perdas de calor internas da edificação com o auxílio desses componentes, ao mesmo tempo em que deve-se buscar o aquecimento dos ambientes internos por meio da redução da área de sombreamento para a recepção de uma quantidade de radiação solar maior. A solução também é mais econômica do que a edificação referencial, uma vez que as janelas são os elementos mais caros (por m^2) em relação aos fechamentos opacos, por mais isolada que seja.

Figura 6-49: Residência ZB1 DIM PH, percentual de variação do dimensionamento de janelas e elementos de controle solar externos.

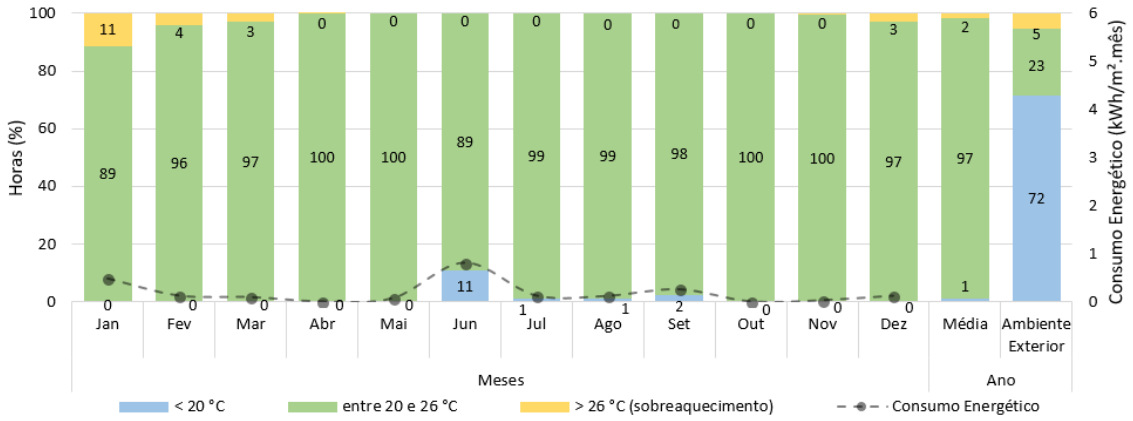


*Possui as janelas unificadas

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Analisando a solução PFM, verifica-se que o período de maior desconforto ocorre em janeiro e em junho, sendo 11% de desconforto por sobreaquecimento em janeiro e 11% desconforto por frio em junho. Da mesma forma, o consumo para condicionamento térmico (MVHR) dos ambientes interiores foi maior nos meses de janeiro e junho, conforme apresentado na Figura 6-50.

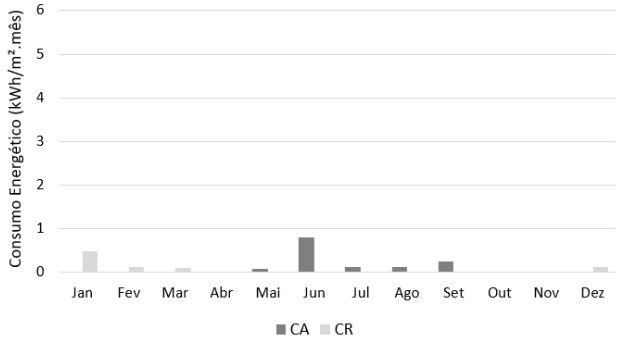
Figura 6-50: Percentual de horas em conforto, desconforto e o consumo energético (MVHR): Residência ZB1 DIM PH (PFM).



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

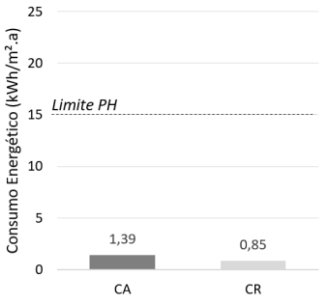
Na solução PFM, o consumo para refrigeração (CR) foi maior em janeiro, enquanto que o consumo para aquecimento (CA) foi maior em junho, conforme é apresentado na Figura 6-51. Mesmo com a diminuição das janelas e dos elementos de controle solar externos, o consumo para o aquecimento (1,39 kWh/m².a) foi maior do que o para refrigeração (0,85 kWh/m².a) (Figura 6-52).

Figura 6-51: Consumo energético mensal (MVHR) para aquecimento (CA) e refrigeração (CR).



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Figura 6-52: Consumo energético anual (MVHR) para aquecimento (CA) e refrigeração (CR).



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Os resultados demonstram que com a otimização das estratégias do conceito *Passive House* em conjunto com o dimensionamento das janelas e dos elementos de controle solar externos, obtém-se um desempenho termoenergético muito elevado. Com essa solução, o conforto térmico anual é de 97% e o consumo energético total é menor do que 3 kWh/m².a, muito inferior aos valores máximos estabelecidos pelo conceito *Passive House* para clima quente.

6.4.2 Residência ZB2

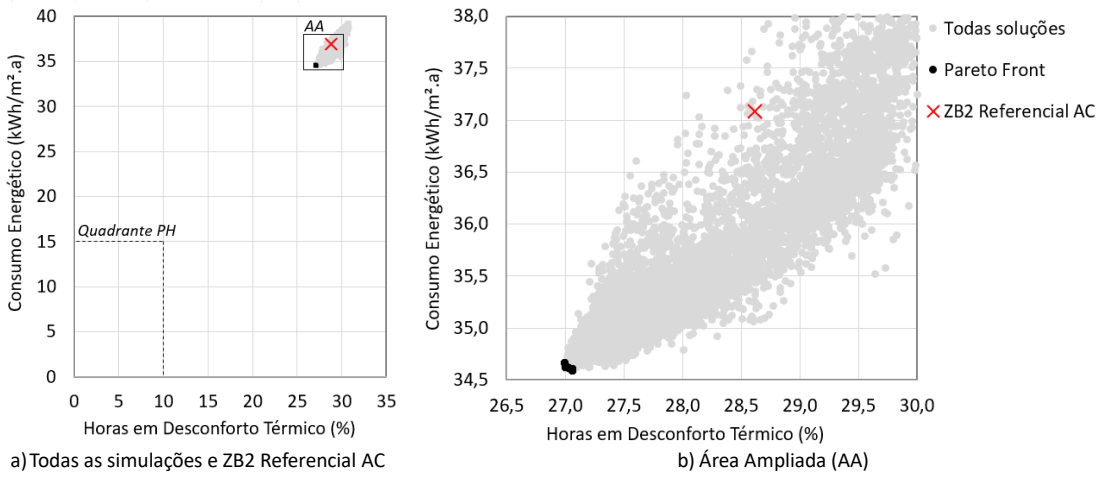
Neste item, apresenta-se a otimização de soluções de dimensionamento de janelas e elementos de controle solar externos da Residência ZB2, sem a aplicação do conceito *Passive House* (Residência ZB2

DIM), e em conjunto com a otimização das estratégias PH com ventilação híbrida, ou seja, com o sistema MVHR juntamente com ventilação natural (Residência ZB2 DIM PH VN).

- Residência ZB2 DIM

Conforme apresentado na Figura 6-53, embora muitas das soluções para a otimização de dimensionamento de janelas e elementos de controle solar externos sem o conceito *Passive House* tenham apresentado melhor desempenho termoenergético do que a edificação ZB2 Referencial AC, nenhuma solução ficou dentro do Quadrante PH.

Figura 6-53: Resultados das simulações para otimização do dimensionamento das janelas e elementos de controle solar externos: Residência ZB2 DIM.



a) Todas as simulações e ZB2 Referencial AC

b) Área Ampliada (AA)

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A solução PFM obteve um consumo energético de condicionamento térmico total inferior ao modelo referencial, de aproximadamente 2,5 kWh/m².a, e também apresentou uma redução no desconforto total de aproximadamente 1,6%, conforme pode ser verificado na Tabela 6-41.

Tabela 6-41: Consumo energético e desconforto.

Soluções	**Sistema de condicionamento térmico**	**Consumo energético (kWh/m².a)**			**Desconforto térmico (%)**		
		CR	CA	Total	<20 ºC	>26 ºC	Total
ZB2 Referencial AC	AC	16,40	20,70	37,10	16,68	11,92	28,60
DIM (PFM)	AC	14,37	20,25	34,62	17,49	9,45	26,93

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A Tabela 6-42 demonstra que na solução PFM, todas as janelas dos ambientes foram reduzidas em relação à edificação Referencial AC. O dimensionamento das janelas foi muito próximo dos parâmetros mínimos simulados, sendo que apenas duas janelas não tiveram sua dimensão reduzida na totalidade permitida pela simulação, a J-N1 e a J-N2.

Tabela 6-42: Resultado das dimensões das janelas otimizadas da Residência ZB2 DIM (PFM).

Ambiente/ Área	Janela/ Abertura (%)	Edificação Referencial AC		Parâmetros de simulação				Resultado	
				Mínima		Máxima		PFM	
		(m²)	(%)	(m²)	(%)	(m²)	(%)	(m²)	(%)
Dorm1 (ZT1) 12,38 m²	**PJ-N5** (50%)	2,56	20,36	2,1	16,96	6,46	52,18	2,1	16,96
Dorm2 (ZT2) 12,23m²	**PJ-N4** (50%)	2,52	20,61	1,96	16,03	9,28	75,84	1,96	16,03
Dorm3 (ZT3) 12,91m²	**J-S1** (50%)	2,52	19,52	2,1	16,27	4,25	16,27	2,1	16,27
Suíte (ZT4) 11,04m²	**JN-3** (50%)	2,52	22,83	1,82	16,49	7,95	16,49	1,82	16,49
Estar (ZT5) 47,47m²	**J-N1** (50%)	2,28	49,78	1,33	16,12	4,77	77,72	1,69	18,05
	J-N2 (50%)	3,23		1,52		7,42		2,08	
	J-L1 (50%)	12,36		2,40		13,91		2,40	
	PJ-O1 (50%)	5,76		2,40		10,8		2,40	
Média			**33,27**		**20,46**		**59,62**		**20,93**

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A Tabela 6-43 apresenta os dados de uma redução média de 45,44% no dimensionamento das janelas por orientação solar, sendo as maiores reduções nas fachadas leste e oeste, atingindo, aproximadamente, 80 e 60%, respectivamente.

Tabela 6-43: Percentual de janelas das fachadas dos ambientes de permanência prolongada pela orientação solar: Residência ZB2 DIM (PFM).

Fachada	Edificação Referencial AC	Parâmetros de simulação		Resultado	
		Mínimo	Máximo	PFM	Variação em relação ao Referencial
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Norte[1]	27,27	18,21	74,85	20,13	-26,17
Sul[2]	34,05	28,38	57,43	28,38	-16,67
Leste[3]	29,93	5,81	33,67	5,81	-80,58
Oeste[4]	27,39	11,41	51,36	11,41	-58,33
Média	29,66	15,95	54,33	16,43	-45,44

[1]janela: J-N1, J-N2, J-N3, J-N4, J-N5; [2]janelas: J-S1; [3]janelas: J-L1; [4]Janelas: PJ-O1

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Quanto ao dimensionamento dos elementos de proteção solar externos, a solução PFM foi de 0,71 m para o brise horizontal do pavimento superior, 1,5 m para o brise do pavimento inferior e 3,2 m para o brise horizontal/vertical da fachada oeste, conforme é apresentado na Tabela 6-44. Em média, os elementos de controle solar externos tiveram um aumento de 82,44%.

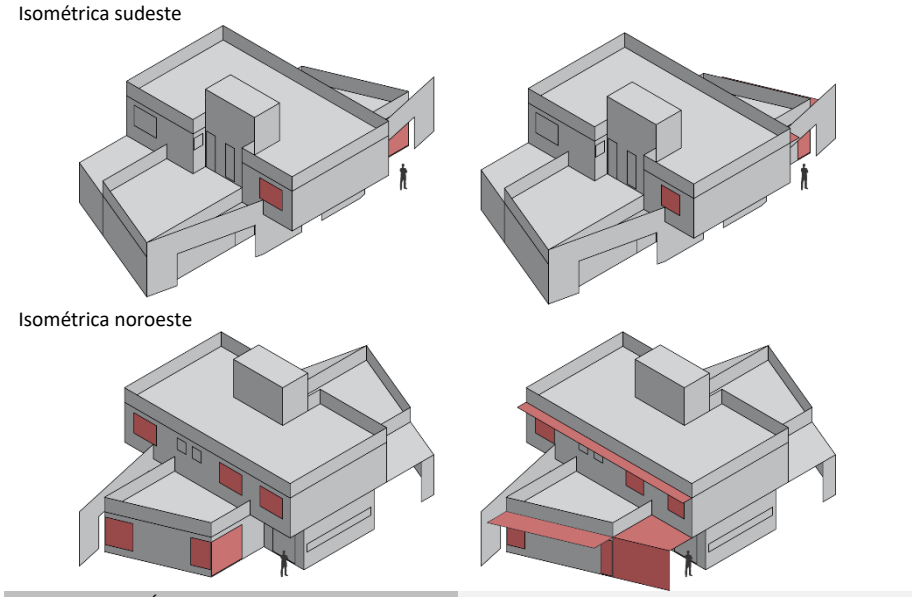
Tabela 6-44: Dimensionamento otimizado dos elementos de proteção solar da Residência ZB2 DIM (PFM).

Fachada	Disposição	Edificação Referencial AC	Parâmetros de simulação: dimensão do elemento (m)		Resultado	
					PFM	Variação em relação ao mínimo
		(m)	Mínima	Máxima	(m)	(%)
Norte	a. Horizontal (Pav. Sup.)	0,00	0,05	1,50	0,71	47,33
	b. Horizontal (Pav. Inf.)	0,00	0,05	1,50	1,50	100,00
Oeste	c. Horizontal/vertical	0,00	0,05	3,20	3,20	100,00
Média						82,44

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A Figura 6-54 apresenta o modelo da Residência ZB2 Referencial AC em comparação com as soluções de dimensionamento de janelas e de elementos de proteção externos do PFM. Considerando-se a diminuição percentual das janelas e a necessidade de se utilizar elementos de controle solar externos, percebe-se que é preciso evitar as trocas de calor provocadas pelos fechamentos transparentes, ao mesmo tempo em que é essencial um maior sombreamento para evitar o consumo energético (AC) e o desconforto térmico dos períodos de maior temperatura.

Figura 6-54: Residência ZB2 DIM, percentual de variação do dimensionamento de janelas e elementos de controle solar externos.



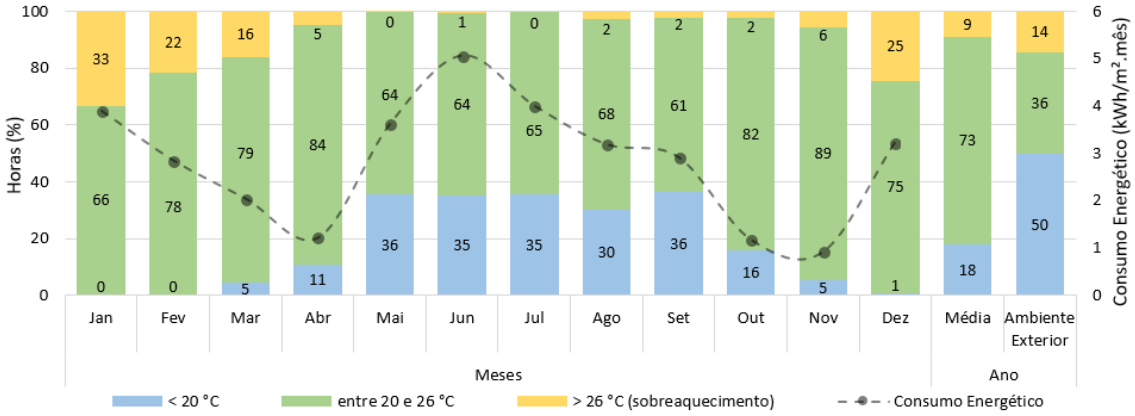
*não apresenta os elementos de controle solar externos simulados.

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Conforme verificado no gráfico da Figura 6-55, a fase de maior desconforto aconteceu nos períodos de frio, entre maio e setembro, atingindo um percentual de 36%. Da mesma forma, o consumo para condicionamento térmico (AC) dos ambientes também foi maior entre esses meses. Na média anual,

a taxa de desconforto por frio (17%) é praticamente o dobro da verificada para o desconforto por sobreaquecimento (9%).

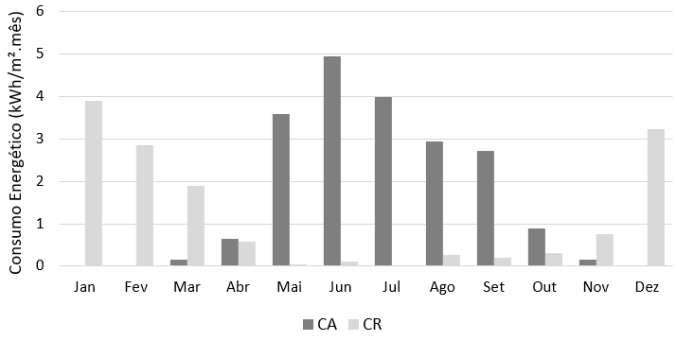
Figura 6-55: Percentual de horas em conforto, desconforto e o consumo energético (AC): Residência ZB2 DIM (PFM).



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

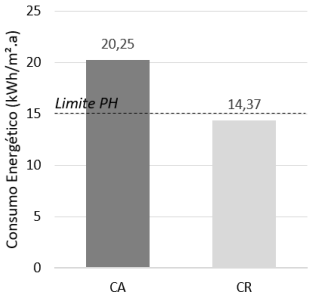
A Figura 6-56 demonstra que o consumo de aquecimento (CA) foi maior nos meses de maio a setembro, quando o desconforto interno, com temperaturas abaixo dos 20°C, era elevado. O consumo de refrigeração (CR) foi mais elevado entre os meses de dezembro e março, período no qual o desconforto por sobreaquecimento é maior. Em geral, o consumo anual com aquecimento é maior do que o com refrigeração, 20,25 kWh/m².a e 14,37 kWh/m².a, respectivamente, conforme pode ser observado na Figura 6-57.

Figura 6-56: Consumo energético mensal (AC) para aquecimento (CA) e refrigeração (CR).



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Figura 6-57: Consumo energético anual (AC) para aquecimento (CA) e refrigeração (CR).



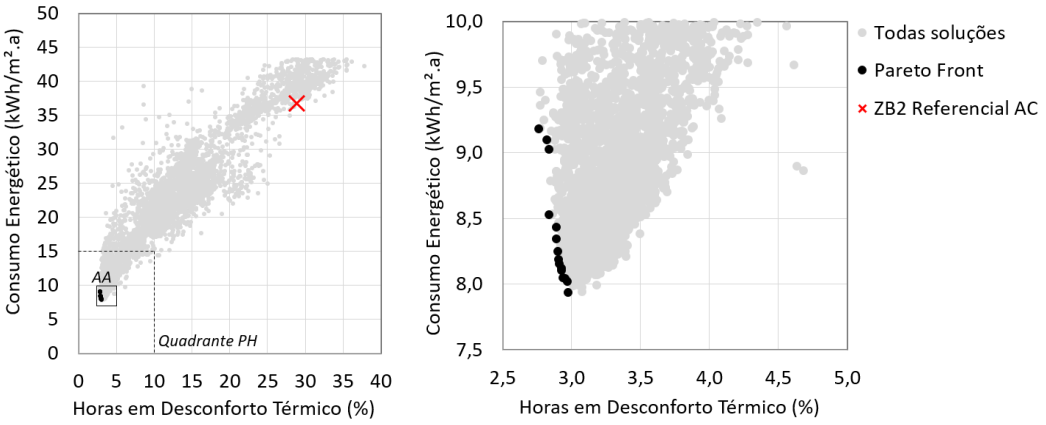
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Apesar da diminuição do consumo energético e do desconforto térmico da Residência ZB2 DIM, é notório que para se obter um projeto ótimo do ponto de vista termoenergético é necessário ir além da otimização das dimensões das janelas e dos elementos de controle solar. É essencial intervir, também, no projeto arquitetônico tendo-se em vista a qualificação das tecnologias construtivas vigentes.

- Residência ZB2 DIM PH VN

As soluções de otimização do dimensionamento das janelas e dos elementos de controle solar externos, em conjunto com as estratégias do conceito PH com ventilação natural (ventilação híbrida), para a Residência ZB2, apresentam um número variado de soluções no interior do Quadrante PH, conforme pode-se verificar nos gráficos da Figura 6-58.

Figura 6-58: Resultados das simulações para otimização do dimensionamento das janelas e elementos de controle solar externos: Residência ZB2 DIM PH VN.



a) Todas as simulações e ZB2 Referencial AC b) Área Ampliada (AA)

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A solução PFM apresenta um consumo total de condicionamento térmico de 8,19 kWh/m².a e um desconforto total de 2,90%, enquanto que a VPH tem um consumo total de 14,97 kWh/m².a e um desconforto total de 9,48%, conforme apresentado na Tabela 6-45.

Tabela 6-45: Requisitos de consumo energético e sobreaquecimento para o conceito *Passive House*.

Soluções	**Sistema de condicionamento térmico**	**Consumo energético (kWh/m².a)**			**Desconforto térmico (%)**			**Atende aos requisitos PH?**
		CR	CA	Total	<20 °C	>26 °C	Total	
ZB2 Referencial AC	AC	16,40	20,70	37,10	16,68	11,92	28,6	Não
DIM PH VN (PFM)	MVHR	5,79	2,40	8,19	0,48	2,42	2,90	Sim
DIM PH VN (VPH)	MVHR	12,40	2,57	14,97	0,56	8,92	9,48	Sim

Legenda: Valores não atendidos pelo Conceito *Passive House* para climas quentes

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A Tabela 6-46 retrata as temperaturas para abertura das janelas nas estações quentes e frias do ano. Nas duas soluções, PFM e VPH, o melhor desempenho termoenergético com a ventilação híbrida, sistema MVHR com ventilação natural, acontece com a abertura das janelas sob uma temperatura mais elevada nas estações frias. Na solução com melhor desempenho termoenergético, a PFM, as janelas são abertas aos 22,4°C nas estações quentes, e a 22,9°C nas estações frias.

Tabela 6-46: Abertura de janelas.

Soluções	Parâmetro	Temperatura para abertura de janela (ºC)		
		Estações Quentes*	Estações Frias*	Média
DIM PH VN (PFM)	21 e 30ºC	22,4	22,9	22,7
DIM PH VN (VPH)		22,9	28,7	25,8
Média		22,7	25,8	24,3

* estações frias: entre os equinócios de outono (21/03) e primavera (21/09); estações quentes: entre os equinócios de primavera (21/09) e outono (21/03).

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Conforme verificado na Tabela 6-47, a solução PFM teve espessuras de isolamento térmico dos fechamentos opacos superiores e transmitância das janelas inferiores ao VPH. A espessura do isolamento térmico do PFM variou de 0,09 a 0,15 m e do VPH de 0,03 a 0,11 m. Nos dois casos, as menores transmitâncias foram da cobertura, as intermediárias das paredes externas e as maiores foram da laje do piso. A melhor solução, a PFM, utilizou o vidro Duplo PVC em todas as fachadas; e a eficiência da ventilação mecânica do recuperador de calor do PFM e do VPH foi superior a 90% nos dois casos. Os valores de *Bypass* e de renovação do ar foram praticamente iguais nas duas soluções.

Tabela 6-47: Resultados das soluções *Passive House* para a Residência ZB2 DIM PH VN (PFM e VPH).

Estratégias *Passive House*		**Especificação do parâmetro**	**PFM**		**VPH**	
			e*	U**	e*	U**
	Isolamento	Cobertura/Terraço	0,15	0,14/0,17	0,09	0,2/0,27
		Laje do Piso	0,11	0,23	0,05	0,48
		Fachada Norte	0,09	0,24	0,11	0,21
		Fachada Sul	0,12	0,19	0,08	0,27
		Fachada Leste	0,14	0,17	0,13	0,18
		Fachada Oeste	0,10	0,22	0,03	0,53
		Parede Sul Interna	0,11	0,23	0,10	0,25
	Janela Eficiente	Fachada Norte	Duplo PVC		Duplo PVC	
		Fachada Sul	Duplo PVC		Duplo PVC	
		Fachada Leste	Duplo PVC		Duplo PVC	
		Fachada Oeste	Duplo PVC		Laminado	
	Estanqueidade	Infiltração (h^{-1})	0,040		0,037	
	Ventilação Mecânica com Recuperador de Calor (MVHR)	Renovação de ar (h^{-1})	0,56		0,57	
		Bypass (h^{-1})	1,38		1,38	
		Eficiência (%)	93		90	
		Tipo	Corrente cruzada		Corrente cruzada	

*e = espessura (m); **U = transmitância (W/(m².°C))

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Conforme apresentado na Tabela 6-48, em comparação com a edificação Referencial AC, a solução PFM apresentou uma maior redução no dimensionamento das janelas dos ambientes (quatro entre cinco ambientes passaram por diminuição); enquanto que a solução VPH, embora não tenha um ajuste

de janelas próximo aos parâmetros máximos, apresentou um aumento do dimensionamento das janelas em quatro dos cinco ambientes.

Tabela 6-48: Resultado das dimensões das janelas otimizadas da Residência ZB2 DIM PH VN (PFM e VPH).

Ambiente/ Área	Janela/ Abertura (%)	Edificação Referencial AC		Parâmetros de simulação				Resultados			
				Mínimo		Máxima		PFM		VPH	
		(m²)	(%)	(m²)	(%)	(m²)	(%)	(m²)	(%)	(m²)	(%)
Dorm1 (ZT1) 12,38 m²	**PJ-N5** (50%)	2,56	20,36	2,1	16,96	6,46	52,18	2,57	20,76	4,86	39,26
Dorm2 (ZT2) 12,23m²	**PJ-N4** (50%)	2,52	20,61	1,96	16,03	9,28	75,84	2,34	19,13	3,53	28,06
Dorm3 (ZT3) 12,91m²	**J-S1** (50%)	2,52	19,52	2,1	16,27	4,25	32,92	2,18	16,89	3,23	25,02
Suíte (ZT4) 11,04m²	**JN-3** (50%)	2,52	22,83	1,82	16,49	7,95	72,01	2,3	20,83	3,27	29,62
Estar (ZT5) 47,47m²	**J-N1** (50%)	2,28	49,78	1,33	16,12	4,77	77,72	1,78	21,34	3,24	38,26
	J-N2 (50%)	3,23		1,52		7,42		3,3		6,19	
	J-L1 (50%)	12,36		2,40		13,91		2,56		3,35	
	PJ-O1 (50%)	5,76		2,40		10,8		2,49		5,38	
Média			**33,27**		**20,46**		**59,62**		**24,74**		**40,25**

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Quanto ao dimensionamento de janelas com relação a orientação solar, a Tabela 6-49 demonstra que houve uma diminuição média de janelas de 38,88% na solução PFM e de 10,34% na VPH. Nos dois casos, o maior percentual de redução foi na fachada leste-oeste, com uma diminuição superior a 70% na fachada leste e maior do que 55% na fachada oeste. Na solução do VPH, houve um aumento de 61,36% das janelas ao norte e de 28,17% das janelas ao sul.

Tabela 6-49: Percentual de janelas das fachadas dos ambientes de permanência prolongada pela orientação solar: Residência ZB2 DIM PH VN (PFM e VPH).

Fachada	Edificação Referencial AC	Parâmetros de simulação		Resultados			
		Mín.	Máx.	PFM	Variação em relação ao Referencial	VPH	Variação em relação ao Referencial
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Norte[1]	27,27	18,21	74,85	25,64	-5,97	44,00	+61,36
Sul[2]	34,05	28,38	57,43	29,46	-13,49	43,65	+28,17
Leste[3]	29,93	5,81	33,67	6,20	-79,29	8,11	-72,90
Oeste[4]	27,39	11,41	51,36	11,84	-56,77	11,51	-57,99
Média	29,66	15,95	54,33	18,28	-38,88	26,90	-10,34

[1]Janelas: J-N1, J-N2, J-N3, J-N4, J-N5; [2]Janelas: J-S1; [3]Janelas: J-L1; [4]Janelas: PJ-O1

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

As duas soluções passaram por um aumento significativo das dimensões dos elementos de controle solar externos, conforme é apresentado na Tabela 6-50. O PFM teve um aumento que variou entre 90 e 100%, enquanto o VPH teve um aumento entre 56 e 77%, aproximadamente.

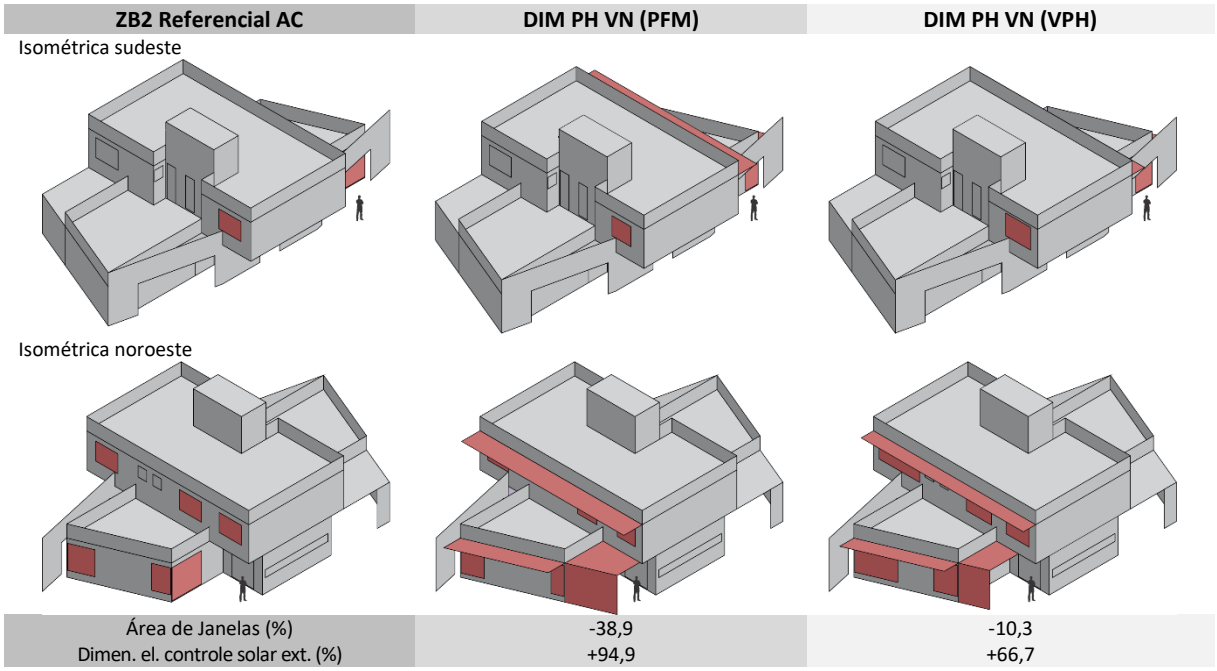
Tabela 6-50: Dimensionamento otimizado dos elementos de proteção solar da Residência ZB2 DIM PH VN (PFM e VPH).

Fachada	Disposição	Edificação Referencial AC	Parâmetros de simulação: dimensão do elemento (m)		Resultado			
					PFM	Variação em relação ao Referencial	VPH	Variação em relação ao Referencial
		(m)	Mín.	Máx.	(m)	(%)	(m)	(%)
Norte	a. Horizontal (Pav. Sup.)	0,00	0,05	1,50	1,50	+100,00	1,00	+66,70
	b. Horizontal (Pav. Inf.)	0,00	0,05	1,50	1,36	+90,70	1,16	+77,33
Norte/Oeste	c. Horizontal/vertical	0,00	0,05	3,20	3,01	+94,10	1,8	+56,25
Média						+94,94		+66,67

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A Figura 6-59 apresenta o modelo da Residência ZB2 Referencial AC em comparação com o PFM e o VPH, com as soluções de dimensionamento de janelas e elementos de controle solar externos em conjunto com o conceito *Passive House*. O menor consumo energético e o menor nível de desconforto foram alcançados pela solução com maior diminuição do dimensionamento das janelas e maior aumento dos elementos de controle solar, a solução PFM. Nesse caso, o maior isolamento térmico proporcionado pelo aumento dos fechamentos opacos (diminuição das janelas) e a maior proteção contra os raios solares, resultante do aumento dos elementos de controle solar externos, conduziram a um melhor desempenho termoenergético.

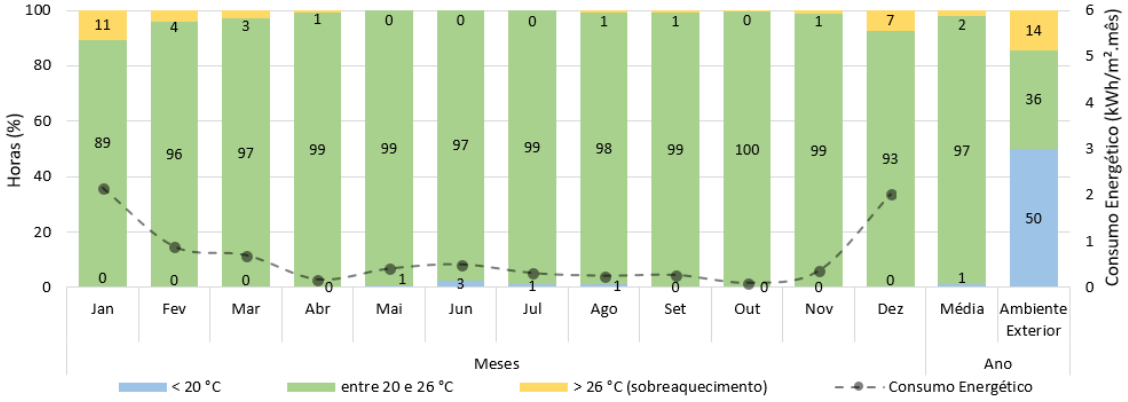
Figura 6-59: Residência ZB2 DIM PH VN, percentual de variação do dimensionamento de janelas e elementos de controle solar externos.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

O período com maior desconforto da solução PFM estendeu-se de dezembro a janeiro, com sobreaquecimento de 7 e 11%, respectivamente. O maior consumo com condicionamento térmico também foi em janeiro e dezembro, conforme apresentado no gráfico da Figura 6-60.

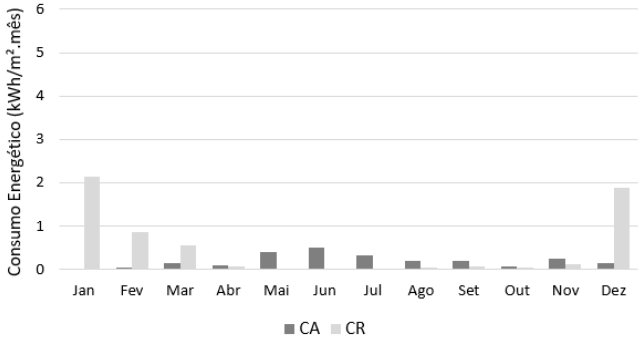
Figura 6-60: Percentual de horas em conforto, desconforto e o cons. energético (MVHR): Residência ZB2 DIM PH VN (PFM).



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

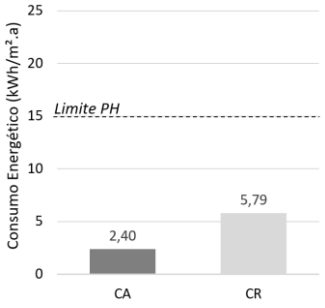
Conforme apresentado nos gráficos das Figuras 6-61 e 6-62, mesmo com o aumento da proteção contra a radiação solar proporcionada pela maior dimensão dos elementos de controle solar, o consumo energético (MVHR) para refrigeração (CR) foi maior do que o de aquecimento (CA), tendo seus maiores valores anotados nos meses entre dezembro e março, ao passo que os maiores índices de aquecimento ocorreram entre abril e novembro.

Figura 6-61: Consumo energético mensal (MVHR) para aquecimento (CA) e refrigeração (CR).



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Figura 6-62: Consumo energético anual (MVHR) para aquecimento (CA) e refrigeração (CR).



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Os resultados apresentados demonstram que com a otimização das estratégias do conceito *Passive House*, em conjunto com o dimensionamento das janelas e a inserção de elementos de controle solar externos, é possível alcançar um desempenho termoenergético muito elevado. Com essa solução, a Residência ZB2 apresenta um conforto térmico em 97% das horas do ano e um consumo energético anual menor do que 10 kWh/m².a, muito inferior ao limite máximo estabelecido pelo conceito *Passive House* para climas quentes.

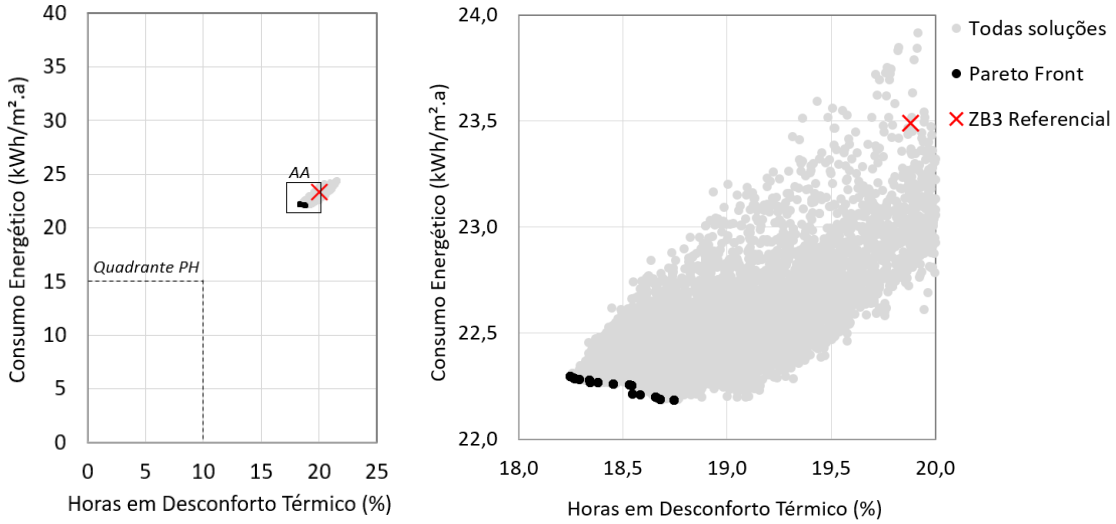
6.4.3 Residência ZB3

Neste item, discute-se a otimização de soluções de dimensionamento de janelas e elementos de controle solar externos da Residência ZB2, sem a aplicação do conceito *Passive House* (Residência ZB3 DIM), e em conjunto com a otimização das estratégias PH com ventilação híbrida, ou seja, utilizando-se o sistema MVHR juntamente com ventilação natural (Residência ZB3 DIM PH VN).

- *Residência ZB3 DIM*

Os gráficos da Figura 6-63 apresentam os resultados de todas as soluções encontradas com a simulação de dimensionamento de janelas e elementos de controle solar da Residência ZB3. Por mais que muitas soluções apresentem desempenho termoenergético superior à edificação Referencial AC, nenhuma solução está dentro do Quadrante PH.

Figura 6-63: Resultados das simulações para otimização do dimensionamento das janelas e elementos de controle solar externos: Residência ZB3 DIM.



a) Todas as simulações e ZB3 Referencial AC b) Área Ampliada (AA)

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A Tabela 6-51 demonstra que, em relação à ZB3 Referencial AC, a solução do PFM teve uma redução de 1,24 kWh/m².a no consumo energético para condicionamento e uma diminuição de 1,46% no índice de desconforto total, evidenciando que a otimização no dimensionamento de janelas e elementos de controle solar apresenta um benefício termoenergético relativamente pouco considerável para a edificação ZB3.

Tabela 6-51: Requisitos de consumo energético e sobreaquecimento para o conceito *Passive House*.

Soluções	Sistema de condicionamento térmico	Consumo energético (kWh/m².a)			Desconforto térmico (%)		
		CR	CA	Total	<20 ºC	>26 ºC	Total
ZB3 Referencial AC	AC	10,30	13,20	23,50	11,97	7,90	19,87
DIM (PFM)	AC	9,97	12,29	22,26	11,61	6,80	18,41

Legenda: Valores não atendidos pelo Conceito *Passive House* para climas quentes

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Conforme apresentado na Tabela 6-52, a otimização resultou em uma diminuição de área de janela em todos os ambientes da Residência ZB3, com valores próximos aos parâmetros mínimos simulados.

Tabela 6-52: Resultado das dimensões das janelas otimizadas da Residência ZB3 DIM (PFM)

Ambiente	Janela/ Abertura (%)	Edificação Referencial AC		Parâmetros de simulação				PFM	
				Mínima		Máxima			
		(m²)	(%)	(m²)	(%)	(m²)	(%)	(m²)	(%)
Dorm1 (ZT1)	**PJ-L3** (100%)	3,9	28,91	1,68	12,5	8,7	64,49	1,64	12,16
Dorm2 (ZT2)	**PJ-L2** (100%)	3,9	31,89	1,68	13,74	8,7	71,14	2,5	20,44
Suíte (ZT3)	**JN-2** (50%)	1,92	28,80	1,2	16,00	11,02	121,80	1,28	16,60
	JO-1 (50%)	2,4		1,2		7,25		1,21	
Estar (ZT4)	**J-S1** (100%)	2,04	45,42	1,23	12,61	9,86	69,90	1,27	13,09
	PJ-O1 (50%)	12,47		1,68		12,47		1,64	
	J-N1 (0%)	3,77		1,68		3,77		1,64	
	PJ-L1 (66%)	7,1		1,68		7,1		1,83	
	J-S2 (100%)	5,33		2,25		14,06		2,47	
Média			**33,76**		**13,70**		**81,83**		**15,57**

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Todas as fachadas apresentaram redução de área das janelas, sendo que as maiores reduções ocorram na fachada oeste, correspondendo a 80,83%, e na fachada leste, com 59,95%. Em média, as fachadas tiveram uma redução de aproximadamente 60% da área das janelas, conforme apresenta a Tabela 6-53.

Tabela 6-53: Percentual de janelas das fachadas dos ambientes de permanência prolongada pela orientação solar: Residência ZB3 DIM (PFM).

Fachada	Edificação Referencial AC	Parâmetros de simulação		Resultados	
		Mínimo	Máximo	PFM	Variação em relação ao Referencial
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Norte[1]	10,42	5,27	27,07	5,35	-48,68
Sul[2]	18,47	8,73	59,93	9,37	-49,29
Leste[3]	31,71	10,72	52,14	12,70	-59,95
Oeste[4]	67,84	13,14	89,96	13,00	-80,83
Média	32,11	9,47	57,28	10,10	- 59,69

[1]Janela: JN1, N2; [2]Janela: J-S1, JS2; [3]Janela: PJL-1, PJL2, PJL3; [4]Janela JO-1, PJO-1.
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A Tabela 6-54 demonstra que a solução do PFM apresentou um acréscimo médio de aproximadamente 24% no dimensionamento dos elementos de proteção solar externos. Nas fachadas leste e oeste, a dimensão aumentou acima de 40%, enquanto que na fachada oeste o elemento de controle solar horizontal teve uma diminuição de aproximadamente 18% em sua dimensão.

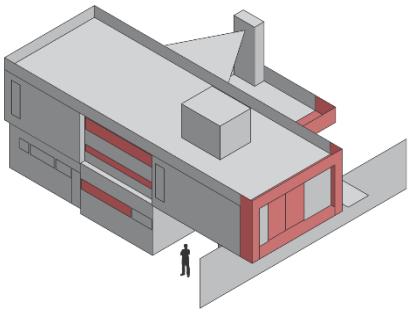
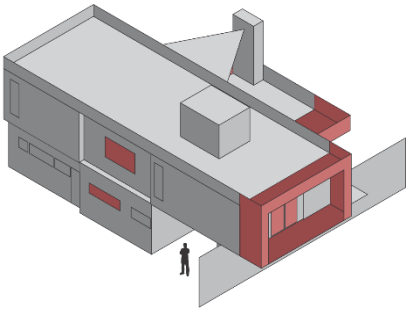
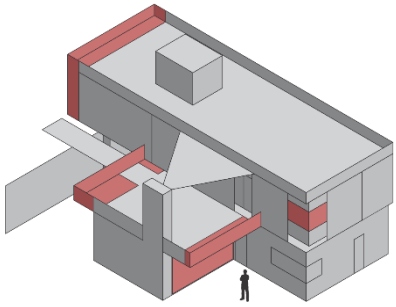
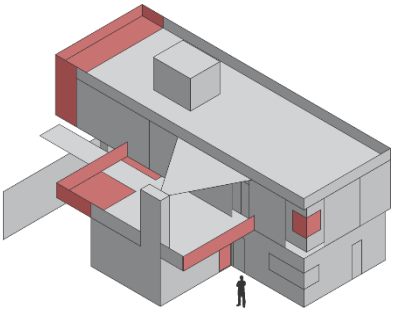
Tabela 6-54: Dimensionamento otimizado dos elementos de proteção solar da Residência ZB3 DIM (PFM).

Fachada	Disposição	Edificação Referencial AC	Parâmetros de simulação: dimensão do elemento (m)		Resultados	
					PFM	Variação em relação ao Referencial
		(m)	Mínima	Máxima	(m)	(%)
Leste	a. Horizontal/vertical	0,80	0,10	1,50	1,5	+46,67
	b. Horizontal	1,40	0,05	2,50	2,47	+43,32
Oeste	c. Horizontal	1,95	1,05	2,50	1,65	-18,18
Média						**+23,94**

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A Figura 6-64 apresenta o modelo da Residência ZB3 Referencial AC em comparação com a solução de dimensionamento de janelas e elementos de controle solar externos da solução dada pela abordagem PFM. A edificação teve uma redução da área de janela e um acréscimo nos elementos de controle solar externos, demonstrando que, para se obter um melhor desempenho energético e um menor desconforto, há a necessidade de se reduzir as trocas de calor do ambiente interno por meio dos fechamentos transparentes e, ao mesmo tempo, é preciso aumentar o sombreamento da edificação para reduzir o aquecimento dos ambientes nos períodos quentes.

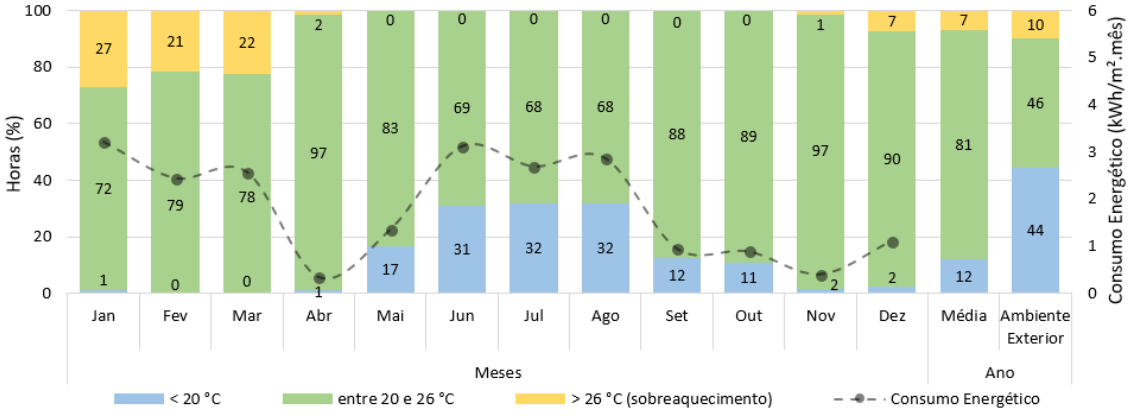
Figura 6-64: Residência ZB3 DIM, percentual de variação do dimensionamento de janelas e elementos de controle solar externos.

Residência Referencial ZB3* AC	DIM PH (PFM)
Isométrica sudeste	
	
Isométrica noroeste	
	
* Com janelas unificadas	
Área de Janelas (%)	- 59,7
Dimen. el. controle solar ext. (%)	+23,9

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

O gráfico da Figura 6-65 demonstra que a solução PFM é a que exibe maior percentual de desconforto, entre 31 e 32%, por temperaturas inferiores a 20ºC, e isso ocorre entre os meses de junho e agosto. O desconforto por sobreaquecimento é maior nos meses de janeiro e fevereiro, com valores entre 21 e 27%. O maior consumo energético acontece nos meses de maior desconforto, entre janeiro e março e junho e agosto.

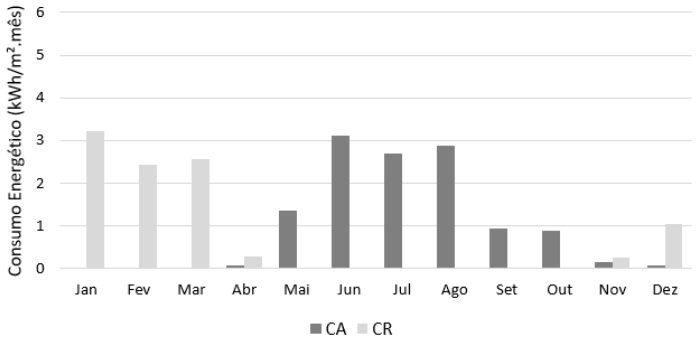
Figura 6-65: Percentual de horas em conforto, desconforto e o consumo energético (AC): Residência ZB3 DIM (PFM)



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

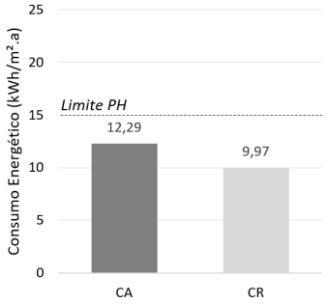
Os gráficos das Figuras 6-66 e 6-67 demonstram que o consumo energético com aquecimento (CA) é maior entre maio e outubro, ao passo que o consumo com refrigeração (CR) é maior entre novembro e abril. O consumo total anual por aquecimento é maior do que o de refrigeração, porém, são inferiores ao limite de 15 kWh/m².a estabelecido pelo conceito *Passive House*.

Figura 6-66: Consumo energético mensal (AC) para aquecimento (CA) e refrigeração (CR).



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Figura 6-67: Consumo energético anual (AC) para aquecimento (CA) e refrigeração (CR).



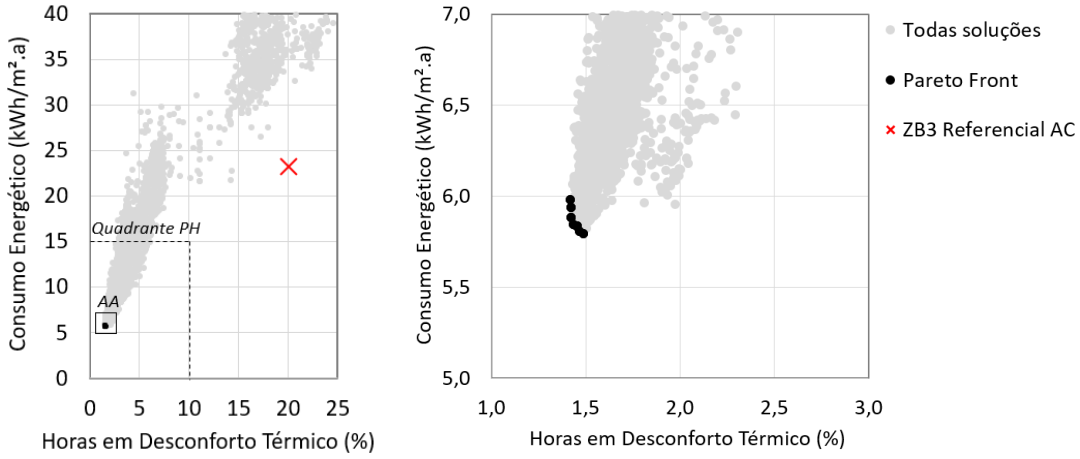
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Na Residência ZB3 DIM, conforme verifica-se nos resultados, houve uma alteração considerável na dimensão das janelas e dos elementos de controle solar externos, o que refletiu em um ganho de desempenho termoenergético de pouca significância. Nesse caso, fica evidente que só as estratégias passivas básicas, com as tecnologias construtivas correntes, não são suficientes para garantir uma melhora relevante no desempenho termoenergético.

- *Residência ZB3 DIM PH VN*

O gráfico da Figura 6-68 ilustra várias soluções de otimização do dimensionamento dos elementos de controle solar e da área de janelas juntamente com o conceito *Passive House* e ventilação natural (ventilação híbrida).Nesse caso, os resultados encontram-se dentro do Quadrante PH; com essa abordagem, portanto, há um conjunto significativo de soluções que cumprem os requisitos *Passive House*.

Figura 6-68: Resultados das simulações para otimização do dimensionamento das janelas e elementos de controle solar externos: Residência ZB3 DIM PH VN.



a) Todas as simulações e ZB3 Referencial AC b) Área Ampliada (AA)

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A Tabela 6-55, por sua vez, demonstra que embora a ZB3 Referencial AC atenda aos critérios PH, essa edificação demanda um consumo energético total anual 17,65 kWh/m².a superior à solução PFM, e 8,5 kWh/m².a superior à solução VPH, além de apresentar uma taxa de desconforto 18,43% superior ao PFM e 14,39% superior ao VPH.

Tabela 6-55: Requisitos de consumo energético e sobreaquecimento para o conceito *Passive House*.

Soluções	Sistema de condicionamento térmico	Consumo energético (kWh/m².a)			Desconforto térmico (%)			Atende aos requisitos PH?
		CR	CA	Total	<20 °C	>26 °C	Total	
ZB3 Referencial AC	AC	10,3	13,2	23,50	11,97	7,90	19,87	Sim
DIM PH VN (PFM)	MVHR	5,54	0,30	5,85	0,06	1,38	1,44	Sim
DIM PH VN (VPH)	MVHR	13,11	1,88	15,00	1,25	4,22	5,48	Sim

Legenda: Valores não atendidos pelo Conceito *Passive House* para climas quentes

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A Tabela 6-56 apresenta as temperaturas para abertura das janelas nas estações quentes e frias do ano. Nas duas soluções, PFM e VPH, o melhor desempenho termoenergético com a ventilação híbrida acontece com a abertura das janelas a uma temperatura mais elevada nas estações frias. Na solução com melhor desempenho termoenergético, a PFM, as janelas são abertas com 22,4°C nas estações quentes, enquanto que nas estações frias a abertura das janelas acontece com a temperatura de 24,6°C.

Tabela 6-56: Abertura de janelas.

Soluções	Parâmetro	Temperatura para abertura de janela (ºC)		
		Estações Quentes*	Estações Frias*	Média
DIM PH VN (PFM)	21 e 30ºC	22,4	24,6	23,5
DIM PH VN (VPH)		23,5	26,2	24,9
Média		**22,9**	**25,4**	**24,2**

* estações frias: entre os equinócios de outono (21/03) e primavera (21/09); estações quentes: entre os equinócios de primavera (21/09) e outono (21/03).

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Conforme a Tabela 6-57 indica, o PFM apresenta, de forma geral, uma maior espessura de isolamento térmico, entre 0,11 a 0,15m, e o VPH apresenta valores entre 0,003 e 0,13m. O padrão de isolamento térmico das Residências ZB1 DIM PH e ZB2 DIM PH VN é repetido na solução PFM da Residência ZB3 DIM PH VN, sendo que a menor transmitância foi identificada na cobertura, a intermediária nas paredes externas (média) e a maior na laje do piso. A solução PFM especifica o Vidro Duplo/PH em todas as fachadas e a solução VPH especifica Vidro Simples, Duplo, Duplo/PVC e Triplo/PH. A solução PFM, que é identificada como a melhor, apresenta um menor valor de infiltração (0,030 h^{-1}), uma menor renovação (0,49 h^{-1}) e um valor de *Bypass* superior (1,47 h^{-1}). A eficiência do recuperador de calor foi superior aos 90% para as duas soluções.

Tabela 6-57: Resultados das soluções *Passive House* para a Residência ZB3 DIM PH VN (PFM e VPH).

Estratégias *Passive House*	**Especificação do parâmetro**	**PFM**		**VPH**	
		e*	U**	e*	U**
Isolamento Térmico	Cobertura/terraço	0,15	0,15/0,16	0,06	0,28/0,34
	Laje do Piso	0,12	0,22	0,11	0,24
	Fachada Norte	0,15	0,17	0,03	0,62
	Fachada Sul	0,15	0,17	0,13	0,19
	Fachada Leste	0,11	0,22	0,12	0,2
	Fachada Oeste	0,14	0,18	0,003	1,66
Janela Eficiente	Fachada Norte	Vidro Duplo/PH		Vidro Duplo/PH	
	Fachada Sul	Vidro Duplo/PH		Vidro Triplo/PH	
	Fachada Leste	Vidro Duplo/PH		Vidro Simples	
	Fachada Oeste	Vidro Duplo/PH		Vidro Duplo	
Estanqueidade	Infiltração (h^{-1})	0,030		0,022	
Ventilação Mecânica com Recuperador de Calor (MVHR)	Renovação de ar (h^{-1})	0,49		0,56	
	Bypass (h^{-1})	1,47		1,34	
	Eficiência (%)	92		95	
	Tipo	Corrente cruzada		Corrente cruzada	

*e = espessura (m); **U = transmitância (W/(m².°C))

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A solução PFM traz uma redução da área das janelas em todos os ambientes, enquanto que a solução VPH teve redução de área no Dorm1 (ZT1) e no Estar (ZT4) e um aumento no Dorm2 (ZT2) e na Suíte (ZT3), conforme pode ser verificado na Tabela 6-58.

Tabela 6-58: Resultado das dimensões das janelas otimizadas da Residência ZB3 DIM PH VN (PFM e VPH).

Ambiente	Janela/ Abertura (%)	Edificação Referencial AC		Parâmetros de simulação				Resultados			
				Mínima		Máxima		PFM		VPH	
		(m²)	(%)	(m²)	(%)	(m²)	(%)	(m²)	(%)	(m²)	(%)
Dorm1 (ZT1)	**PJ-L3** (100%)	3,9	28,91	1,68	12,5	8,7	64,49	1,8	13,34	3,39	25,13
Dorm2 (ZT2)	**PJ-L2** (100%)	3,9	31,89	1,68	13,74	8,7	71,14	3,78	30,91	5,63	46,03
Suíte (ZT3)	**JN-2** (50%)	1,92	28,80	1,2	16,00	11,02	121,80	1,66	27,60	4,48	54,87
	JO-1 (50%)	2,4		1,2		7,25		2,48		3,75	
Estar (ZT4)	**J-S1** (100%)	2,04	45,42	1,23	12,61	9,86	69,90	1,4	17,33	5,42	32,35
	PJ-O1 (50%)	12,47		1,68		12,47		2,61		4,38	
	J-N1 (0%)	3,77		1,68		3,77		2,24		2,46	
	PJ-L1 (66%)	7,1		1,68		7,1		2,51		2,87	
	J-S2 (100%)	5,33		2,25		14,06		2,96		6,75	
Média			**33,76**		**13,70**		**81,83**		**22,30**		**39,60**

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A Tabela 6-59 demonstra que a solução PFM teve uma redução média de 45,96% de janelas das fachadas, enquanto a solução VPH teve um acréscimo de 5,36%. Para a solução PFM, o maior percentual de redução foi registrado na fachada oeste. Para a solução VPH, as fachadas que tiveram um aumento percentual de área de janela foram a norte e a sul.

Tabela 6-59: Percentual de janelas das fachadas dos ambientes de permanência prolongada pela orientação solar: Residência ZB3 DIM PH VN (PFM e VPH).

Fachada	Edificação Referencial AC	Parâmetros de simulação		Resultados			
		Mínimo	Máximo	PFM	Variação em relação ao Referencial	VPH	Variação em relação ao Referencial
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Norte[1]	10,42	5,27	27,07	7,14	- 31,46	12,70	+21,97
Sul[2]	18,47	8,73	59,93	10,92	- 40,88	30,49	+65,02
Leste[3]	31,71	10,72	52,14	17,21	- 45,72	25,30	-20,23
Oeste[4]	67,84	13,14	89,96	23,22	- 65,77	37,09	-45,33
Média	**32,11**	**9,47**	**57,28**	**14,62**	**-45,96**	**26,39**	**+5,36**

[1]Janela: JN1, N2; [2]Janelas: J-S1, JS2; [3]Janelas: PJL-1, PJL2, PJL3; [4]Janelas: JO-1, PJO-1

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

As duas soluções analisadas tiveram um aumento no dimensionamento dos elementos de controle solar externos, conforme apresentado na Tabela 6-60. A solução PFM teve um aumento de 61,25% no

dimensionamento dos elementos de proteção solar, ao passo que a solução VPH atingiu o índice de 41,34%.

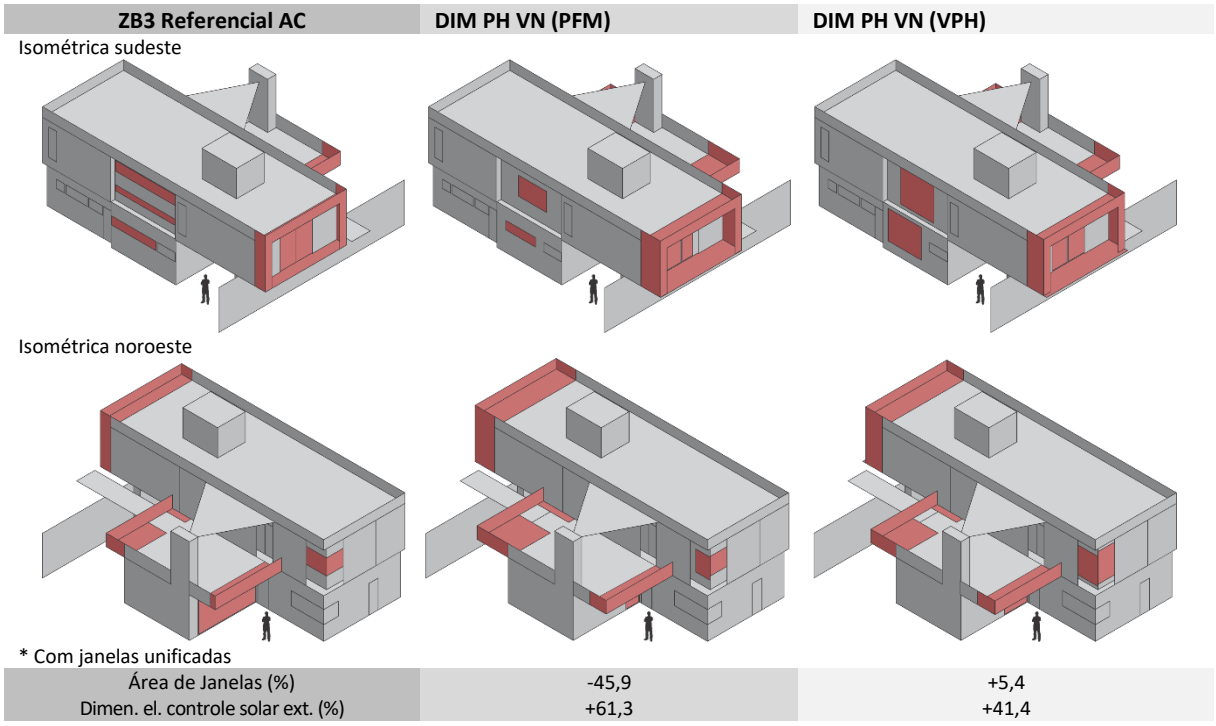
Tabela 6-60: Dimensionamento otimizado dos elementos de proteção solar da Residência ZB3 DIM PH VN (PFM e VPH).

Fachada	Disposição	Edificação Referencial AC	Parâmetros de simulação: dimensão do elemento (m)		Resultados			
					PFM	Variação em relação ao Referencial	VPH	Variação em relação ao Referencial
		(m)	Mín.	Máx.	(m)	(%)	(m)	(%)
Leste	a. Horizontal/vertical	0,80	0,10	1,50	1,49	+86,25	1,27	+58,75
	b. Horizontal	1,40	0,05	2,50	2,37	+69,29	1,92	+37,14
Oeste	c. Horizontal	1,95	0,90	2,50	2,5	+28,21	2,5	+28,21
Média						**+61,25**		**+41,37**

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A Figura 6-69 apresenta um comparativo entre as soluções das abordagens PFM e VPH aplicadas ao modelo ZB3 Referencial AC, com a otimização no dimensionamento das janelas e dos elementos de controle solar externos, juntamente com o conceito *Passive House* e ventilação natural (ventilação híbrida). Nos dois casos, há a necessidade de se ampliar a área de sombreamento com a utilização de elementos de controle solar; a solução de melhor desempenho termoenergético, a solução PFM, passa por uma redução considerável da área de janelas (45,96%).

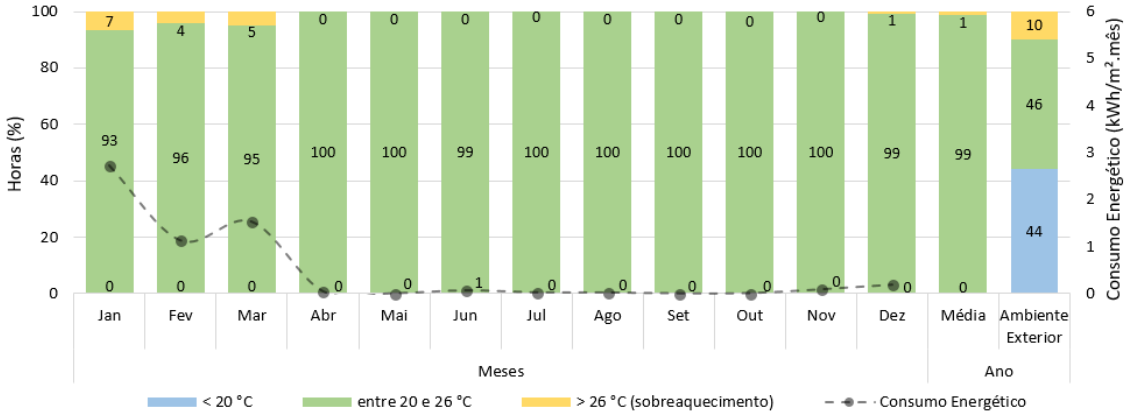
Figura 6-69: Residência ZB3 DIM PH VN, percentual de variação do dimensionamento de janelas e elementos de controle solar externos.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

O gráfico da Figura 6-70 exemplifica o desconforto térmico de PMF nos meses de janeiro, fevereiro, março, junho e dezembro. O maior consumo energético (MVHR) se deu nos meses de janeiro, fevereiro e março, enquanto os demais meses apresentaram consumo próximo de zero.

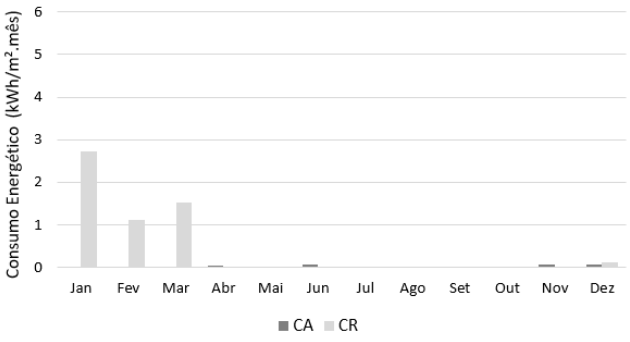
Figura 6-70: Percentual de horas em conforto, desconforto e o consumo energético (MVHR): Residência ZB3 DIM PH VN (PFM).



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

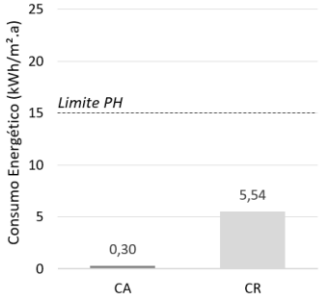
Os gráficos das Figuras 6-71 e 6-72 demonstram que o consumo energético (MVHR) com refrigeração (CR) foi maior entre os meses de janeiro e março. Nos demais meses, tanto o consumo de aquecimento quanto o de refrigeração foram inferiores a 0,5 kWh/m².mês. O gráfico da Figura 6-72 indica que o consumo total anual com refrigeração foi de 5,54 kWh/m².a. e o de aquecimento ficou na faixa de 0,3 kWh/m².a.

Figura 6-71: Consumo energético mensal (MVHR) para aquecimento (CA) e refrigeração (CR).



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Figura 6-72: Consumo energético anual (MVHR) para aquecimento (CA) e refrigeração (CR).



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Com os resultados apresentados, pode-se notar que com a otimização das estratégias do conceito *Passive House* em conjunto com o dimensionamento das janelas e dos elementos de controle solar externos, a Residência ZB3 alcança um desempenho termoenergético muito elevado. Com essa solução, a Residência ZB3 apresenta um conforto térmico em 99% das horas do ano, sendo que em 7 meses encontra-se conforto térmico em 100% das horas, para além de um consumo energético anual

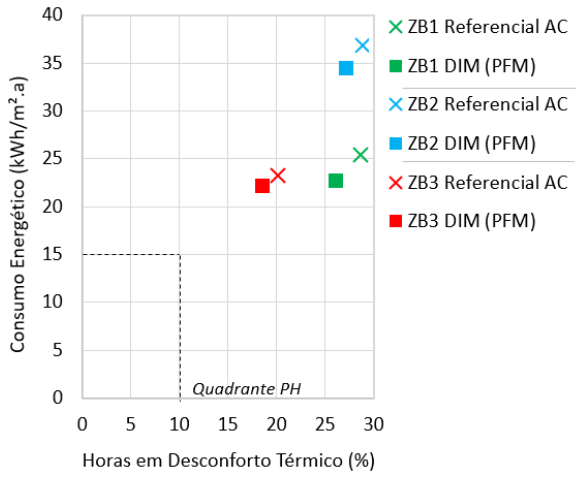
menor do que 6 kWh/m².a, valor muito inferior em relação ao máximo estabelecido pelo conceito *Passive House* para climas quentes.

6.4.4 Síntese dos resultados

Este item tem como objetivo realizar uma breve síntese dos resultados apresentados sobre a otimização do dimensionamento de janelas e elementos de controle solar externos, com e sem a otimização conjunta das estratégias *Passive House.*

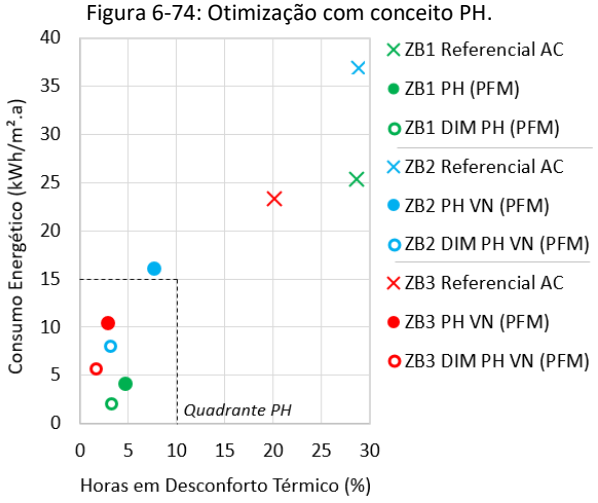
As Figuras 6-73 e 6-74 apresentam gráficos com um resumo dos resultados de otimização para dimensionamento das janelas e elementos de controle solar externos com e sem a aplicação do conceito *Passive House* nas residências ZB1, ZB2 e ZB3. Em todos os casos de otimização, há um significativo ganho no desempenho termoenergético em relação às edificações referenciais. Comparando-se o gráfico da Figura 6-73 com o gráfico da Figura 6-74, é possível verificar, por exemplo, que mesmo com a otimização do dimensionamento das janelas e dos elementos de controle solar das edificações referenciais, seu desempenho termoenergético é inferior ao de uma edificação construída com a aplicação do conceito *Passive House*.

Figura 6-73: Otimização Residência Referencial.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Figura 6-74: Otimização com conceito PH.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

O gráfico da Figura 6-74, por sua vez, demonstra que os resultados de todas as soluções com otimização de janelas e elementos de controle solar apresentam um melhor desempenho termoenergético do que as demais soluções. O desempenho termoenergético de todas as edificações DIM PH e das definições PH são relativamente próximos, se comparado o desempenho destas com as edificações referenciais.

A Tabela 6-61 exibe as temperaturas para abertura das janelas nas estações quentes e frias para as edificações residenciais ZB2 e ZB3, com a otimização da aplicação do conceito *Passive House*. Em todas as soluções, o melhor desempenho termoenergético com a ventilação híbrida, sistema MVHR com

ventilação natural, acontece com a abertura das janelas a uma temperatura mais elevada nos meses frios. Como nas estações quentes o maior consumo energético com condicionamento é para refrigeração, justifica-se a abertura das janelas para renovação do ar interno a uma temperatura inferior do que nas estações frias, quando o consumo energético para aquecimento é mais elevado. Nas estações frias, o consumo energético para aquecimento é maior, justificando a abertura das janelas somente quando o ar estiver a uma temperatura superior em relação às estações quentes.

Tabela 6-61: Abertura de janelas.

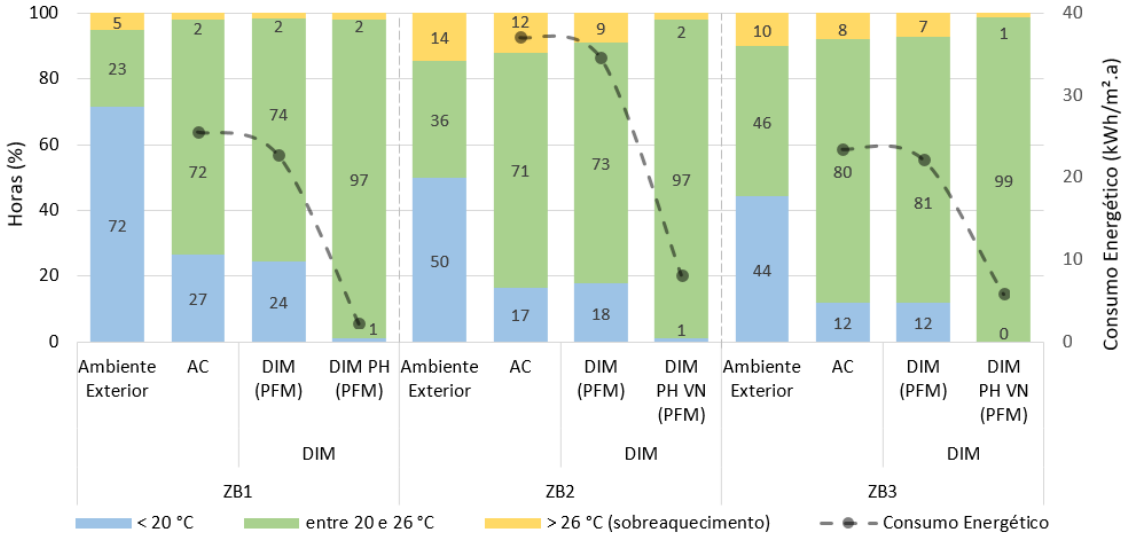
Edificações	Soluções	Parâmetro	Temperatura para abertura de janela (ºC)		
			Estações Quentes*	Estações Frias*	Média
Residência ZB1	DIM PH (PFM)	Sem abertura de janelas	-	-	-
	DIM PH (VPH)		-	-	-
Residência ZB2	DIM PH VN (PFM)	21 e 30ºC	22,4	22,9	22,7
	DIM PH VN (VPH)		22,9	28,7	25,8
Residência ZB3	DIM PH VN (PFM)		22,4	24,6	23,5
	DIM PH VN (VPH)		23,5	26,2	24,9
Média			**22,8**	**25,6**	**24,2**

* estações frias: entre os equinócios de outono (21/03) e primavera (21/09); estações quentes: entre os equinócios de primavera (21/09) e outono (21/03).

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

O gráfico da Figura 6-75 apresenta os resultados de desconforto e do consumo energético para condicionamento térmico das edificações referenciais ZB1, ZB2, ZB3, em comparação com as edificações com otimização do dimensionamento das janelas e dos elementos de controle solar externos, com e sem a otimização associada ao conceito *Passive House*. Também apresenta-se o percentual anual de temperaturas superiores a 26ºC, inferiores a 20ºC e entre 20 e 26ºC da cidade em que se localiza cada edificação.

Figura 6-75: Percentual de horas em conforto e desconforto e consumo energético anual.

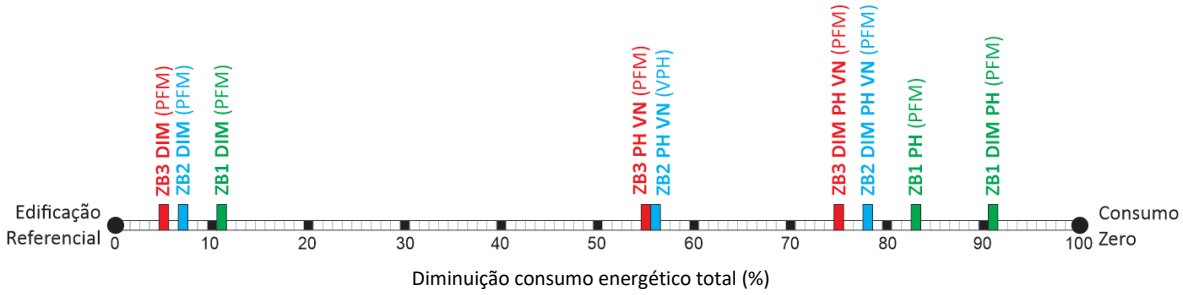


Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Com o gráfico da Figura 6-75, é possível perceber que com a otimização dos elementos de controle solar e das janelas, em todas as situações, houve um aumento do percentual de conforto térmico e uma diminuição no consumo energético para condicionamento térmico das edificações. O percentual de horas em conforto e a diminuição do consumo energético têm uma variação menos expressiva entre as edificações referenciais e as edificações que passaram por otimização sem a aplicação do conceito *Passive House*; no entanto, é preciso considerar a redução de custos que essa otimização introduz na construção. Nesses casos, o conforto aumenta 2% e a diminuição do consumo energético é inferior a 3 kWh/m².a. Com a otimização do dimensionamento dos elementos de controle solar externos e das janelas, juntamente com o conceito *Passive House*, registra-se um aumento de aproximadamente 20% de conforto em todas as situações e o consumo energético diminui 23,36kWh/m².a para a ZB1, 28,91 kWh/m².a para a ZB2, e 17,65 kWh/m².a para a ZB3.

As Figuras 6-76 e 6-77 apresentam esquematicamente o percentual de diminuição do consumo energético e do desconforto das edificações ZB1, ZB2 e ZB3 com otimização do dimensionamento de janelas e dos elementos de controle solar externos, com e sem aplicação do conceito *Passive House*, e as taxas das edificações *Passive House* otimizadas em relação às edificações referenciais.

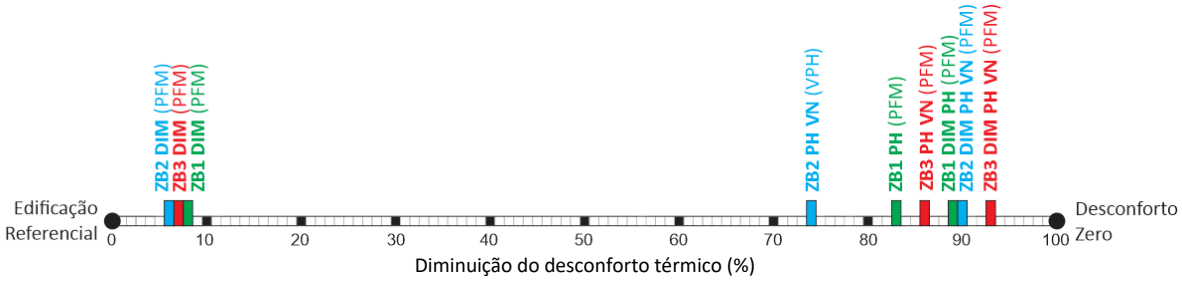
Figura 6-76: Comparativo da diminuição do consumo energético entre as soluções.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Com a Figura 6-76, é possível perceber que as edificações ZB1, ZB2 e ZB3 otimizadas com o dimensionamento de janelas e elementos de controle solar externos atingem um percentual entre 5 e 11% em relação à diminuição do consumo de energia. Com o conceito *Passive House*, a diminuição do consumo se estabelece entre 55 e 83%, enquanto que em edificações otimizadas com dimensionamento de janelas e elementos de controle solar, em conjunto com a *Passive House*, o consumo diminui ainda mais, ficando entre 76 e 91%.

Figura 6-77: Comparativo da diminuição do desconforto térmico entre as soluções.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Com a Figura 6-77 evidencia que as edificações otimizadas ZB1, ZB2 e ZB3 com o dimensionamento de janelas e de elementos de controle solar externos apresentam uma diminuição do desconforto térmico entre 6 e 8%. Com o conceito *Passive House*, a diminuição do consumo aumenta significativamente, estabelecendo-se entre os 74 e 86%, ao passo que nas edificações com o dimensionamento das janelas e elementos de controle solar otimizados de modo associado às estratégias *Passive House*, o consumo diminui entre 89 e 93%.

A Tabela 6-62 sintetiza as soluções das estratégias *Passive House* com otimização dos elementos de controle solar e janelas da solução definida pelo Ponto Médio do *Pareto Front* (PFM) e pelo ponto próximo ao vértice do Quadrante PH (VPH) para as Residências ZB1, ZB2 e ZB3, além de apresentar o consumo energético (MVHR) e o desconforto de cada solução. De forma geral, todas as soluções indicam maiores espessuras de isolamento e menor transmitância térmica dos fechamentos opacos, levando, consequentemente, a um menor consumo energético e um menor percentual de horas em desconforto térmico. Nesse caso, a única exceção é a Residência ZB1 DIM PH, que apresenta uma espessura de 0,04 m na solução com maior eficiência (PFM) e uma espessura de 0,05 m na solução de menor eficiência (VPH). Em todos os casos, com exceção da ZB3 DIM PH VN (VPH), a menor transmitância é da cobertura, a maior é a da laje do piso e a intermediária é das paredes externas. As soluções com maior eficiência termoenergética consistem em soluções de janela com o Vidro Duplo/PH, unicamente. A eficiência da ventilação com recuperador de calor é sempre elevada para todos os casos analisados, apresentando valor mínimo de 81% para o caso da Residência ZB1. Entre as soluções PFM e o VPH, não houve variação significativa no valor do *Bypass* e no valor da renovação média do ar. Os valores de *Bypass* foram sempre superiores aos valores de renovação média do ar, em aproximadamente 57 a 67%.

Tabela 6-62: Resultados comparativos das otimizações de dimensionamento de elementos de controle solar externos juntamente com o conceito PH.

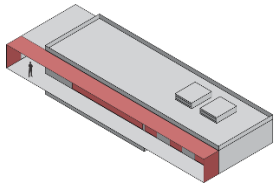
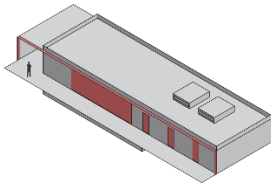
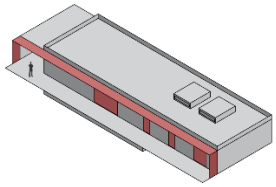
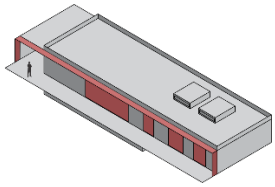
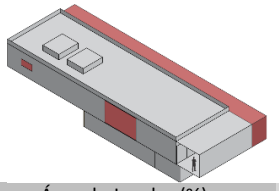
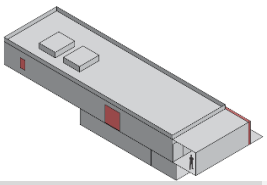
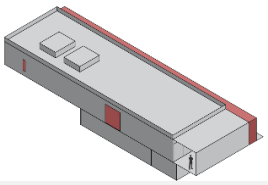
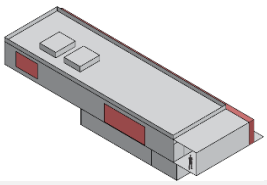
Estratégias PH	**Especificação do parâmetro**	**ZB1 DIM PH (PFM)**		**ZB1 DIM PH (VPH)**		**ZB2 DIM PH VN (PFM)**		**ZB2 DIM PH VN (VPH)**		**ZB3 DIM PH VN (PFM)**		**ZB3 DIM PH VN (VPH)**	
		e*	U**	e	U	e	U	e	U	e	U	e	U
Isolamento	Cobertura	0,15	0,14	0,12	0,17	0,15	0,16	0,09	0,24	0,15	0,16	0,06	0,31
	Laje do Piso	0,04	0,58	0,05	0,48	0,11	0,23	0,05	0,48	0,12	0,22	0,11	0,24
	Paredes Ext.	0,15	0,17	0,08	0,31	0,11	0,21	0,09	0,30	0,14	0,19	0,07	0,67
	Parede Int.	-	-	-	-	0,11	0,23	0,10	0,25	-	-	-	-
Janela Eficiente	Janelas utilizadas	Duplo/PH		Vidro Laminado e Duplo/PH		Duplo/PH		Vidro Laminado e Duplo/PH		Duplo/PH		Vidro Simples, Duplo, Duplo/PH e Triplo/PH	
Estanqueidade	Infiltração (h^{-1})	0,0185		0,031		0,040		0,037		0,030		0,022	
Ventilação Mecânica com Recuperador de Calor (MVHR)	Renovação de ar (h^{-1})	0,74		0,61		0,56		0,57		0,49		0,56	
	Bypass (h^{-1})	1,29		1,02		1,38		1,38		1,47		1,34	
	Eficiência (%)	95		81		93		90		92		95	
	Tipo	Corrente cruzada											
Consumo energético (MVHR) (kWh/m².a)	CR	1,39		2,25		5,79		12,40		5,54		13,11	
	CA	0,85		12,79		2,40		2,57		0,30		1,88	
	Total	**2,24**		**15,04**		**8,19**		**14,97**		**5,58**		**15,00**	
Desconforto térmico (%)	<20ºC	1,29		8,31		0,48		0,56		0,06		1,25	
	>26ºC	1,81		2,31		2,42		8,92		1,38		4,22	
	Total	3,10		10,61		2,90		9,48		1,44		5,48	

*e = espessura (m); **U = transmitância (W/(m².°C))

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A Figura 6-78 ilustra comparativamente os modelos da Residência ZB1 Referencial AC e os modelos otimizados com e sem a adoção das estratégias *Passive House*. Em todos os casos, a diminuição da área de janela resultou em um consumo energético menor e um consequente menor desconforto. Quanto aos elementos de controle solar dispostos ao norte, houve uma diminuição de 47,5 a 86,0% entre as soluções, evidenciando a necessidade de se reduzir o sombreamento da edificação para um maior aquecimento com a radiação solar.

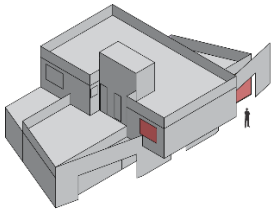
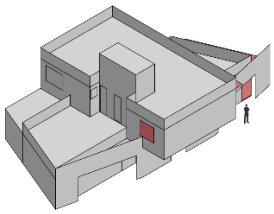
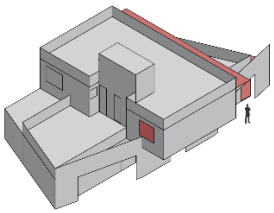
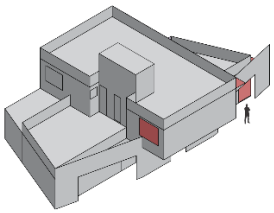
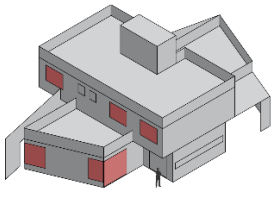
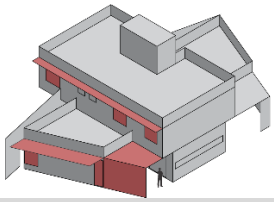
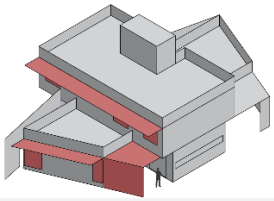
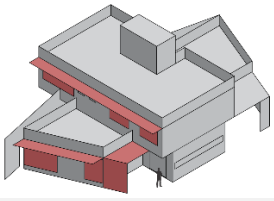
Figura 6-78: Residência ZB1, soluções de dimensionamento de janelas e elementos de controle solar externos.

ZB1 Referencial AC	ZB1 DIM (PFM)	ZB1 DIM PH (PFM)	ZB1 DIM PH (VPH)
Isométrica noroeste				
Isométrica sudeste				
Área de Janelas (%)	-46,3	-60,5	-45,7
Dimen. el. controle solar ext. (%)	-86,0	-47,5	-67,0
Consumo energético (%)	-10,9 (AC)	-91,3 (MVHR)	-41,3 (MVHR)
Desconforto (%)	-8,7	-89,1	-62,7

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A Figura 6-79 ilustra comparativamente os modelos da Residência ZB2 Referencial e os modelos otimizados com e sem a adoção das estratégias *Passive House*. Em todos os casos houve a diminuição da área das janelas e um aumento das dimensões dos elementos de controle solar. Esse resultado demonstra que, para haver uma melhora no desempenho termoenergético, é necessário haver sombreamento para controle do ganho de calor por radiação solar, pelo menos em algumas épocas do ano, e, ao mesmo tempo, é preciso controlar a troca de calor entre o ambiente interno e externo diminuindo-se a área das janelas.

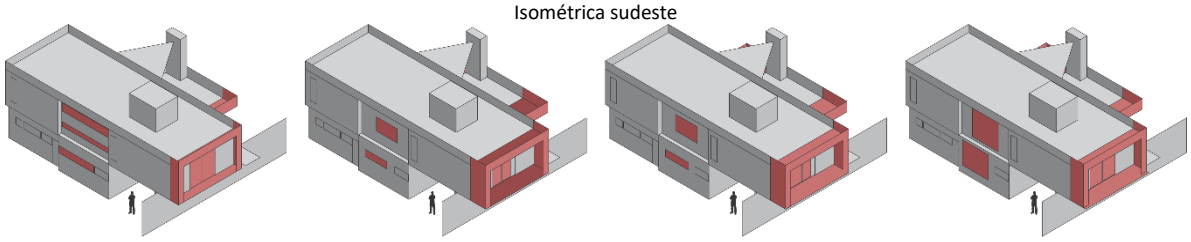
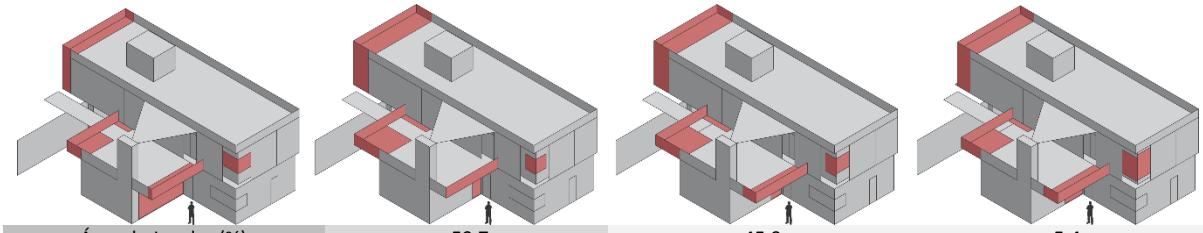
Figura 6-79: Residência ZB2, soluções de dimensionamento de janelas e elementos de controle solar externos.

ZB2 Referencial AC	ZB2 DIM (PFM)	ZB2 DIM PH VN (PFM)	ZB2 DIM PH VN (VPH)
Isométrica sudeste				
Isométrica noroeste				
Área de Janelas (%)	-45,5	-38,9	-10,3
Dimen. el. controle solar ext. (%)	+82,4	+94,9	+66,7
Consumo energético (%)	-6,7 (AC)	-77,9 (MVHR)	-59,7 (MVHR)
Desconforto (%)	-5,8	-89,9	-66,9

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A Figura 6-80 , por sua vez, apresenta comparativamente os modelos da Residência ZB3 Referencial AC e os modelos otimizados com e sem a adoção das estratégias *Passive House*. Sem a aplicação do conceito *Passive House*, a solução PFM apresentou uma diminuição de 59,7% da área de janelas e um aumento de 23,9% da dimensão dos elementos de controle solar, porém, o consumo é relativamente alto se comparado com a otimização associada da aplicação do conceito *Passive House*. Com a aplicação do conceito *Passive House*, o menor consumo e o menor desconforto foram obtidos para a solução que apresentou a diminuição da área das janelas (45,9%) e a maior dimensão dos elementos de controle solar (61,3%). Esse resultado evidencia que para haver uma melhora no desempenho termoenergético, é necessário haver sombreamento para controle do ganho de calor através da radiação solar, pelo menos em algumas épocas do ano e, ao mesmo tempo, fica clara a necessidade do controle de troca de calor entre o ambiente interno e externo pela diminuição da área das janelas.

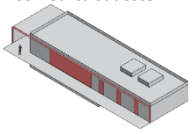
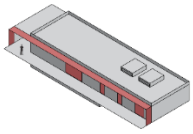
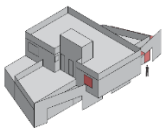
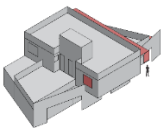
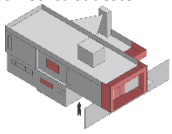
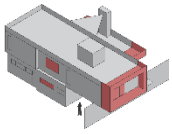
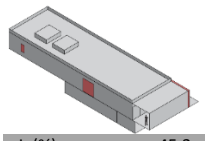
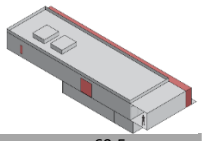
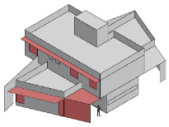
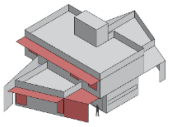
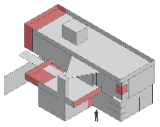
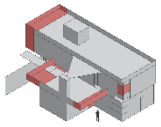
Figura 6-80: Residência ZB3, soluções de dimensionamento de janelas e elementos de controle solar externos.

ZB3 Referencial AC	**ZB3 DIM (PFM)**	**ZB3 DIM PH VN (PFM)**	**(VPH)**
Isométrica sudeste			
Isométrica noroeste			
Área de Janelas (%)	-59,7	-45,9	+5,4
Dimen. el. controle solar ext. (%)	+23,9	+61,3	+41,4
Consumo energético (%)	-5,3 (AC)	-75,1 (MVHR)	-36,2 (MVHR)
Desconforto (%)	-7,3	-92,7	-72,4

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A Figura 6-81 apresenta uma síntese comparativa dos modelos otimizados, com e sem a adoção das estratégias *Passive House*, e a relação da diminuição do consumo energético com a diminuição do desconforto térmico.

Figura 6-81: Residências ZB1, ZB2 e ZB3: soluções de dimensionamento de janelas e elementos de controle solar externos.

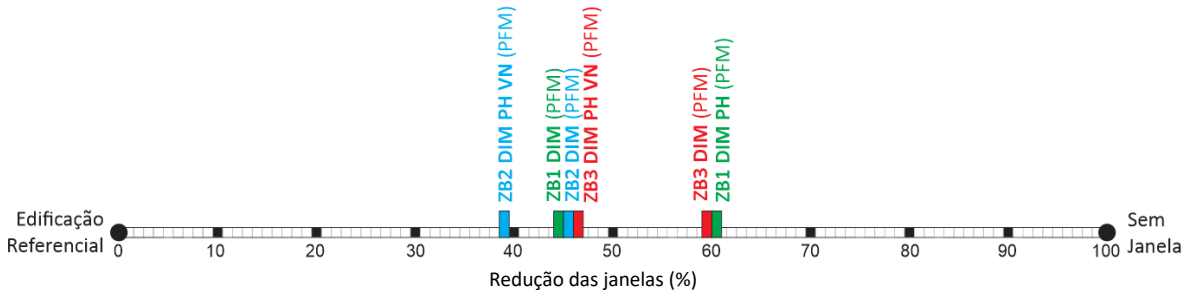
ZB1			ZB2		ZB3	
	ZB1 DIM (PFM)	ZB1 DIM PH (PFM)	ZB2 DIM (PFM)	ZB2 DIM PH VN (PFM)	ZB3 DIM (PFM)	ZB3 DIM PH VN (PFM)
Isométrica sudeste						
Isométrica noroeste						
J. (%)	-45,3	-60,5	-45,5	-38,9	-59,7	-45,9
E.C.S.E. (%)	-86,0	-47,5	+82,4	+94,9	+23,9	+61,3
C.E. (%)	-10,9 (AC)	-91,3 (MVHR)	-6,7 (AC)	-77,9 (MVHR)	-5,3 (AC)	-75,1 (MVHR)
D. (%)	-8,7	-89,1	-5,8	-89,9	-7,3	-92,7

J. = Janela; E.C.S.E. = Elemento de Controle Solar Externos; C.E. = Consumo energético; D. = Desconforto

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A Figura 6-82 ilustra esquematicamente o percentual de redução das janelas das edificações ZB1, ZB2 e ZB3 com otimização do dimensionamento de janelas e elementos de controle solar externos, com e sem a adoção das estratégias do conceito *Passive House*. A adoção das estratégias *Passive House* representa um menor percentual de diminuição de janelas nas Residências ZB2 e ZB3; na Residência ZB1, adotando-se essas estratégias, há uma redução maior das janelas, uma vez que as necessidades de aquecimento para a Zona Bioclimática ZB1 justificam uma área mais ampla de fechamentos opacos isolados termicamente e, consequentemente, a presença de janelas de pequenas dimensões.

Figura 6-82: Comparativo da diminuição das janelas entre as soluções.

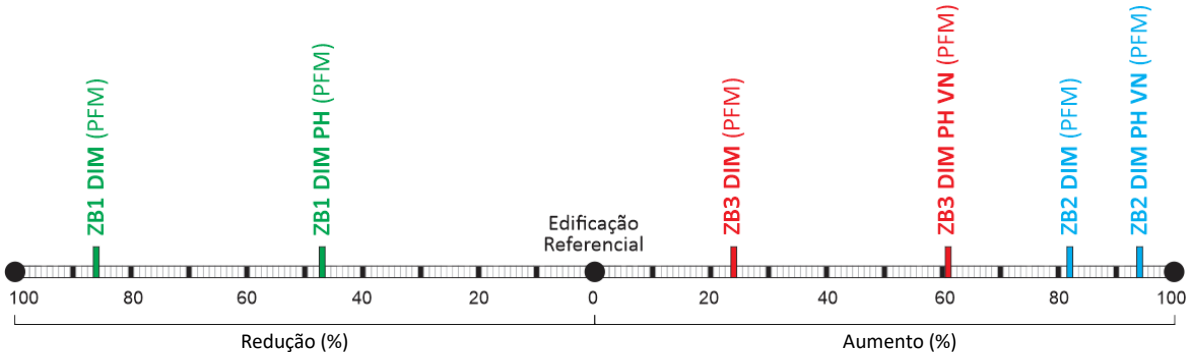


Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A Figura 6-83 apresenta esquematicamente o percentual de diminuição dos elementos de controle solar externos das edificações ZB1, ZB2 e ZB3 otimizados, com e sem a adoção das estratégias do conceito *Passive House*. A adoção das estratégias *Passive House* representa uma maior variação no dimensionamento dos elementos de controle solar das edificações ZB2 e ZB3. Na residência ZB1, com a adoção das estratégias *Passive House*, o percentual de variação dos elementos de controle solar é menor. Assim como observou-se para a solução analisada com estratégias *Passive House* na residência ZB1, a ZB1 DIM PH (PFM) apresentou pequena área de janelas, mas os elementos de controle solar

externos exerceram menos influência e, possivelmente, por esse motivo, exibiram uma menor variação.

Figura 6-83: Comparativo da variação dos elementos de controle solar externos entre as soluções.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A análise das Figuras 6-82 e 6-83 demonstra que o dimensionamento de janelas e de elementos de controle solar tem impacto significativo tanto no projeto de edificações sem estratégias *Passive House*, quanto nas edificações com as estratégias *Passive House*. Como visto nos resultados anteriores, nas Figuras 6-76 e 6-77, só com o conceito *Passive House*, sem a alteração dos elementos de controle solar e janelas propostos pelo projeto original, já é possível obter resultados de desempenho termoenergético muito superiores em relação às edificações referenciais. Porém, com a adoção do conceito *Passive House* juntamente com a otimização das janelas e dos elementos de controle solar externos, obtém-se um desempenho termoenergético ainda maior do que os demais casos analisados.

Para um projeto ótimo do ponto de vista termoenergético, é necessário ir além do uso das estratégias passivas básicas, como a boa orientação solar, o fator de forma ideal e a utilização adequada de elementos de controle solar externos. É preciso repensar também as tecnologias construtivas vigentes e aprimorar os cuidados em relação aos pormenores da construção, para evitar a troca de calor desnecessária, como o controle da infiltração de ar indesejado. Para cada lugar, o projeto arquitetônico, além de adotar estratégias passivas básicas, deve adequar a composição dos materiais construtivos às especificidades climáticas.

6.5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Na sequência, apresenta-se uma discussão dos principais resultados alcançados por este trabalho. Inicia-se com a retomada da síntese histórica da arquitetura passiva, passando para a classificação da eficiência energética da envoltória e o diagnóstico termoenergético das edificações em estudo, para, então, abordar o estudo da aplicação otimizada das estratégias *Passive House.* Por fim, trata-se da otimização do dimensionamento de janelas e de elementos de controle solar externos nas edificações referenciais e em conjunto com as estratégias *Passive House*.

6.5.1 Síntese histórica da arquitetura passiva

Em um primeiro momento, realizou-se uma revisão bibliográfica para a contextualização histórica do conceito de eficiência energética na arquitetura, tanto no plano internacional quanto no cenário nacional, de um modo particularizado. Estudou-se, naquele momento, a relação que esse campo apresenta com os aspectos energéticos e ambientais de forma cronológica até a atualidade. A pesquisa demonstrou uma relação íntima da arquitetura com o contexto externo do edifício, na maioria das vezes respondendo com maior ou menor adequação às diferentes exigências climáticas, de acordo com a disponibilidade ou escassez de fontes de energia e de recursos ambientais. A contextualização histórica resultou na elaboração de duas linhas do tempo, uma nacional e outra internacional, com a finalidade de apresentar uma síntese sobre a eficiência energética nas edificações e contribuir com o registro da trajetória da arquitetura passiva ao longo do tempo. Com o resultado obtido, pretende-se auxiliar na compreensão dos eventos e estabelecer as relações que tem sido construídas entre a arquitetura, o meio ambiente e a disponibilidade energética.

6.5.2 Classificação do nível de eficiência energética da envoltória (RTQ-R) e diagnóstico termoenergético

Para o estudo da aplicação do conceito *Passive House* para as Zonas Bioclimáticas ZB1, ZB2 e ZB3 da Região Sul-Brasileira, partiu-se da seleção de edificações existentes que pudessem servir de referencial, isto é, como estudo de caso. Para cada Zona Bioclimática, elegeu-se uma cidade representativa e, por sua vez, para cada cidade foram selecionadas as edificações referenciais para a investigação. Essas edificações foram denominadas do seguinte modo: Residência ZB1, Residência ZB2 e Residência ZB3. As edificações escolhidas estão localizadas em cidades com dados climáticos disponibilizados, a saber, Bento Gonçalves-RS para a ZB1, Santa Maria-RS para ZB2 e Florianópolis-SC para a ZB3. As edificações são residências unifamiliares projetadas e construídas nas últimas duas décadas e apresentam estratégias passivas básicas, com informações de projeto para a viabilidade do estudo.

Após a seleção das três edificações referenciais, foi realizada a modelagem tridimensional da geometria das edificações e a configuração do perfil de uso, ocupação, iluminação e uso de equipamentos definidos pelo RTQ-R (INMETRO, 2012b), com o objetivo de avaliar o nível de desempenho da envoltória segundo o regulamento brasileiro RTQ-R por meio de simulação computacional. De modo complementar, foi necessário compreender qual o desempenho termoenergético anual e atual das edificações, tendo sido realizado o diagnóstico termoenergético destas sob ventilação natural e condicionamento artificial, também com o auxílio da simulação computacional. A simulação das edificações com ventilação natural permitiu avaliar, numa escala de conforto entre 20-26^{o}C, o alcance do desempenho térmico apenas com recurso a meios passivos, sem

uso de meios ativos. Por outro lado, a simulação das edificações com condicionamento artificial permitiu avaliar, além do desempenho térmico, o consumo energético no que diz respeito à climatização mecânica.

Com o diagnóstico termoenergético das Residências ZB1, ZB2 e ZB3, foi possível concluir que as edificações atuam como amenizadores do clima externo mesmo quando não são condicionadas artificialmente. Nos três casos, o percentual de horas com temperatura entre 20-26ºC com a edificação ventilada naturalmente é maior do que no ambiente externo e aumenta significativamente com o condicionamento térmico da edificação.

Entre as cidades estudadas, a cidade de Bento Gonçalves, na ZB1, é a que possui maior número de horas do ano com temperaturas inferiores aos 20°C, totalizando 72%. Da mesma forma, a Residência ZB1 é a que apresenta o maior desconforto térmico por frio dentre todas as edificações analisadas, que varia entre 65% com a edificação ventilada naturalmente e 26% com a edificação condicionada artificialmente. O consumo energético (AC) anual para aquecimento é aproximadamente dez vezes superior ao consumo energético para refrigerar artificialmente a edificação. Dessa forma, é possível verificar que a Residência ZB1 necessita principalmente de estratégias de aquecimento para diminuir as horas de desconforto térmico e o consumo energético. No entanto, segundo a classificação do RTQ-R, o desempenho mais baixo foi para a refrigeração, com nível C. A classificação do nível de eficiência energética da envoltória pelo método de simulação do RTQ-R da Residência ZB1 foi B.

A Residência ZB2, construída para o contexto climático de Santa Maria, apresenta 36% das horas do ano em desconforto térmico por frio, quando ventilada naturalmente, e 17% quando condicionada artificialmente. A taxa de sobreaquecimento é de 15% das horas do ano quando ventilada naturalmente e de 12% quando condicionada artificialmente. O consumo energético (AC) para condicionamento térmico para aquecimento é de 20,7 kWh/m².a e, para refrigeração, é de 16,4kWh/m².a. O percentual significativo de horas do ano em situação de desconforto térmico por frio e por sobreaquecimento indica a necessidade de estratégias passivas para aquecimento da edificação nos meses frios, e resfriamento nos meses quentes. A classificação do nível de eficiência energética da envoltória obtida pelo método de simulação do RTQ-R da Residência ZB2 foi B.

A Residência ZB3, construída em Florianópolis, ventilada naturalmente e condicionada artificialmente, apresentou uma taxa de sobreaquecimento de 8% das horas do ano, alcançando valores superiores a 30% em alguns meses. A edificação passa 36% das horas do ano em desconforto térmico por frio, quando ventilada naturalmente, e 12% quando condicionada artificialmente. O consumo energético (AC) para condicionamento térmico para aquecimento é de 13,2 kWh/m².a e para refrigeração de 10,3 kWh/m².a. Da mesma forma que a Residência ZB2, o percentual significativo de horas do ano em

situação de desconforto térmico, por frio e por sobreaquecimento, indica a necessidade de estratégias passivas para aquecimento da edificação nos meses frios, e resfriamento nos meses quentes. Apesar de a Residência ZB3 cumprir com os critérios energéticos e de conforto térmico de uma *Passive House* para climas quentes, a classificação do nível de eficiência energética da envoltória pelo método de simulação do RTQ-R foi B.

6.5.3 Aplicação otimizada das estratégias do Conceito Passive House

Sendo conhecido o desempenho termoenergético das edificações referenciais segundo os critérios do RTQ-R, foi utilizado um algoritmo evolucionário multiobjetivo para otimização de parâmetros para adaptação das estratégias do conceito *Passive House* às Residências ZB1, ZB2 e ZB3: o isolamento térmico, as janelas eficientes, a estanqueidade ao ar e a ventilação mecânica com recuperador de calor (MVHR). Os resultados demonstraram uma diminuição considerável no consumo energético e no desconforto térmico com a otimização das estratégias do conceito *Passive House* em todas as edificações analisadas. A Residência ZB1 teve a mesma redução no consumo energético e no desconforto, 83,5%; já para as residências ZB2 e ZB3 foi necessário associar um parâmetro de ventilação natural por meio da abertura das janelas para aumentar o valor de renovações de ar interno, compensando o volume de ar adicional, que não era assegurado pelo *Bypass* do sistema de ventilação mecânica com recuperador de calor (MVHR). A utilização do sistema MVHR com ventilação natural, ou seja, ventilação híbrida, nas edificações Residenciais ZB2 e ZB3 diminuiu o consumo energético e o desconforto térmico. Na Residência ZB2 o consumo energético diminui 56,3% e o desconforto térmico 73,7%; na Residência ZB3, o consumo energético diminuiu 55,1% e o desconforto térmico 86,2%. Os resultados demonstram que para climas com períodos de temperatura elevada, acima dos 26^{o}C, o aumento da renovação do volume de ar através da ventilação natural pode auxiliar no cumprimento dos requisitos do conceito *Passive House*, evitando, assim, a necessidade de utilização de sistemas mecânicos de maior potência. As soluções com melhor desempenho termoenergético contam com um sistema de ventilação mecânica com recuperador de calor com eficiências próximas do limite de 95%, porém, em todas as soluções analisadas, a eficiência mínima necessária é de 91%.

Para todos os modelos analisados, o aumento da espessura do isolamento térmico e a adoção de janelas com menores transmitâncias térmicas conduzem a um menor consumo energético e a um maior percentual de horas em conforto. Para a ZB1, a espessura do isolamento nos modelos analisados com o conceito *Passive House* com maior e menor desempenho variou entre o mínimo de 0,015 m e o máximo de 0,15 m; no que diz respeito à ZB2, a variação ficou na faixa entre o mínimo de 0,04 m e o máximo de 0,12 m; e, por fim, para a edificação ZB3, a espessura de isolamento variou entre o mínimo de 0,07 m e o máximo de 0,13 m. Também constatou-se que a espessura do isolamento térmico é diferente, na maioria dos cenários, em cada um dos fechamentos opacos da edificação, porém, a sua

relação não é influenciada unicamente pela orientação solar da parede, mas também pelo conjunto de estratégias adotadas. Para todos os casos, o melhor desempenho termoenergético foi alcançado, com as menores transmitâncias térmicas na cobertura das edificações e as maiores na laje do piso, sendo a transmitância das paredes externas intermediária entre essas duas.

6.5.4 Otimização do dimensionamento de janelas e elementos de controle solar externos

Com a finalidade de verificar a influência do dimensionamento das janelas e dos elementos de controle solar no desempenho termoenergético nos projetos arquitetônicos com e sem a aplicação dos conceitos *Passive House*, foi realizada a otimização da dimensão desses elementos por meio da aplicação do algoritmo de otimização referido no item 4.3.

- *Otimização do dimensionamento de janelas e elementos de controle solar sem o conceito Passive House*

Nas Residências otimizadas sem o conceito *Passive House*, o consumo energético diminuiu entre 5,3 e 10,9% e o desconforto térmico entre 5,8 e 8,7% ao ano. Todas edificações otimizadas sem o conceito *Passive House* tiveram uma diminuição nas dimensões das janelas, sendo a Residência ZB1 a única que teve uma diminuição também nos elementos de controle solar externos. A Residência ZB1 teve uma diminuição de 46,3% nas janelas e de 86% nos elementos de controle solar. As Residências ZB2 e ZB3 tiveram uma diminuição de 45,5 e 59,7% nas dimensões das janelas e um aumento de 82,4% e de 23,9% dos elementos de controle solar, respectivamente. Tendo em vista esses resultados, pode-se concluir que as alterações nas dimensões de janelas e de elementos de controle solar externos como medida isolada não são suficientes para uma melhoria considerável do consumo energético, além de não contribuírem de modo significativo para a diminuição do desconforto térmico, resultando em um desempenho termoenergético muito inferior aos casos com a aplicação do conceito *Passive House*. Além do ótimo dimensionamento das janelas e dos elementos de controle solar externos, é necessário um aperfeiçoamento das tecnologias construtivas dos fechamentos externos das edificações analisadas, com vistas à obtenção de um melhor desempenho termoenergético.

- *Otimização do dimensionamento de janelas e elementos de controle solar externos em conjunto com o conceito Passive House*

Com a otimização dos elementos de controle solar e das janelas em conjunto com o conceito *Passive House,* há uma diminuição de desconforto térmico de 89,1% para a ZB1, 89,9% para a ZB2 e 92,7% para ZB3, além de se observar uma diminuição do consumo energético de 91,3% para ZB1, 77,9% para a ZB2 e 75,1% para ZB3. Conclui-se, desse modo, que o conceito *Passive House* otimizado, somado à ação do dimensionamento de janelas e de elementos de controle solar, resulta em um desempenho superior quando comparado com a aplicação das estratégias do conceito *Passive House*

individualmente. Todas as melhores soluções analisadas envolveram diminuição nas dimensões das janelas. As Residências ZB1, ZB2 e ZB3 tiveram, respectivamente, a diminuição de 60,5%, 38,9% e 45,9% de área das janelas. A Residência ZB1 teve redução de 47,5% nos elementos de controle solar externos, enquanto que a ZB2 e a ZB3 tiveram aumento de 94,9% e 61,3%, respectivamente. Assim como ocorreu na otimização da aplicação do conceito *Passive House*, em todos os modelos analisados, o aumento da espessura do isolamento térmico e a adoção de janelas com menor transmitância térmica representaram um menor consumo energético e um maior percentual de horas em situação de conforto térmico. A espessura do isolamento entre os modelos analisados com o conceito *Passive House*, com maior e menor desempenho, variou entre o mínimo de 0,04 m e o máximo de 0,15 m para a ZB1, entre 0,05 m e 0,15 m para a ZB2 e entre o mínimo de 0,03 m e o máximo de 0,15 m para a ZB3. A eficiência da ventilação mecânica com recuperador de calor é elevada para todas as melhores soluções analisadas, apresentando valores entre 92 e 95%. Assim, como aconteceu com a aplicação do conceito *Passive House* sem a otimização do dimensionamento das janelas e elementos de controle solar externos, para todos os casos, o melhor desempenho termoenergético foi alcançado, com as menores transmitâncias térmicas na cobertura das edificações e as maiores na laje do piso, sendo a transmitância das paredes externas de valor intermediário entre essas duas.

CAPÍTULO 7. CONCLUSÕES

A elaboração do presente trabalho foi feita com base no objetivo de adaptar as estratégias do conceito *Passive House* em residências unifamiliares da Região Sul do Brasil. Além disso, buscou-se a verificação do desempenho termoenergético dessas edificações e a identificação das implicações que a adoção deste conceito tem sobre o projeto arquitetônico. A hipótese de trabalho foi baseada justamente na possibilidade de adaptação das estratégias do conceito *Passive House* em projetos de edificações na Região Sul do Brasil, fundamentando-se na ideia de que tal adaptação pode contribuir para o aumento do desempenho termoenergético dos edifícios, com pouca interferência nos projetos arquitetônicos, desde que já apresentem estratégias passivas básicas.

Para a averiguação da hipótese, realizou-se um total de 110 mil simulações computacionais dinâmicas com a utilização de uma abordagem de otimização multiobjetivo, por meio da aplicação de um algoritmo evolucionário híbrido. Cada simulação corresponde a um conjunto de parâmetros que definem uma solução com características projetuais e desempenho termoenergético únicos.

7.1 ADAPTAÇÃO DAS ESTRATÉGIAS *PASSIVE HOUSE* E DESEMPENHO TERMOENERGÉTICO NAS ZONAS BIOCLIMÁTICAS ZB1, ZB2 E ZB3 SUL-BRASILEIRAS

Nos próximos parágrafos, são discutidas as principais conclusões acerca das influências da adaptabilidade das estratégias *Passive House* nas Zonas Bioclimáticas ZB1, ZB2 e ZB3 com relação ao seu desempenho termoenergético.

Os resultados demonstraram que as estratégias *Passive House* têm aplicabilidade nas residências unifamiliares em estudo da Região Sul-Brasileira, obtendo desempenho termoenergético muito superior às edificações referenciais. Em todas as edificações analisadas, com a aplicação otimizada das estratégias *Passive House*, houve uma diminuição significativa no consumo energético e no desconforto térmico, demonstrando, portanto, a sua viabilidade do ponto de vista termoenergético.

Para os climas das Zonas Bioclimáticas ZB2 e ZB3, é necessário lançar mão de uma ventilação híbrida, ou seja, deve-se complementar a ventilação mecânica com recuperador de calor através da ventilação natural com a abertura de janelas. Dessa forma, conclui-se que a necessidade de manter as janelas fechadas durante as 24 horas do dia, em edificações localizadas em climas com períodos de temperatura elevada, acima dos 26°C, é questionável; além disso, o aumento da renovação do volume

de ar através da ventilação natural auxilia no cumprimento dos requisitos do conceito *Passive House*, ganhando-se desempenho termoenergético. Para o clima da Zona Bioclimática ZB1, com a presença de temperaturas exteriores inferiores a 20ºC durante todo o ano, a ventilação híbrida através do complemento com ventilação natural não é necessária.

As simulações de otimização realizadas com algoritmo evolucionário híbrido demonstram que as possibilidades de aplicação do conceito *Passive House* para as Zonas Bioclimáticas ZB1, ZB2 e ZB3 da Região Sul do Brasil são muito variadas, pois geram uma grande quantidade de soluções que dependem, sobretudo, do estudo das estratégias do conceito em conjunto, e não individualmente. A diminuição da transmitância térmica dos fechamentos externos da edificação, representou, em todos os modelos analisados, uma melhoria no desempenho termoenergético. O aumento da espessura do isolamento térmico e a adoção de janelas com menores transmitâncias térmicas conduzem a um menor consumo energético e a um maior percentual de horas em conforto térmico. Com baixas transmitâncias térmicas é possível alcançar desempenho termoenergético superior aos estabelecidos pelo conceito *Passive House* para climas quentes. Os melhores resultados foram alcançados, para todos os casos estudados, com as menores transmitâncias térmicas na cobertura das edificações e as maiores na laje piso, sendo a transmitância das paredes externas intermediária a essas duas. Em todas as soluções analisadas, os melhores resultados foram alcançados com o uso de ventilação mecânica com recuperador de calor de alta eficiência (a partir de 90%).

Em todas as soluções que resultaram em melhor desempenho termoenergético, houve uma redução significativa do percentual de área das janelas (entre 38,9 e 60,5%). Conclui-se, assim, que, mesmo com a adoção das estratégias *Passive House*, com a finalidade de desenvolver um projeto ótimo sob a perspectiva termoenergética, é primordial que os projetistas analisem com critério a relação entre fechamentos opacos e transparentes, evitando, sempre que possível, grandes áreas envidraçadas.

Para os casos analisados, a otimização do dimensionamento das janelas e dos elementos de controle solar externos sem a aplicação das estratégias *Passive House* resultam em um ganho de desempenho termoenergético muito inferior aos casos com a aplicação do conceito *Passive House*. Contudo, a aplicação desse conceito otimizado, juntamente com a ação do dimensionamento de janelas e de elementos de controle solar, resulta em um desempenho superior quando comparado com a aplicação das estratégias *Passive House* individualmente. Disso, deduz-se que, para além da edificação já apresentar um projeto alinhado com estratégias passivas básicas e contar com as dimensões das janelas e elementos de controle solar externos otimizados, para se alcançar um projeto ótimo do ponto de vista termoenergético, é essencial também intervir na qualificação das tecnologias construtivas vigentes. Também é preciso aprimorar os cuidados com relação aos pormenores da construção para evitar a troca de calor desnecessária, com controle da infiltração de ar indesejado, por exemplo.

7.2 IMPLICAÇÕES DAS ESTRATÉGIAS *PASSIVE HOUSE* NO PROJETO ARQUITETÔNICO

Além de adaptar as estratégias *Passive House* a residências unifamiliares da Região Sul do Brasil e verificar qual o seu desempenho termoenergético, um dos objetivos delineados pelo trabalho foi identificar quais as implicações que a adoção dessas estratégias têm sobre o projeto arquitetônico. A seguir, serão discutidas as principais conclusões acerca da influência da estratégia *Passive House* nas Zonas Bioclimáticas ZB1, ZB2 e ZB3 relativamente ao projeto arquitetônico.

Concluiu-se que sem a adoção das estratégias *Passive House*, numa lógica de instituir uma prática de projeto ótimo do ponto de vista termoenergético, todas as edificações referenciais, com tecnologias construtivas vigentes, limitaram-se a uma redução relativamente baixa no consumo energético e no desconforto térmico, demandando uma modificação considerável no projeto arquitetônico, com alterações significativas da dimensão das janelas e dos elementos de controle solar externos. A interferência no dimensionamento das janelas e dos elementos de controle solar externos modifica, além da composição das partes com o todo da edificação, a relação programática da edificação com o entorno.

Para as edificações analisadas, que já apresentavam estratégias passivas básicas na sua concepção projetual, é possível utilizar as estratégias *Passive House* sem interferir na dimensão de janelas e elementos de controle solar externos, obtendo-se um desempenho termoenergético que atende aos critérios do conceito *Passive House* para climas quentes. Porém, com a adoção das estratégias *Passive House* com otimização das janelas e elementos de controle solar, consegue-se um desempenho termoenergético superior, embora haja uma maior interferência no projeto arquitetônico. Nesse último caso, o projeto arquitetônico necessita incluir isolamento térmico na constituição dos materiais construtivos dos fechamentos opacos, adotar janelas com maior eficiência energética, prever a utilização de um sistema de recuperação de calor com ventilação mecânica e, ainda, dimensionar as janelas e os elementos de controle solar de forma otimizada para obter um maior desempenho termoenergético.

Em climas com predominância de temperaturas exteriores abaixo dos 20^{o}C, como é o caso de Bento Gonçalves (ZB1), os elementos de controle solar externos devem ser dimensionados de forma criteriosa, evitando bloquear excessivamente a radiação solar e procurando maximizar os ganhos solares, principalmente nos meses de inverno, para que os consumos energéticos de aquecimento da edificação sejam reduzidos. Já em climas como o de Santa Maria (ZB2) e Florianópolis (ZB3), nos quais há um percentual elevado de horas com temperaturas inferiores a 20^{o}C e superiores a 26^{o}C, os

resultados demonstram a necessidade de extensos elementos de proteção solar externos para proteger a edificação da radiação solar direta e reduzir as temperaturas internas durante as estações quentes. Porém, como visto anteriormente, só essas estratégias, com as tecnologias vigentes, resultam em um ganho de desempenho termoenergético muito inferior comparativamente aos casos com a aplicação do conceito *Passive House*. Com o objetivo do desenvolvimento de um projeto ótimo do ponto de vista termoenergético, é necessário ir além da adoção das estratégias passivas básicas, sendo inevitável também adequar as técnicas construtivas às peculiaridades climáticas de cada lugar.

A alteração do dimensionamento das janelas e dos elementos de controle solar tem consequências não só na definição da composição e no caráter da edificação, mas também na relação programática do edificado com seu entorno, modificando a conexão espacial dos espaços internos e externos da edificação. Por outro lado, a adoção das estratégias do conceito *Passive House* requer o aumento da espessura das paredes por meio da utilização de isolamento térmico adequado (espessuras mais generosas), alteração do tipo de vidro/esquadria e exige o uso de ventilação mecânica com recuperador de calor. O isolamento térmico não tem influência significativa no programa arquitetônico, no entanto, terá, além do aumento da espessura, implicação na constituição construtiva dos materiais dos fechamentos opacos. Tanto a alteração do dimensionamento das janelas e dos elementos de controle solar como a aplicação do conceito *Passive House* modificam a composição das partes com o todo da edificação, porém, deve-se notar que os ganhos termoenergéticos com o conceito *Passive House* são muito mais expressivos e a interferência no projeto arquitetônico menos significativa.

Tradicionalmente, as residências brasileiras buscam abertura e integração com o exterior por meio de elementos arquitetônicos tais como janelas, varandas e pátios. A estanqueidade ao ar e o uso de sistema de ventilação mecânica propostos pelas estratégias do conceito *Passive House* também têm consequências na mudança de hábitos culturais do usuário e levam a uma diminuição da integração direta da edificação com o ambiente externo. Contudo, os resultados obtidos demonstraram que, no caso das Residências ZB2 e ZB3, houve a necessidade de abertura das janelas para complementar o fluxo de ar do sistema de ventilação mecânica com recuperação de calor. Dessa forma, a necessidade de manutenção das janelas fechadas é um obstáculo superável, mas condiciona o usuário ao hábito de abrir as janelas somente quando o sistema de ventilação mecânica com recuperador de calor não for suficiente para a renovação do ar interior. A adoção do sistema de ventilação mecânica com recuperador de calor, mesmo que de forma híbrida, atuando em conjunto com a ventilação natural, implica em desenvolver o hábito de abrir as janelas somente quando é benéfico ao desempenho termoenergético.

Para além dos hábitos culturais, a adoção do sistema de ventilação mecânica com recuperador de calor (MVHR) também requer um espaço apropriado para a sua instalação e um sistema de tubulações que podem ser facilmente embutidos no forro, exercendo assim, pouca interferência no programa da edificação.

Conforme verificado nos resultados, para as estratégias *Passive House*, o lugar, mais especificamente os condicionantes climáticos, assumem um papel fundamental e irão influenciar diretamente também nos aspectos construtivos do projeto arquitetônico. Os resultados revelam que, conforme o clima de cada lugar, as estratégias do conceito assumem configurações distintas, exigindo diferentes espessuras de isolamento térmico e diferentes necessidades de estanqueidade. Apesar disso, para todas as edificações estudadas, independentemente das zonas bioclimáticas, os melhores desempenhos termoenergéticos foram alcançadas com algumas características em comum. Os melhores resultados foram obtidos com a diminuição da transmitância dos fechamentos opacos e transparentes e com a adoção de um sistema de recuperador de calor de alta eficiência. Da mesma forma, os melhores resultados sempre apresentaram maior espessura de isolamento térmico da cobertura, em seguida das paredes externas e, por último, da laje do piso.

A aplicação otimizada dos conceitos *Passive House*, nas zonas bioclimáticas ZB1, ZB2 e ZB3 da Região Sul-Brasileira, com o emprego de simulação dinâmica computacional, demonstra que as edificações atuam como um sistema, no qual diferentes combinações de estratégias podem apresentar desempenhos termoenergéticos semelhantes. A utilização da computação e de algoritmos de otimização permite lidar com inúmeras estratégias projetuais ao mesmo tempo, fornecendo aos projetistas uma ferramenta poderosa para apoiar o processo de tomada de decisão. Os resultados demonstraram que essas ferramentas possibilitam escolher as melhores alternativas projetuais, conciliando as questões programáticas, construtivas e os condicionantes climáticos do lugar com a eficiência energética do edifício. As ferramentas de simulação dinâmicas tendem a ser cada vez mais intuitivas, auxiliando os projetistas no desenvolvimento de projetos arquitetônicos que visam à otimização do desempenho energético do edifício.

Assim, a hipótese da tese é confirmada e conclui-se que a adaptação das estratégias *Passive House* em projetos de edificações na Região Sul do Brasil é possível, para as Zonas Bioclimáticas ZB1, ZB2 e ZB3, e que a mesma contribui para o aumento do desempenho termoenergético dos edifícios, com pouca interferência nos projetos arquitetônicos que já apresentem estratégias passivas básicas na sua concepção.

7.3 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Com a realização deste trabalho, foi possível identificar a necessidade de uma série de novos estudos, como, por exemplo:

- O presente trabalho analisou a aplicação das estratégias *Passive House* nas Zonas Bioclimáticas ZB1, ZB2 e ZB3, e, embora englobe áreas de expressiva densidade populacional, investigou cerca de 13,7% do território nacional[1]. É necessário, desse modo, ampliar a discussão para as demais Zonas Bioclimáticas brasileiras;

- Para além da análise da adaptação termoenergética do conceito *Passive House*, é também essencial a realização de estudos quanto à viabilidade tecnológica e econômica do uso do conceito na arquitetura, verificando as tecnologias disponíveis no Brasil e o período de retorno do investimento. Já foram desenvolvidos alguns trabalhos sobre a viabilidade econômica do conceito *Passive House* para edificações residenciais de interesse social, porém, é necessário a ampliação dessa pesquisa para edificações com diferentes utilizações, escalas e padrões construtivos;

- No presente trabalho, adotou-se o uso de ventilação mecânica com recuperação de calor para a aplicação do conceito *Passive House* juntamente com a possibilidade de abertura de janelas para as residências ZB2 e ZB3. Contudo, é necessário aprofundar os estudos sobre ventilação híbrida, com uso de ventilação mecânica com recuperador de calor em conjunto com a ventilação natural, possibilitando avaliar as melhores estratégias para minimizar o consumo energético para condicionamento térmico e para diminuição do desconforto térmico;

- É também necessário estudar a viabilidade da utilização do conceito *Passive House* para diferentes tipologias, tais como edificações de uso comercial, educacional entre outros. Para cada tipologia, a questão programática, o uso e a ocupação dos ambientes é diferente, o que determinará necessidades termoenergéticas específicas;

- No estudo da Tese, realizou-se a adaptação do conceito *Passive House* alterando a composição dos materiais da edificação e a disposição dos elementos construtivos, como o dimensionamento de janelas e de elementos de proteção solar externos. Além da adaptação do conceito *Passive House* em construções novas, é importante estudar a aplicação do conceito quando incorporado em edificações com valor histórico, preservando ao máximo a identidade e as características originais da arquitetura do edifício. Esse processo deve ser compatível com o uso de tecnologias construtivas

[1] Embora ocupem 13,7% do território, as ZBs 1, 2 e 3 correspondem a um número expressivo populacional, englobando regiões com grande densidade populacional sobretudo do sul e sudeste, como as cidades de Porto Alegre, Florianópolis, Curitiba, São Paulo, Belo Horizonte entre outras.

mais recentes, visando melhorar o desempenho termoenergético da edificação existente, para que a sua utilização seja viável no atual contexto energético e ambiental;

- No presente trabalho foi analisado o desempenho termoenergético da aplicação do conceito *Passive House*, considerando para a avaliação a temperatura operativa (valor médio entre a temperatura do ar e a temperatura radiante média do ambiente). Para que se possa avaliar o conforto higrotérmico, também é necessário aprofundar os estudos relacionando os resultados aqui obtidos ao desempenho termoenergético das edificações *Passive House* considerando a umidade relativa do ar;

- Além de simular computacionalmente o desempenho termoenergético do edifício, é necessário construir uma *Passive House* para o clima da Região Sul Brasileira de forma a analisar, pela monitorização contínua, o seu desempenho termoenergético real. A construção de uma *Passive House* na Região Sul Brasileira também fomentaria o interesse público e serviria de modelo referencial para futuras construções que visem à eficiência energética;

- Atualmente, para realizar as simulações computacionais de desempenho termoenergético, as atividades humanas no ambiente construído são padronizadas por meio de agendas de uso e ocupação. A definição de agendas tenta aproximar as ações humanas simuladas da realidade, porém, tornam as rotinas diárias automatizadas e, muitas vezes, pouco representativas da realidade. O uso e a ocupação de uma edificação pelo homem envolve uma grande complexidade que pode ser aproximada da realidade com base na utilização de inteligência artificial. A inteligência artificial poderá prever o comportamento do usuário da edificação com maior precisão e gerar resultados de simulações termoenergéticas muito próximas da realidade. Contudo, como é uma área em recente expansão, é necessário aprofundar estudos sobre o tema;

- Além do estudo do desempenho termoenergético é importante analisar a aplicação das estratégias do conceito *Passive House* em relação à qualidade do ar interior e do comportamento acústico, principalmente em áreas urbanas, onde a poluição do ar e o ruído tendem a ser elevados. Com o uso da ventilação mecânica com recuperador de calor, a renovação do ar interno é controlada, desse modo, problemas em relação à umidade interna, ar viciado com poluentes, fungos e bactérias podem ser minimizados. É também necessário aprofundar o estudo sobre o isolamento acústico interno das edificações *Passive House*, uma vez que a estanqueidade ao ar da edificação e o isolamento dos fechamentos podem exercer um importante papel como minimizadores dos ruídos externos.

REFERÊNCIAS

AGRAWAL, B; TIWARI G. N. **Building integrated photovoltaic thermal systems:** for sustainable developments. Delhi: Royal Society of Chemistry; 2011.

ALBERTI, L. B. **The Ten Books of Architecture**. Traduzido por James Leoni, London: Edward Owen, 1986.

ASHRAE - AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIRCONDITIONING ENGINEERS. **ANSI/ASHRAE Standard 140**: Standard method of test for the evaluation of building energy analysis computer programs. Atlanta, 2014.

ASIMOV, I. **Live and Energy**. Canadá: Discus Books, 1972.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220**: Desempenho térmico para edificações de interesse social. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575**: Edificações Habitacionais – Desempenho Parte 1: Requisitos Gerais - Referências - Elaboração. Rio de Janeiro, 2013.

BAKER, G. **Le Corbusier:** uma análise da forma. São Paulo: Martins Fontes, 1998.

BARBER, D. A. **A House in the Sun**: Modern Architecture and Solar Energy in the Cold War. Oxford University Press, 2016. p. 320.

BARBER, D. A. Experimental Dwellings: Modern Architecture and Environmental Research at the MIT Solar Energy Fund, 1938-1963. **History**, v. 32, n. 4, p. 561-584, 2008.

BARBER, D. A. Tomorrow's House: Solar Housing in 1940s America. **Technology and culture**, v. 55, n. 1, p. 1-39, 2014.

BARBER, S. **History of Passive Solar Energy.** 2013.

BEHLING, S.; BEHLING, S. **Sol Power:** La evolución de la arquitectura sostenible. Barcelona: Gustavo Gili, 2002.

BESANT, R. W.; DUMONT, R. S.; SCHOENAU, G. The Saskatchewan conservation house: some preliminary performance results. **Energy and Buildings**, v. 2, n. 2, p. 163-174, 1979.

BEZERRA, L. Palestra edifício *Passive House* no Brasil. In: **Casa Passiva Brasil 2018 – II Congresso Internacional e Workshop.** Pelotas, 2018.

BICCA, P. R. S.; BICCA, B. E. P. **Arquitetura na formação do Brasil.** Brasília: UNESCO, 2008.

BITTENCOURT, L. **Uso das cartas solares.** Diretrizes para arquitetos. 4. ed. rev- Maceió: EDUFAL, 2004.

BITTENCOURT, L.; CÂNDIDO, C. **Introdução à ventilação natural**. 3. Ed. Maceió: EDUFAL, 2008.

BOYCE, R. P. **George Fred Keck, 1895-1980: Midwest Architect**. University of Wisconsin--Madison, 1986.

BRASIL. **Decreto nº 4.131, de 14 de fevereiro de 2002.** Dispõe sobre medidas emergenciais de redução do consumo de energia elétrica no âmbito da Administração Pública Federal. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/2002/D4131.htm. Acesso em: 10 fev. 2017.

BRASIL. **Instrução Normativa nº 2, de 4 de junho de 2014.** Publicada no DOU de 05/06/2014 (nº 106, Seção 1, pág. 102 e 103). 2014.

BRASIL. **Lei nº 10.295**, de 17 de outubro de 2001. Dispõe sobre política nacional de conservação e uso racional de energia. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 18 out. 2001. Seção 1, p. 1.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Plano Nacional de Energia 2030:** Capítulo 1 (análise energética e dados agregados) 1970-2016. Brasília: MME: EPE, 2007.

BRASIL. **Portaria nº 1.770, de 21 de dezembro de 1994.** Publicada no DOU de 23/12/1994 (nº 243, Seção 1, pág. 20.346). 1994.

BRAVO, G.; GONZÁLEZ, E. Thermal comfort in naturally ventilated spaces and under indirect evaporative passive cooling conditions in hot–humid climate. **Energy and Buildings**, v. 63, p. 79–86, 2013.

BRUAND, Y. **Arquitetura contemporânea no Brasil**. São Paulo: Perspectiva, 2012.

BUTERA, F. M. **Zero-energy buildings:** the challenges. Milan, 2013.

BUTTI, K.; PERLIN, J. **Un hilo dorado:** 2500 años de arquitectura y tecnología solar. Blume, 1985.

CAMPOS, J. N. de. **O Brasil visto por dentro.** Lisboa: Ed. Autor, 1961.

CAMPUSANO SANTOS, Y. **El Cobogó en la arquitectura moderna: evolución, materiales y tecnología**. 2014. Dissertação de Mestrado. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2014.

CANÊDO, L. B. **A Revolução Industrial:** tradição e ruptura; adaptação da economia e da sociedade; rumo a um mundo industrializado. Atual, 1987.

CARLO, J. C. **Desenvolvimento de metodologia de avaliação da eficiência energética do envoltório de edificações não-residenciais.** 2008. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

CARRIER. **Weather makers to the world:** The story of a company. Disponível em: http://www.williscarrier.com/1876-1902.php. Acesso em: 10 de jan. 2018.

CARVALHO, J. F. de. **Energia e sociedade. Estudos avançados**. São Paulo, v. 28, n. 82, p. 25-39, 2014.

CASA E. **Casa E.** Disponível em: http://www.ufrgs.br/casae. Acesso em: 10 jan. 2017.

CASCUDO, L. C. **Rede de dormir**: Uma pesquisa etnográfica. Rio de Janeiro: Global Editora, 2015.

CASTELNOU, A. **Arquitetura Contemporânea**. Curitiba: UFPR. 2015. 156 p.

CAVALCANTI, S. T. de H. **O azulejo na arquitetura civil de Pernambuco–séc. XIX.** São Paulo: Metalivros, 2002.

COLIN, S. **Uma introdução à arquitetura**. Rio de Janeiro: Uapê, 2006.

COMAS, C. E. D. Arquitetura moderna, estilo Corbu, Pavilhão brasileiro. In: GUERRA, A. (org.). **Textos fundamentais sobre história da arquitetura moderna brasileira_parte 1.** São Paulo: Romano Guerra, 2010a.

COMAS, C. E. D. Protótipo, monumento, um ministério o Ministério. In: GUERRA, A. (org.). **Textos fundamentais sobre história da arquitetura moderna brasileira_parte 1.** São Paulo: Romano Guerra, 2010b.

CORNOLDI, A.; DE LLORENS, M. P. S.; LOS, S. **Hábitat y energía**. Editorial Gustavo Gili, 1982.

CORONA, E.; LEMOS, C. A. C. **Dicionário da arquitetura brasileira**. São Paulo: Edart, 1998.

COSTA, J. A. R. **A evolução da Arquitectura Biocimática: contributo para a sustentabilidade arquitectónica e urbana.** 2008. Tese de doutorado, Universidade Portucalense, Porto, 2008.

COSTA, L. **Lucio Costa: registro de uma vivência**. Empresa das Artes, 1995.

CRAWLEY, D. B. *et al*. ***EnergyPlus***: Creating a New-Generation Building Energy Simulation Program, Energy and Buildings, 2001.

CUNHA, E. G. Brise-soleil: da estética à eficiência energética. **Arquitextos**, São Paulo, ano 11, n. 131.07, Vitruvius, abr. 2011 http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/arquitextos/11.131/3844. Acesso em: 10 out. 2018.

DA COSTA, E. C**. Arquitetura ecológica:** condicionamento térmico natural. São Paulo: Edgard Blücher, 1982.

DALBEM, R. *et al*. Optimisation of a social housing for south of Brazil: From basic performance standard to *Passive House* concept. **Energy**, v. 167, p. 1278-1296, 2019.

DALBEM, R.; CUNHA, E. G.; VICENTE, R.; FIGUEIREDO, A. J.; SILVA, A. C. S. B. Discussão do desempenho da envoltória de uma *Passive House* adaptada à zona bioclimática 2 em acordo com o RTQ-R. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 1, p. 201-222. 2017.

DALBEM, R.; FREITAS, J. M. R.; CUNHA, E. G. Conceito *Passivhaus* aplicado ao clima brasileiro. **Revista de Arquitetura IMED**, v. 4, n. 1, p. 26-36, 2015.

DALBEM, R.; KNOP, S.; CUNHA. E.; OLIVEIRA, R. F. P.; RODRIGUES, M. F.; VICENTE, R.; Verification of the *Passive House* Concept to the South of Brazil Climate. **Journal of Civil Engineering and Architecture**, v. 10, p. 937-945, 2016.

DAVIES, M. G. The passive solar heated school in wallasey. I foreword and introduction. **International journal of energy research**, v. 10, n. 2, p. 101-120, 1986.

DEBRET, J. B. **Viagem pitoresca e histórica ao Brasil**. Tomo I (vol.1 e 2) e tomo II (vol.3). Tradução: Sérgio Milliet. São Paulo: Livraria Martins, 1940.

DENZER, A. George Löf: Denver's Solar Pioneer. **In: ASES National Solar Conference**. 2012b.

DENZER, A. **The Solar House:** Pioneering Sustainable Design. Rizzoli. 2013.

DENZER, A.; Prefab + Solar at Midcentury. In: **ACSA Fall Conference**. p. 21-27, 2012a.

DIDONÉ, E. L.; PEREIRA, F. O. R. Simulação computacional integrada para a consideração da luz natural na avaliação do desempenho energético de edificações. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, 2010.

DIRETIVA 2010/31/EU. **Do Parlamento Europeu e do Conselho de 19 de maio de 2010 relativa ao desempenho energético dos edifícios (reformulação).** Jornal Oficial - Legislação Europeia, 2010 (55 (153)): p. 13-35.

DIRETIVA 2018/844/EU. **Do Parlamento Europeu e do Conselho de 30 de maio de 2018 que altera a Diretiva 2010/31/UE relativa ao desempenho energético dos edifícios e a Diretiva 2012/27/UE sobre a eficiência energética.** Jornal Oficial - Legislação Europeia, 2018 (156/91): p. 75-91.

DUQUE. K. **Edificio Tartu Rebase Street / Atelier Thomas Pucher & Bramberger.** 2011. Disponível em: https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-106520/edificio-tartu-rebase-street-atelier-thomas-pucher-bramberger. Acesso em: 8 fev. 2018.

ELETROBRAS. **Pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso, ano base 2005:** Classe Residencial Relatório Brasil. Rio de Janeiro: ELETROBRAS; PROCEL, 2007a. 187 p. (Avaliação do Mercado de Eficiência Energética no Brasil).

ELETROBRAS. **Pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso, ano base 2005:** Classe Residencial Relatório Sul. Rio de Janeiro: ELETROBRAS; PROCEL, 2007b. 160 p. (Avaliação do Mercado de Eficiência Energética no Brasil).

ELETROBRAS/PROCEL EDIFICA, INMETRO, CB3E/UFSC. **Introdução ao Programa Brasileiro de Etiquetagem de Edificações**. UFSC. Rio de Janeiro, 2013.

EPE. **Balanço Energético Nacional 2018**: Ano base 2017. Rio de Janeiro: EPE, 2018.

EPE. **BEN - Séries Históricas Completas:** Capítulo 1 (análise energética e dados agregados) 1970-2016.Rio de Janeiro: EPE, 2017a. Disponível em http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/BEN-Series-Historicas-Completas. Acesso em: 10 jan. 2018.

EPE. **Nota Técnica Dea 001/17:** Projeção da demanda de energia elétrica para os próximos 10 anos (2017-2026). Rio de Janeiro: EPE, 2017b.

ESBENSEN, T. V.; KORSGAARD, V. **Dimensioning of the solar heating system in the zero energy house in Denmark**. Solar Energy, v. 19, n. 2, p. 195–199, 1977.

FARIAS, L. M.; SELLITTO, M. A. Uso da energia ao longo da história: evolução e perspectivas futuras. **Revista Liberato**, v. 12, n. 17, p. 07, 2011.

FEIST, W. **The *Passive House* in Darmstadt–Kranichstein during spring, summer, autumn and winter.** Retrieved March, v. 3, p. 2012, 2006.

FENERCOM. **Guía del estándar Passivhaus:** Edificios de consumo energético casi nulo. Madri, 2011.

FICARELLI, L. The domestic architecture in Egypt between past and present: the passive cooling in traditional construction. In: **Proceedings of the Third International Congress on Construction History**. Cottbus: may, 2009.

FIERN. **FIERN e Governo alemão inauguram casa sustentável em Natal nesta segunda, 23.** 2018. Disponível em: https://www.fiern.org.br/fiern-e-governo-alemao-inauguram-casa-sustentavel-em-natal-nesta-segunda-23/. Acesso em: 10 jan. 2019.

FIGUEIREDO, A.; FIGUEIRA, J.; VICENTE, R.; MAIO, R. Thermal Comfort and Energy Performance: sensitivity analysis to apply the *Passive House* concept to the Portuguese climate. **Building and Environment**, v. 103, p. 276-288, 2016.

FIGUEIREDO, A.; KÄMPF, J.; VICENTE, R.; OLIVEIRA, R.; SILVA, T. Comparison between monitored and simulated data using evolutionary algorithms: Reducing the performance gap in dynamic building simulation. **Journal of Building Engineering**, 2018.

FIGUEIREDO, A.; KÄMPF, J; VICENTE, R. *Passive House* Optimization for Portugal: Overheating evaluation and energy performance. **Energy and Buildings**, v. 118, p. 181-196, 2016.

FIGUEIREDO, M. G.; VARUM, H.; COSTA, A. Caracterização das técnicas construtivas em terra edificadas no século XVIII e XIX no centro histórico de São Luís (MA, Brasil). **Arquitetura Revista**. Vol. 7, n. 1, p. 81-93, jan/jun 2011.

FINGERLING, A. **Eine Geschichte der Niedrigenergiehäuser bis zum Passivhaus**. IWU, 1996.

FINOLI, A. M.; GRASSI, L**. Antonio Averlino detto il Filarete. Trattato di Architettura.** Milano, 1972.

FLETCHER, B. **A History of Architecture on the comparative method**. New York, 1945, p. 961.

FOKAIDES, P. A.; CHRISTOFOROU, E.; ILIC, M.; PAPADOPOULOS, A. Performance of a *Passive House* under subtropical climatic conditions. **Energy and Buildings.** 133, 14–31, 2016.

FONSECA, R. S. **Iluminação Elétrica.** São Paulo: Editora McGraw-Hill, 1978.

FRACALOSSI, I. Casa Bertolini / Studioparalelo + MAAM. 2012a. **ArchDaily Brasil**. Disponível em: https://www.archdaily.com.br/17352/casa-bertolini-studioparalelo-mais-maam. Acesso em: 10 mar. 2017.

FRACALOSSI, I. Clássicos da Arquitetura: Hospital Sarah Kubitschek Salvador / João Filgueiras Lima (Lelé). 2012b. **ArchDaily Brasil**. Disponível em: https://www.archdaily.com.br/36653/classicos-da-arquitetura-hospital-sarah-kubitschek-salvador-joao-filgueiras-lima-lele. Acesso em: 10 jul. 2018.

FRACALOSSI, I. Clássicos da Arquitetura: Parque Eduardo Guinle / Lucio Costa. 2011. **ArchDaily Brasil**. Disponível em: https://www.archdaily.com.br/14549/classicos-da-arquitetura-parque-eduardo-guinle-lucio-costa. Acessso: 15 fev. 2018.

FRAMPTON, K. **História crítica da arquitetura moderna.** São Paulo: Martins Fontes, 1997.

FRAMPTON, K. **Le Corbusier**. Ediciones Akal, 2001.

FREITAS, J. M. R.; DALBEM, R., CUNHA, E. G.; KREBS, L. F.; RODRIGUES, M. F. S.; VICENTE, R. Aplicabilidade do conceito *Passivhaus* no contexto brasileiro. In**: IV Simpósio de Pós-Graduação em Engenharia Urbana / I Encontro Nacional de Tecnologia Urbana / II Simpósio de Infraestrutura e Meio Ambiente.** 2015.

FREITAS, J. R; CUNHA, E. G.; SILVA, A. C. S. B.; LEITZKE, R. K. Pontes térmicas em estruturas de concreto armado: análise das condições para formação de fungos filamentosos para zona bioclimática brasileira 2. In: **ENCAC-Encontro Nacional sobre Conforto no Ambiente Construído**. 2017.

FRETIN, D. Arquitetura e energia solar: Há algo de novo? **Revista LABVERDE**, n. 6, p. 40-57, 2013.

FREYRE, G. **Casa-grande & senzala:** formação da família brasileira sob o regime da economia patriarcal. 51. ed. São Paulo: Global, 2006.

FREYRE, G. **Ingleses no Brasil.** 1948.

FREYRE, G. **Sobrados e mucambos:** decadência do patriarcado e desenvolvimento do urbano. 15 ed. rev. São Paulo: Global, 2004. 758 p.

GALVÃO, W.; D'OTTAVIANO, C. A luz na arquitetura e na cidade. **Ciência e Cultura**, v. 67, n. 3, p. 48-50, 2015.

GARDE, F. *et al*. **Enerpos**: a french research program for developing new methods for the design of zero energy buildings in hot climates. Praga. 2007.

GAUZIN-MULLER, D. **Arquitetura Ecológica**. São Paulo. Editora Senac São Paulo, 2011.

GEOSPATIALWORLD**. Watch**: 100 Years of Global Warming in 35 Seconds. 2017. Disponível em: https://www.geospatialworld.net/videos/watch-100-years-global-warming-35-seconds/. Acesso em: 07 fev. 2018.

GIEDION, S. **La mecanización toma el mando.** Barcelona: Gustavo Gili, 1978. p.731.

GILMAN, S. Solar assisted heat pumps. **In Solar Cooling for Buildings Workshop Proceedings.** Los Angeles: Eric, 1974.

GIMPEL, J. **A revolução industrial na Idade Média**. Mem Martins, Portugal, Publicações Europa-América, 1986.

GIOVANNARDI, F. **Enrico Tedeschi, dal sogno alla tragedia Argentina**. Bologna: Editore Patron, 2016.

GIVONI, B. **Man, climate and architecture**. London: Applied, 1981.

GIVONI, B. **Man, climate and arhitecture**. Amsterdam: Elsevier, 1969.

GOLDMAN, C. H. A trajetória da membrana protetora de madeira ao longo da uma história brasileira: tradição e modernidade. In: **III Seminário Docomomo Sul - Madeira: primitivismo e inovação do cone sul Latino Americano 1930-1970**, 2010, Porto Alegre. III Seminário Docomomo Sul - Madeira: primitivismo e inovação do cone sul Latino Americano 1930-1970, 2010. n.p.

GOMES, A. P. **Método de avaliação do desempenho térmico de edifícios comerciais e residências em Light Steel Framing**. 2012. 147 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2012.

GOODWIN, P. L. **Brazil Builds:** Architecture new and old 1652-1942. New York: The Museum of Modern Art, 1943. 198p.

GOSSARD, D.; LARTIGUE, B.; THELLIER, F. Multi-Objective Optimization of a Building Envelope for Thermal Performance Using Genetic Algorithms and Artificial Neural Network. **Energy and Buildings**, Oxford, v. 67, p. 253-260, 2013.

GRISWOLD, W. S. Will Your Next House Get its Heat from the Sun? **Popular Science**, v. 172, n. 2, p. 110-13, 1958.

GRUNOW, E. Lelé: Hospital Rede Sarah, Rio de Janeiro: Transição gradual entre áreas externas e internas. 2009. **Arcoweb**. Disponível em: https://arcoweb.com.br/projetodesign/arquitetura/arquiteto-joao-filgueiras-lima-lele-hospital-rede-sarah-27-10-2009. Acesso em:10 mar. 2018.

GUTIERREZ, G. C. R.; LABAKI, L. C. Considerações sobre o *brise-soleil* na arquitetura moderna brasileira. **ENCAC–Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído e ELACAC-Encontro Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído**, Maceió, AL, 2005.

HÉMERY, D.; BEBIER, J. C.; DELÉAGE, J.-P. **Uma História da Energia.** Brasília: Editora UNB, 2007.

HOLANDA, A. de. **Roteiro para construir no Nordeste.** Recife: MDU/UFPE, 1976.

HOLLADAY, M. **The history of superinsulated houses in north america.** 2010. Vancouver, British Columbia. Disponível em: http://homepage.mac.com/aleaman2/UBToverflow/HolladaySuperinsulationHistory22Sep10.pdf. Acesso em: 2 fev. 2018.

HOROWITZ, F. *et al*. Estratégias para conforto térmico com captação solar em casa-envoltória no (sub) trópico úmido. In: **II Congresso Brasileiro de Energia Solar e III Conferência Regional Latino-Americana da ISES**. 2008.

HOYLE, B. **Low energy building engineering**. World Technologies, 2011.

IEA. **Global Energy & CO2 Status Report:** The latest trends in energy and emissions in 2018. Disponível em: http://www.iea.org/geco/emissions/. Acesso em: 20 mar. 2019.

IEA. **IEA Atlas of Energy**: CO2 Emissions from Fuel Combustion. Disponível em: http://energyatlas.iea.org/#!/tellmap/1378539487/0. Acesso em: 20 jan. 2018b.

IEA. **IEA Atlas of Energy**: Energy Balance. Disponível em: http://energyatlas.iea.org/?subject=-1002896040. Acesso em: 20 jan. 2018a.

INFOHAB. **Prêmio Maurício Roriz.** Disponível em: http://www.infohab.org.br/encac/encac_premio.html. Acesso em: 7 jun. 2018.

INGERSOLL, J. Double-wall house: minimizes heat loss and fuel bills. **Popular Science**, New York, v 217, n. 4, p. 40, out. 1980.

INSTITUTO CLIMA E SOCIEDADE (ICS). **Edifícios de Baixo Carbono no Brasil**: Aspectos e Subsídios para Programas Nacionais. São Paulo, 2017.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL - INMETRO. **Manual para Aplicação do RTQ-R**. Eletrobras, Inmetro, 2012a.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL - INMETRO. **Manual para Aplicação do RTQ-C.** Eletrobras, Inmetro, 2013a.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL - INMETRO. **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas, RTQ-C.** Eletrobras, Inmetro, 2013b.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL - INMETRO. **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais, RTQ-R**. Eletrobras, 2012b.

International Building Performance Simulation Association - USA (IBPSA-USA). **Best Directory**. Disponível em: https://www.buildingenergysoftwaretools.com/. Acesso em: 20 mar. 2018.

IONESCU, C.; BARACU, T; VLAD, G.-E., NECULA, H., BADEA, A. The historical evolution of the energy efficient buildings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 49, p. 243-253, 2015.

IPHA. **Active for More Comfort:** *Passive House*. Darmstadt, v. 2, 2014.

IPHAE-RS. **Bem tombado:** Casa de Azulejos. Disponível em: http://www.iphae.rs.gov.br/Main.php?do=BensTombadosDetalhesAc&item=15627. Acesso em: 20 maio 2018.

JONES, G. G.; BOUAMANE, L. **Power from Sunshine**: A Business History of Solar Energy. 2012.

KÄMPF, J.H.; WETTER, M.; ROBINSON, D. A comparison of global optimization algorithms with standard benchmark functions and real-world applications using EnergyPlus. **Journal of Building Performance Simulation.** Simul. 2010, 3, 103–120.

KÄMPF, J. H.; ROBINSON, D. A hybrid CMA-ES and HDE optimisation algorithm with application to solar energy potential. **Applied Soft Computing,** v. 9, n. 2, p. 738-745, 2009.

KARAWITZ ARCHITECTURE. 2010. **ArchDaily World.** Disponível em: https://www.archdaily.com/84165/passive-house-karawitz-architecture/. Acesso em: 7 de jun. 2018.

KATINSKY, J. As máquinas e as cidades. In: **A invenção da máquina a vapor.** São Paulo, FAU USP, 1976.

KEELER, M.; BURKE, B. **Fundamentos de projeto de edificações sustentáveis**. Porto Alegre: Grupo A-Bookman, 2010.

KLEPEIS, N. E. *et al*. The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): a resource for assessing exposure to environmental pollutants. **Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology**, v. 11, n. 3, p. 231, 2001.

KOWALTOWSKI, D.; SKUBS, D.; WATRIN, V. O Papel da Varanda no Conforto de Moradias Autoconstruídas. **ENCAC-Encontro Nacional Sobre Conforto No Ambiente Construído**, v. 7, n. 2003, p. 1452-1453, 2003.

KRÜGER, E. Tecnologias Apropriadas e o Conforto Ambiental. In: **Coletânea Educação & Tecnologia - CEFET-PR:** Tecnologias Apropriadas. Curitiba, 2000. cap. 7. p. 61-70.

KWOK, A. G.; GRONDZIK, W. T. Manual de arquitetura ecológica. **Tradução técnica: Alexandre Salvaterra**, v. 2, 2013.

LABCON. **LabCon – Laboratório de Conforto Ambiental UFRGS.** Disponível em: https://www.ufrgs.br/labcon/. Acesso em: 3 mar. 2017.

LABEEE. **Laboratórios**. Disponível em: http://www.labeee.ufsc.br/projetos/etiquetagem/desenvolvimento/laboratorios. Acesso em: 20 mar. 2018.

LABEEE. **Simulação Termo-energética de Edificações**. Disponível em: http://www.labeee.ufsc.br/linhas-de-pesquisa/simulacao-termo-energetica-de-edificacoes. Acesso em: 3 maio 2017.

LABEEE. Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil. **Analysis Sol-Ar.** Versão 6.2. 2009. Disponível em: http://www.labeee.ufsc.br/downloads/softwares/analysis-sol-ar. Acesso em: 10 jan. 2018.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura.** 3ª edição. Eletrobras. 2014.

LAMBERTS, R.; GHISI, E.; PEREIRA, C. D.; BATISTA, J. O. **Casa eficiente: Bioclimatologia e desempenho térmico.** Florianópolis: UFSC/LabEEE; 2010.v. 1 (123 p.).

LECHNER, N. **Heating, cooling, lighting**: Sustainable design methods for architects. John wiley & sons, 2014.

LEE, A.; SPIEGELHALTER, T. Designing carbon neutral plus-energy-buildings with site adaptive heliotropism cycles. In: **WREF2012 World Solar 2012.** Conference, Denver, Colorado. 2012.

LEMOS, C. A. C. **Arquitetura brasileira.** São Paulo: Melhoramento, 1979.

LEMOS, C. A. C. Organização urbana e arquitetura em São Paulo dos tempos coloniais. In: **História da Cidade de São Paulo – a cidade colonial**. Volume 1. São Paulo, Paz e Terra, 2004, p. 145.

LEMOS, C. A. C. Transformações do espaço habitacional ocorridas na arquitetura brasileira do século XIX. In: **Anais do Museu Paulista**. São Paulo: Universidade de São Paulo, n. 1, 1993. p. 95-106.

LEMOS, C. A. C. Uma nova proposta de abordagem da história da arquitetura brasileira**. Arquitextos**, São Paulo, ano 12, n. 141.00, Vitruvius, fev. 2012 Disponível em: http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/arquitextos/12.141/4214. Acesso em: 20 mar. 2017.

LIMA, C. M.; ALBERNAZ, M. P. **Dicionário ilustrado de arquitetura**. ProEditores, 1998. Vol. I A a I 316p. il.

LIMA, F.; KOS, J. R.; MONTENEGRO, N. Otimização multi-objetivo e Desenvolvimento Orientado pelo Transporte: algoritmos evolutivos em estratégias de planejamento urbano. **Blucher Design Proceedings**, v. 3, n. 1, p. 601-608, 2016.

LOFTNESS, V.; HAASE, D. **Sustainable Built Environments**. Springer, 2013.

LOGAN, P. Local Engineer Helped Build Solar Office Building. **Albuquerque Journal.** NM. p. B4. 2005. Disponível em: https://www.abqjournal.com/obits/profiles/324613profiles03-18-05.htm. Acesso em: 10 jan. 2018.

LUCCAS, L. H. H. Arquitetura Moderna em Porto Alegre (Parte I): Antecedentes e a linhagem Corbusiana dos anos 50. 2016a. **ArchDaily Brasil**. Disponível em: https://www.archdaily.com.br/br/790990/arquitetura-moderna-em-porto-alegre-antecedentes-e-a-linhagem-corbusiana-dos-anos-50-luis-henrique-haas-luccas. Acesso em: 7 jun. 2018.

LUCCAS, L. H. H. Arquitetura Moderna em Porto Alegre (Parte II): Entre o “Estilo Internacional" e o padrão brutalista nos anos 60/70. 2016b. **ArchDaily Brasil**. Disponível em: https://www.archdaily.com.br/br/791414/arquitetura-moderna-em-porto-alegre-parte-ii-entre-o-estilo-internacional-e-o-padrao-brutalista-nos-anos-60-70. Acesso em: 7 jun. 2018.

LUCCAS, L. H. H. Estâncias e fazendas: uma contribuição ao estudo da arquitetura tradicional riograndense. São Paulo, ano 06, n. **Arquitextos** 071.05, Vitruvius, abr. 2006. Disponível em: http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/arquitextos/06.071/363. Acesso em: 10 mar. 2018.

MACIEL, C. e LUCZYSZYN, S. Inspiração: Ruy Ohtake. 2012. **Gazeta do Povo**. 2014. Disponível em: https://www.gazetadopovo.com.br/imoveis/inspiracao-ruy-ohtake-por-cristiane-maciel-e-sony-luczyszyn-efcaxpbj2d1tbb2kqeqhq0thq>. Acesso em: 10 jul. 2018.

MAGNIER, L.; HAGHIGHAT, F. Multiobjective Optimization of Building Design Using TRNSYS Simulations, Genetic Algorithm, and Artificial Neural Network. **Building and Environment**, v. 45, p. 739-746, 2010.

MARAGNO, G. V. **Eficiência e forma do brise-soleil na arquitetura de Campo Grande – MS**. 2000. Dissertação de mestrado (Programa de Pós-graduação em Arquitetura), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

MARAGNO, G. V. **Sombras Profundas:** Dimensión Estética y Repercusión Ambiental del Diseño de la Varandaen la Arquitectura Brasileña. 2010. 507 f. Tese (Doutorado em Arquitetura) – Universitat Politècnica de Catalunya, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona, Barcelona, 2010.

MARCELINO, J.; GAVIÃO, J. Introdução a *Passive House* no Brasil. In: **Workshop *Passive House*.** Aveiro, Portugal, 2019.

MARCHETTI BONETTI. Residência das Algas / MarchettiBonetti. 2015. **ArchDaily Brasil**. (Trad. Delaqua, Victor). Disponível em: https://arcoweb.com.br/projetodesign/arquitetura/arquiteto-joao-filgueiras-lima-lele-hospital-rede-sarah-27-10-2009. Acesso em: 10 jul. 2017. ISSN 0719-8906

MARIANNO FILHO, J. **Influencias muçulmanas na architectura tradicional brasileira.** Rio de Janeiro: Editora A Noite, 1943. 80 p.

MARKUS, T. A.; MORRIS, E. N. **Buildings, climate, and energy**. Pitman Pub., 1980.

MARTINO, J. A. **Algoritmos evolutivos como método para desenvolvimento de projetos de arquitetura.** Campinas, 2015. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, 2015.

MARTINS, P. **Desenhos digitais.** Foz do Iguaçu-PR, 2019.

MASCARÓ, J. L.; MASCARÓ, L. L. **Manual de recomendações para minimização dos consumos energéticos dos edifícios.** Porto Alegre, 1985.

MASCARÓ, L. E. A. R. **Inovação tecnológica e produção arquitetônica.** 1990. Tese de Doutorado. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1990.

MASCARÓ, L. R. De. **Luz, clima e arquitetura.** 3. ed. – São Paulo: Nobel, 1983.

MATOS, B. F. C.; BARBOSA, M. T. G.; CASTAÑON, J. A. B. A relação entre as técnicas, materiais e conforto ambiental na concepção da arquitetura Luso-Brasileira. In: **Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis**, p. 115 - 127. Portugal: Universidade do Minho, 2014.

MAZRIA, E. **The passive solar energy book.** 1979.

MCLEOD, R.; MEAD, K.; STANDEN, M. **Passivhaus Primer**: designer's guide: a guide for the design team and local authorities. Reino Unido: Passivhaus, 2011.

MELLO, E. K. de. **A herança mourisca da arquitetura no Brasil.** São Paulo: AU, 1973. 85 p.

MEMÓRIA DA ELETRICIDADE. **História do Setor Elétrico.** 2017. Disponível em: http://portal.memoriadaeletricidade.com.br/historia-do-setor-eletrico/. Acesso em: 10 jul. 2018.

MENDES, C.; VERÍSSIMO, C.; BITTAR, W. **Arquitetura no Brasil: de Cabral a Dom João VI**. Rio de Janeiro: Imperial Novo Milênio, 2011b.

MENDES, C.; VERÍSSIMO, C.; BITTAR, W. **Arquitetura no Brasil: de Dom João VI a Deodoro**. Rio de Janeiro: Imperial Novo Milênio, 2011a.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Guia prático de eficiência energética: reunindo a experiência prática do projeto de etiquetagem:** Ministério do Meio Ambiente e Ministério da Cultura. Brasília: MMA, 2014. 93 p.

MIOTTO, J. L. Evolução das esquadrias de madeira no Brasil. **UNOPAR Científica Ciências Exatas e Tecnológicas.** Londrina, v. 1, n. 1, p. 55-62, nov. 2002.

MIT LIBRARIES. **MIT Buildings:** Solar Houses. Disponível em: http://libguides.mit.edu/c.php?g=175920&p=116031. Acesso em: 30 nov. 2018.

MIT SOLAR DECATHLON TEAM. **History.** Disponível em: http://web.mit.edu/solardecathlon/history.html. Acesso em: 30 nov. 2018.

MITCHELL, J. A., BASSO, M. Transferencias realizadas por el LAHV en edificios y viviendas sociales bioclimáticas. **Los edificios bioclimáticos en los países de Ibero América. INETI, CYTED**, 2005 p. 179 – 196.

MOITA, F. **Energia Solar Passiva**. Argumentum, 2011.

MONTEIRO, P. G. Edifício de Escritórios / Mobil Arquitectos + Cruz & Browne arquitectos. **ArchDaily Brasil.** 2012. Disponível em: https://www.archdaily.com.br/63055/edificio-de-escritorios-mobil-arquitectos-mais-cruz-e-browne-arquitectos. Acesso em: 8 fev. 2018.

MONTENEGRO, G. **Ventilação e cobertas.** São Paulo: Edgard Blücher. 128p, 1984.

MONTERO, J. I. P. **Interação da ventilação natural, mecânica e climatização:** estudo do Hospital Sarah Kubitschek Fortaleza, do arquiteto João Filgueiras Lima, Lelé. 2006. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

MOWAARQ. **Residência J15**. 2017. Disponível em: http://www.mowaarq.com/projeto/residencia-j15. Acesso em: 10 jun. 2018.

NICOLAU, M. F.; CHVATAL, K.M.S. Análise de programas computacionais simples de apoio a projetos bioclimáticos. **XIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído.** Canela. In Anais do ENTAC, 2010

OLGYAY, V. **Design with Climate.** N.J Princeton University, 1963.

OLIVEIRA, L. S. **Avaliação dos limites das propriedades térmicas dos fechamentos opacos da NBR 15220-3, para habitações de interesse social, da zona bioclimática 2** (Dissertação de Mestrado) Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2012.

OLIVEIRA, R.;FIGUEIREDO, A.;VICENTE, R.;ALMEIDA, R. Multi-Objective Optimisation of the Energy Performance of Lightweight Constructions Combining Evolutionary Algorithms and Life Cycle Cost. **Energies**, v. 11, 2018.

PACHECO, M. T.G. **Ventilação Natural e climatização artificial:** crítica ao modelo superisolado para residência de energia zero em Belém e Curitiba. 2013. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

PARENTE, J. M. N.; RANGEL, B.; MARTINS, J. P.; PINHEIRO, L. T. Algoritmos Evolutivos Integrados à Simulação Termo-Energética em Arquitetura: Uma Análise de 20 Anos de Publicações. **Construção 2018-Reabilitar e Construir de Forma Sustentável**, 2018.

PARKER, D. S. Very low energy homes in the United States: Perspectives on performance from measured data. **Energy and buildings**, v. 41, n. 5, p. 512-520, 2009.

PASSIPEDIA. **Classic, Plus, Premium**: The new *Passive House* classes and how they can be reached. Disponível em: https://passipedia.org/certification/passive_house_categories/classic-plus-premium. Acesso em: 20 mar. 2018.

PASSIVE HOUSE DATA BASE. ***Passive House* Database**. Disponível em: http://www.passivhausprojekte.de/index.php?lang=en#d_2959. Acesso em: 20 mar. 2018.

PASSIVE HOUSE INSTITUTE. **Criteria for the *Passive House*, EnerPHit and PHI Low Energy Building Standard.** 2016. Disponível em: http://www.passiv.de/downloads/03_building_criteria_en.pdf. Acesso em: 8 ago. 2017

PASSIVE-ON. **A Norma Passivhaus em Climas Quentes da Europa:** Diretrizes de Projeto para Casas Confortáveis de Baixo Consumo Energético: Parte 1. Revisão de casas confortáveis de baixo consumo energético. 2007.

PEIXOTO, M. S. Sistemas de proteção de fachadas na escola carioca: de 1935 a 1955. **Arquitexto**, Porto Alegre, n. 2, p. 122-137, 2002.

PEREIRA, H. A. C.; MELO; A. P.; SORGATO, M. J. VERSAGE, R.; MATOS, M.; LAMBERTS, R. **Manual de simulação computacional de edifícios naturalmente ventilados no programa *EnergyPlus*** – Versão 8.0. Florianópolis, 2013.

PERLIN, J. **Let It Shine**: The 6,000-Year Story of Solar Energy. New World Library, 2013.

PHI. **Component Database.** Disponível em: https://database.passivehouse.com/en/components/list/window. Acesso em: 2 fev. 2019a.

PHI. **Map of Certified *Passive House* Buildings**. Disponível em: https://database.passivehouse.com/buildings/map. Acesso em: 20 mar. 2019b.

PHI. ***Passive House* Award.** Darmstadt: PHI, 2014.

PIÑÓN, H. **Teoria do Projeto** (trad. de Edson Mahfuz). Porto Alegre: Livraria do Arquiteto, 2006.

PINTO, E. **Muxarabis & balcões e outros ensaios.** São Paulo: Companhia Editora Nacional, 1958. 362 p.

PISANI, M. A. J. **Taipas: arquitetura de terra. CFG Brasil:** Cultura Y Arquitectura de La Diversidad [Online], 2007. Disponível em: http://www.ceap.br/material/MAT02092011153149.pdf. Acesso em: mar. 2017.

POVOS INDÍGENAS NO BRASIL. **Habitations**. Disponível em: https://pib.socioambiental.org/en/c/no-brasil-atual/modos-de-vida/habitacoes. Acesso em: 3 maio 2017b.

POVOS INDÍGENAS NO BRASIL. **Localização e população.** Disponível em: https://pib.socioambiental.org/pt/povo/yanomami/569. Acesso em: 3 maio 2017a.

PRADO, A. L. Em busca da pertinência para uma arquitetura tropical. **MDC Revista de Arquitetura e Urbanismo**. Belo Horizonte, n. 1/3, p. 10-13, 2006.

PROCEL INFO – CENTRO BRASILEIRO DE INFORMAÇÃO de EFICIÊNCIA ENERGÉTICA. **Etiquetagem em Edificações.** Disponível em: http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View={89E211C6-61C2-499A-A791-DACD33A348F3}. Acesso em: 20 mar. 2018.

PROJETEEE. **Componentes construtivos.** 2019. Disponível em: http://projeteee.mma.gov.br/componentes-construtivos/. Acesso em: 7 jan. 2019.

QUADRO DO PAISAGISMO NO BRASIL - QUAPÁ FAUUSP. **Levantamento fotográfico em Uberlândia**. São Paulo, 2013.

RABBAT, R. M. de C. **Introdução ao desenvolvimento de esquadrias (janelas) de madeira de eucalipto para habitação de interesse social.** São Paulo, 1988. 90p. (Relatório parcial de pesquisa nº 1, IPT).

RAMOS, F. G. V. Os tratados do século XX: edições especiais. **Revista Arq. urb nº5**, 1º Semestre de, p. 55-74, 2011.

REBELLO, Y.; LEITE, M. A. D'A. Arquiteturas e estruturas: As primeiras moradias. **Revista AU**. Edição 161, p. 179 – 196. 2007.

REIS FILHO, N. G. **Quadro da arquitetura no Brasil.** 11. ed. São Paulo: Perspectiva, 2006.

Revista Acrópole. **Edifício Avenida Central.** n. 277. São Paulo: Max Gruenwald, 1961.

RIVERO, R. **Arquitetura e clima:** acondicionamento térmico natural. Porto Alegre: D. C. Luzzato, 1985.

ROBRAHN-GONZÁLEZ, E. M.; ZANETTINI, P. São Raimundo Notato, Piauí: o início do povoamento. In: **Arqueologia Brasileira**. Disponível em: http://www.itaucultural.org.br/arqueologia/. Acesso em: 10 mar. 2017.

RODRIGUES, J. W. **Documentário arquitetônico**. São Paulo: Livraria Martins, 1944.

RODRIGUES, T. F. A população portuguesa. Das longas permanências à conquista da modernidade. **População e Sociedade**, p. 21, 2010.

ROHDE, G. M. Arquitetura espontânea no Rio Grande do Sul. In: WEIMER, G. (Org.). **A arquitetura no Rio Grande do Sul.** Porto Alegre: Mercado Aberto, 1987.

ROMERO, M. A**. Arquitetura, Comportamento e Energia**: análise do desempenho energético e do nível de satisfação do usuário em edifícios de escritórios na cidade de São Paulo, utilizando-se procedimentos da avaliação pós-ocupação. São Paulo, Tese de Livre-Docência apresentada a FAUUSP, 1997.

RORIZ, M. **ZBBR versão 1.1**: Programa Zoneamento Bioclimático Brasileiro. UFSCAR, 2004. Disponível em: http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/softwares/ZBBR.zip. Acesso em: 20 fev. 2019.

RORIZ. M. **Base de dados climáticos de 411 municípios brasileiros**: Arquivos em formato de EPW (Energyplus Weather Data). 2012. Disponível em: http://www.roriz.eng.br/epw_9.html. Acesso em: 10 jun. 2018.

ROSENFELD, E. *et al*. Proto-bioclimatic buildings in Argentina: three relevant examples. **Ambiente Construído**, v. 7, n. 3, p. 7-21. 2007.

ROSENFELD, E.; GUERRERO, J. L.; RAVELLA, O. **La casa solar de La Plata**. 2009.

ROTH, L. M. **Entender la arquitectura**: sus elementos, historia y significado. Barcelona: Gustavo Gili, 2007.

RUBY, D. Super-insulated houses. Airtight double walls mean near-zero heat loads; in: **Popular Science**, may 1981.

SANTOS, L. G. R.; *et al*. Simulação computacional termoenergética na arquitetura. Avaliação do desempenho térmico de uma edificação de ensino localizada em Brasília DF. **Arquitextos**, São Paulo, ano 17, n. 203.04, Vitruvius, abr. 2017. Disponível em:http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/arquitextos/17.203/6525. Acesso em: 24 mai. de 2018.

SCALCO, V. A. *et al*. Innovations in the Brazilian regulations for energy efficiency of residential buildings. **Architectural Schience Review**. v. 55, n. 1, 71-92, 2012.

SCHNIEDERS, J.; FEIST, W.; RONGEN, L. *Passive House*s for different climate zones. **Energy and Buildings**, v. 105, p. 71-87, 2015.

SERRA, F. R. **Les energies a l'arquitectura:** principis de control ambiental arquitectònic. Barcelona: UPC, 1993.

SEVERO, R. A arte tradicional no Brasil: a casa e o templo. In: **Sociedade de cultura artística.** Conferências *1914-1915*. São Paulo: Tipographia Levi, 1916.

SHC/IEA. **Net Zero Energy Solar Buildings**. Disponível em: http://task40.iea-shc.org/. Acesso em: 20 mar. 2018.

SHERMAN, M. The Use of Blower-Door Data. **Energy Performance of Buildings Group, National Lawrence Berkeley Laboratory**. California: 1998.

SHICK, W. L.; JONES, R. A. **Council notes.** Volume 1 Number 4 Spring, The Board of Trustees of the University of Illinois Material in this publication: 1976.

SHURCLIFF, W. A. **Super Insulated Houses and Air-to-air Heat Exchangers**. Brick House Publishing Company, 1988.

SHURCLIFF, W. A. **Super insulated houses and double envelope houses:** a survey of principles and practice. 1981.

SILVA, H. C.; KINSEL, L. S. Região climática de Porto Alegre–revisão para um desenho inteligente e uma arquitetura adequada. **Arqtexto**. n. 9 (2006), p. 124-133, 2006.

SMITH, P. **Architecture in a climate of change**. Oxford: Routledge. 2012.

SOUZA, H. M. P. de. O conforto ambiental na arquitetura colonial brasileira: heranças muçulmanas. **ARCHITECTON-Revista de Arquitetura e Urbanismo**, v. 2, n. 3, 2012.

STAHL, W.; VOSS, K.; GOETZBERGER, A. The self-sufficient solar house in Freiburg. **Solar Energy**, v. 52, n. 1, p. 111-125, 1994.

STEPLER, R**. Solar lab: soaks** up sunshine with neu materials. **Popular Science**, New York, v 212, n. 6, p. 96-98, jun. 1978.

STEWARD, J. H. **Handbook of South American Indians**: The comparative ethnology of South American Indians. Cooper Square Publishers, 1963.

STRENGERS, Y.; MALLER, C. Integrating health, housing and energy policies: social practices of cooling. **Building Research & Information**, v. 39, n. 2, p. 154–168, 2011.

TEIXEIRA FILHO, W. S. **Utilização do Cobogó para Conforto Térmico – Estudo de Caso:** Reforma do Instituto Philippe Pinel – Prédio "C", Dissertação de mestrado (Programa de Pós-Graduação em Arquitetura), 1995. – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1995.

TEIXEIRA, C. M. Considerações sobre a arquitetura vernácula. **Cadernos de Arquitetura e Urbanismo**, v. 15, n. 17, p. 28-45, 2008.

TEIXEIRA, R. B. Arquitetura vernacular. Em busca de uma definição. **Arquitextos**, São Paulo, ano 17, n. 201.01, Vitruvius, fev. 2017. http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/arquitextos/17.201/6431. Acesso em: 20 mar. 2018.

TERZIDIS, K. **Algorithmic architecture**. Oxford: Elsevier, 2009.

TESSMER, H. Uma síntese histórica da evolução do consumo de energia pelo homem. **Revista Liberato**, v. 3, n. 3, 2002.

TUBELO, R. C. S.; RODRIGUES, Lucelia T.; GILLOTT, M. A Comparative Study of the Brazilian Energy Labelling System and the Passivhaus Standard for Housing. **Buildings**, v. 4, p. 207-221, 2014.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY (DOE). **EnergyPlus™ Version 9.0.1 Documentation**: Getting Started. 2018b.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY (DOE). **EnergyPlus™ Version 9.0.1 Documentation**: Application Guide for EMS. 2018a.

VALE, B.; VALE, R. **La casa autónoma**: diseño y planificación para la autosuficiencia. Editorial Gustavo Gili, 1978.

VALÉRIO, J. G. M. A. P. **Avaliação do Impacte das Pontes Térmicas no Desempenho Térmico e Energético de Edifícios Residenciais Correntes.** 2007. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2007.

VERÍSSIMO, F. S.; BITTAR, W. S. M. **500 anos da casa no Brasil:** as transformações da arquitetura e da utilização do espaço de moradia. Rio de Janeiro: Ediouro, 1999.

VETTORAZZI, E. **Adaptabilidade do conceito *Passivhaus* para projeto de edificações nas oito**

zonas bioclimáticas brasileiras – desenvolvimento e avaliação da tecnologia construtiva e da viabilidade econômica. Foz do Iguaçu - PR, 2013b. Disponível em: www.goo.gl/WLt3Kd. Acesso em: 10 mar. 2018.

VETTORAZZI, E. **Levantamento fotográfico.** Porto Alegre – RS, 2017.

VETTORAZZI, E. **Levantamento fotográfico.** Porto Alegre – RS, 2018.

VETTORAZZI, E. **Levantamento fotográfico.** Rio de Janeiro - RJ, 2013a.

VIEIRA, A.; BORBA, C.; RODRIGUES, J. **Cobogó de Pernambuco.** RECIFE, 2012.

WANDERLEY, I. M. **Azulejo na arquitetura brasileira: os painéis de Athos Bulcão**. 2006. Dissertação de Mestrado (Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

WASSOUF, M. **Da casa Passiva a norma *PassivHaus*:** A arquitetura passiva em climas quentes. Barcelona: Gustavo Gili, 2014.

WEBER, F. S.; MELO, A. P.; MARINOSKI, D. L.; GUTHS, S.; LAMBERTS, R. **Desenvolvimento de um modelo equivalente de avaliação de propriedades térmicas para a elaboração de uma biblioteca de componentes construtivos brasileiros para uso no programa EnergyPlus.** 2017.

WEIMER, G. **Arquitetura popular brasileira.** São Paulo: Martins Fontes, 2012.

WEIMER, G. **Evolução da arquitetura indígena.** IHGB-RS: Porto Alegre, 2014a. n.p.

WEIMER, G. **Inter-relações afro-brasileiras na arquitetura**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2014b.

WHITE., L. Jr. Tecnologia e invenções na Idade Média. In: GAMA, R. (Org.). **História da técnica e da tecnologia** (textos básicos). São Paulo: T. A. Queiroz, EDUSP, 1985.

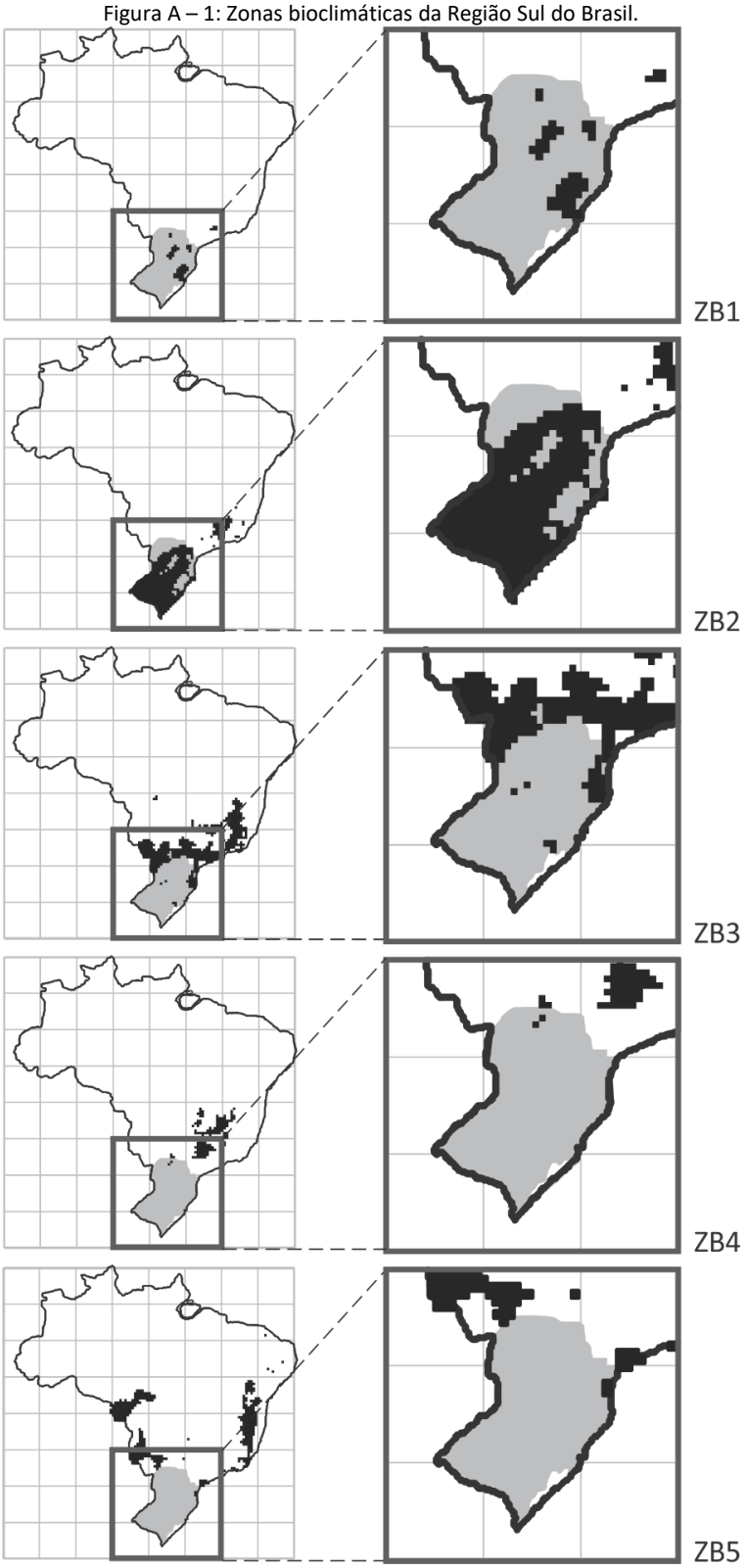
WISNIK, G. **Lucio Costa.** São Paulo: Cosac Naify, 2001.

YÁÑEZ, G. **Arquitectura solar**. Aspectos pasivos bioclimatismo e iluminación natural. Madrid: MOPU, 1988.

ZANINI, W. (org.). **História Geral da Arte no Brasil.** 2 Vols. São Paulo: Instituto Moreira Sales, 1983.

APÊNDICE A: REGIÃO SUL DO BRASIL: ZONAS BIOCLIMÁTICAS ZB1, ZB2 E ZB3

Figura A – 1: Zonas bioclimáticas da Região Sul do Brasil.



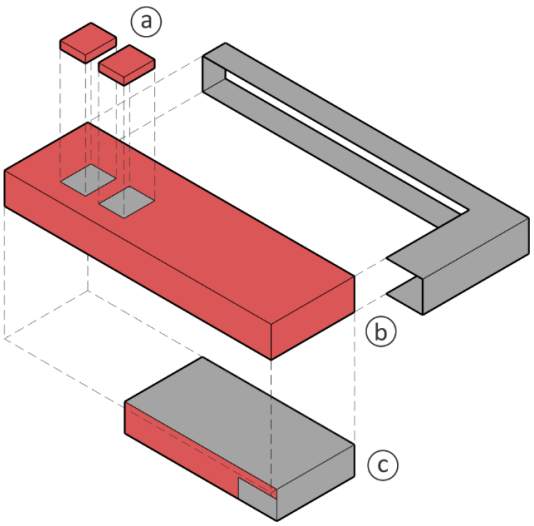
Obs.: As cidades mais representativas da Região Sul do país em termos populacionais estão nas zonas bioclimáticas ZB1, ZB2, ZB3. Entre elas é possível destacar: Curitiba/PR e Caxias do Sul/RS na ZB1; Porto Alegre/RS Florianópolis/SC na ZB3 e Ponta Grossa/PR e Pelotas/RS na ZB2. Na ZB4 há cidades como Colorado/PR, Lobado/PR e na ZB5 destaca-se a cidade de Joinville/SC (RORIZ, 2004).

Fonte: adaptado de ABNT, 2005.

APÊNDICE B: FATOR DE FORMA (FF) E COMPACIDADE (C)

Figura B – 1: Fator de Forma (FF) e Compacidade (C).

Residência ZB1

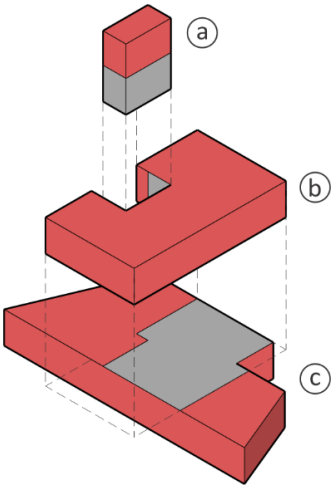


a) Ae = 24,48 m²
Au = 0,00 m²
V = 7,67 m³
b) Ae = 336,50 m²
Au = 164,33 m²
V = 455,35 m³
c) Ae = 36,38 m²
Au = 89,57 m²
V = 214,97 m³

Ae total = 397,36 m²
Au total = 253,90 m²
V total = 677,99 m³

FF = 1,49
C = 0,58

Residência ZB2

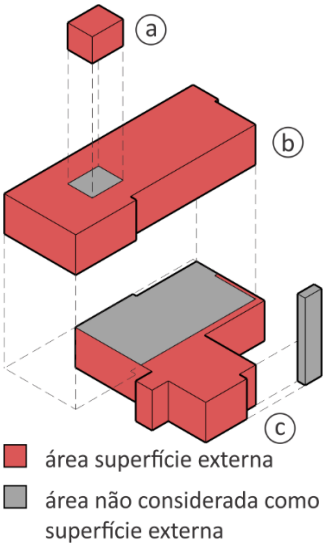


a) Ae = 49,34 m²
Au = 0,00 m²
V = 41,89 m³
b) Ae = 230,70 m²
Au = 90,08 m²
V = 41,89 m³
c) Ae = 230,70 m²
Au = 90,08 m²
V = 247,5 m³

Ae total = 514,14 m²
Au total = 236,02 m²
V total = 690,72 m³

FF = 2,17
C = 0,74

Residência ZB3



a) Ae = 24,63 m²
Au = 0,00 m²
V = 11,18 m³
b) Ae = 260,13 m²
Au = 79,84 m²
V = 279,15 m³
c) Ae = 168,40 m²
Au = 86,63 m²
V = 259,89 m³

Ae total = 453,16 m²
Au total = 166,47 m²
V total = 550,22 m³

FF = 2,72
C = 0,82

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

APÊNDICE C: TABELAS DE PROPRIEDADE DOS MATERIAIS

Tabela C - 1: Propriedades dos materiais da Residência ZB1.

Elementos construtivos		**e** (m)	**λ** (W/(m.°C))	**p** (kg/m³)	**C** (kJ/kg-K)	**Rt** (m²/W.°C)	**U** (W/(m².°C))	**Ct** (kJ/m²K)	**α*** (adim.)
Cobertura	Telha metálica	0,001	112	7.100	0,38	0,00001			
Rsi = 0,17	Poliuretano	0,04	0,04	30	1,42	1,00			
Rse =0,04	Telha metálica	0,001	112	7.100	0,38	0,00	0,67	250,5	0,25
	Camada de ar	> 0,05	-	-	-	0,21			
	Laje Concreto	0,1	1,75	2.200	1	0,06			
	Reboco (arg.)	0,02	1,15	1.800	1	0,02			
Laje entrepiso social	Laminad Madeira	0,007	1,2	400	2,3	0,006			
Rsi= 0, 10	EPS	0,005	0,04	20	1,42	0,125			
Rse = 0,04	Contrapiso (arg.)	0,02	1,15	1.800	1	0,017	2,76	295,162	0,9
	Laje Concreto	0,1	1,75	2.200	1	0,057			
	Reboco (arg.)	0,02	1,15	1.800	1	0,017			
Laje entrepiso serv.	Porcelanato	0,007	1,3	2300	0,965	0,01			
Rsi = 0,10	EPS	0,005	0,04	20	1,42	0,13			
Rse = 0,04	Contrapiso (arg.)	0,02	1,15	1.800	1	0,02	2,76	308,46	0,2
	Laje Concreto	0,1	1,75	2.200	1	0,06			
	Reboco (arg.)	0,02	1,15	1.800	1	0,02			
Laje Subsolo	Porcelanato	0,007	1,3	2300	0,965	0,01			
Rsi = 0, 10	EPS	0,005	0,04	20	1,42	0,13	2,90	271,678	0,2
Rse = 0,04	Contrapiso (arg.)	0,02	1,15	1.800	1	0,02			
	Laje Concreto	0,1	1,75	2.200	1	0,06			
Parede Ext. Dupla	Reboco (arg.)	0,025	1,15	1.800	1				
Rsi = 0,13	Tij. cer. 6 furos 9x14x24	0,09	-	-	-				
Rse = 0,04	Camada de ar	0,04	-	-	-	0,79	1,27	195	0,2
	Tij. cer. 6 furos 9x14x24	0,09	-	-	-				
	Reboco (arg.)	0,025	1,15	1.800	1				
Parede Ext. Concreto	Concreto	0,30	1,75	2.200	1	0,34	2,93	660	0,85
Parede Ext. simples	Reboco (arg.)	0,025	1,15	1.800	1	0,02			
Rsi=0,13	Tij. cer. 6 furos 9x14x24	0,14	-	-	-	0,26	2,11	146	0,2
Rse=0,04	Reboco (arg.)	0,025	1,15	1.800	1	0,02			
Paredes Int.	Reboco (arg.)	0,025	1,15	1.800	1				
Rsi = 0,13	Tij. cer. 6 furos 9x14x24	0,09	-	-	-	0,37	2,72	98	0,2
Rse = 0,04	Reboco (arg.)	0,025	1,15	1.800	1				
Portas	Madeira								
Rsi = 0,13		0,03	0,12	400	2,3	0,25	2,38	27,6	0,7
Rse = 0,04									
Janelas*	Vidro duplo incolor								
Rsi = 0,13	(6 + 14 + 4mm)	0,024	0,36	-	-	0,36	2,8	-	0,1
Rse = 0,04	FS = 0,75								

e=espessura; **λ=Condutividade Térmica:** "Propriedade física de um material (...) no qual se verifica um fluxo de calor constante, com densidade de 1 W/m², quando submetido a um gradiente de temperatura uniforme de 1 K/m"; **p=Densidade de Massa Aparente:** "Quociente da massa pelo volume aparente de um corpo"; **c=Calor Específico:** "Quociente da capacidade térmica pela massa"; **Rt=Resistência Térmica**: "Quociente da diferença de temperatura verificada entre as superfícies de um elemento ou componente construtivo pela densidade de fluxo de calor, em regime estacionário"; **U=Transmitância Térmica:** "Inverso da resistência térmica"; **CT=Capacidade Térmica**: "Quantidade de calor necessária para variar em uma unidade a temperatura de um sistema"; **α=Absortância Solar:** "Quociente da taxa de radiação solar absorvida por uma superfície pela taxa de radiação solar incidente sobre esta mesma superfície" (ABNT, 2005, p. 2-3).

*tipo de superfície correspondente aos valores: 0,25 = chapa de aço galvanizada (nova e brilhante); 0,9 = cor de madeira; 0,2 = pintura ou revestimento branco; 0,7 = cor de madeira; 0,1 = vidro incolor; 0,85 = concreto aparente.

Fonte: Dados calculados com base na ABNT, 2005.

Tabela C - 2: Propriedades dos materiais da Residência ZB2.

Elementos construtivos		e (m)	λ (W/(m.°C))	p (kg/m³)	C (kJ/kg-K)	Rt (m²/W.°C)	U (W/(m².°C))	CT (kJ/m²K)	α* (adim.)
Cobertura	Telha metálica	0,001	112	7.100	0,38	0,00001			
Rsi=0,17	Poliuretano	0,04	0,04	30	1,42	1,00			
Rse =0,04	Telha metálica	0,001	112	7.100	0,38	0,00001			
	Camada de ar	> 0,05	-	-	-	0,21	0,58	233,82	0,25
	Laje Concreto	0,1	1,75	2.200	1	0,06			
	Camada de ar	0,1	-	-	-	0,21			
	Placas de gesso	0,01	0,35	800	0,84	0,03			
Terraço	Porcelanato	0,0075	1,3	2.300	0,97	0,0058			
Rsi = 0,17	Argamassa	0,05	1,15	1.800	1	0,043			
Rse = 0,04	Imperm.	0,005	0,23	1000	0,46	0,022	2,73	333,75	0,2
	Laje de Concreto	0,1	1,75	2.200	1	0,057			
	Camada de ar	0,1	-	-	-	0,21			
	Placa de gesso	0,01	0,35	800	0,84	0,029			
Laje Térreo	Tabuão	0,007	0,14	600	2,3	0,01			
(Estar/escrit)	EPS	0,005	0,04	20	1,42	0,13	2,78	265,80	0,9
Rsi = 0,10	Contrapiso (arg.)	0,02	1,15	1.800	1	0,02			
Rse = 0,04	Laje Concreto	0,1	1,75	2.200	1	0,06			
Laje Térreo	Porcelanato	0,0075	1,3	2.300	0,97	0,01			
(ban./coz./ gar.)	Contrapiso (argamassa)	0,02	1,15	1.800	1	0,02	4,35	272,7325	0,2
	Laje de Concreto	0,1	1,75	2.200	1	0,06			
Laje entrepisos	Laminado Mad.	0,007	1,2	400	2,3	0,01			
(dorm./circ.)	EPS	0,005	0,04	20	1,42	0,13			
Rsi = 0,10	Contrapiso (arg.)	0,02	1,15	1.800	1	0,02	1,71	269,302	0,9
Rse = 0,04	Laje Concreto	0,1	1,75	2.200	1	0,06			
	camada de ar	0,1	-	-	-	0,21			
	Placas de gesso	0,01	0,35	800	0,84	0,03			
Laje entrepisos	Porcelanato	0,0075	1,3	2.300	0,97	0,01			
(ban.)	Contrapiso (arg.)	0,02	1,15	1.800	1	0,02			
Rsi = 0,10	Laje de Concreto	0,1	1,75	2.200	1	0,06	2,13	279,4525	0,2
Rse = 0,04	ar	0,1				0,21			
	Placas de gesso	0,01	0,35	800	0,84	0,03			
Parede Ext.	Reboco (arg.)	0,025	1,15	1.800	1				
Rsi=0,13	Tij. cer. 6 furos 9x14x24	0,09	-	-	-				
Rse=0,04	Camada de ar	0,04	-	-	-	0,79	1,27	195	0,2
	Tij. cer. 6 furos 9x14x24	0,09	-	-	-				
	Reboco (arg.)	0,025	1,15	1.800	1				
Parede Int.	Reboco (arg.)	0,025	1,15	1.800	1				
Rsi=0,13	Tij. cer. 6 furos 9x14x24	0,09	-	-	-	0,37	2,72	98	0,2
Rse=0,04	Reboco (arg.)	0,025	1,15	1.800	1				
Portas	Madeira								
Rsi=0,13 Rse=0,04		0,03	0,12	400	2,3	0,25	2,38	27,6	0,7
Janelas*	Vidro lam. incolor 8 mm (4+4) FS = 0,44								
Rsi=0,13 Rse=0,04		0,008	1	2500	0,84	0,17	5,67	6,3	0,1

e=espessura; λ=condutividade térmica; p=densidade de massa aparente; c=calor específico; Rt=resistência térmica; U=transmitância térmica; CT= Capacidade térmica; α=absortância solar.

*tipo de superfície correspondente aos valores: 0,25 = chapa de aço galvanizada (nova e brilhante); 0,9 = cor de madeira; 0,2 = pintura ou revestimento branco; 0,7 = cor de madeira; 0,1 = vidro incolor.

Fonte: Dados calculados com base na ABNT, 2005.

Tabela C - 3: Propriedades dos materiais da Residência ZB3.

Elementos construtivos		e (m)	λ (W/(m.°C))	P (kg/m³)	C (kJ/kg-K)	Rt (m²/W.°C)	U (W/(m².°C))	CT (kJ/m²K)	α* (adim.)
Cobertura	Telha metálica	0,001	112	7.100	0,38	0,00001			
Rsi = 0,17	Poliuretano	0,04	0,04	30	1,42	1			
Rse =0,04	Telha metálica	0,001	112	7.100	0,38	0,00001			
	Camada de ar	> 0,05	-	-	0	0,21	0,67	263,1	0,25
	Laje de Concreto	0,1	1,75	2.200	1	0,06			
	Reboco (arg.)	0,02	1,15	1.800	1	0,02			
Terraço	Madeira	0,02	0,12	300	1,34	0,17			
Rsi = 0,17	Camada de ar	0,05	-	-	0	0,18			
Rse = 0,04	Argamassa	0,05	1,75	2.200	1	0,03			
	Imperm.	0,005	0,23	1000	0,46	0,02	1,46	376,34	0,9
	Laje de Concreto	0,1	1,75	2.200	1	0,06			
	Reboco (arg.)	0,02	1,15	1.800	1	0,02			
Parede Ext.	Reboco (arg.)	0,025	1,15	1.800	1				
Rsi = 0,10	Tij. cer. 6 furos 9x14x19	0,14	-	-	-	0,49	2,02	192	0,2
Rse = 0,04	Reboco (arg.)	0,025	1,15	1.800	1				
Parede Int.	Reboco (arg.)	0,025	1,15	1.800	1				
Rsi = 0,13	Tij. cer. 6 furos 9x14x19	0,09	-	-	-	0,4	2,48	159	0,2
Rse = 0,04	Reboco (arg.)	0,025	1,15	1.800	1				
Laje externa	Porcelanato	0,0075	1,3	2.300	0,97	0,01			
Rsi = 0,10	Contrapiso (arg.)	0,02	1,15	1.800	1	0,02	4,30	308,7	0,2
Rse = 0,04	Laje de Concreto	0,1	1,75	2.200	1	0,06			
Laje entrepiso	Porcelanato	0,0075	1,3	2.300	0,97	0,01			
Rsi = 0,10	Contrapiso (arg.)	0,02	1,15	1.800	1	0,02			
Rse = 0,04	Laje de Concreto	0,1	1,75	2.200	1	0,06	4,04	272,73	0,2
	Reboco (arg.)	0,02	1,15	1.800	1	0,02			
Portas									
Rsi= 0,13	Madeira	0,03	0,12	400	2,3	0,42	2,38	27,6	0,7
Rse = 0,04									
Janelas*	Vidro simples incolor FS = 0,87								
Rsi= 0,13		0,003	0,9	2500	0,84	0,17	5,7	6,3	0,1
Rse = 0,04									

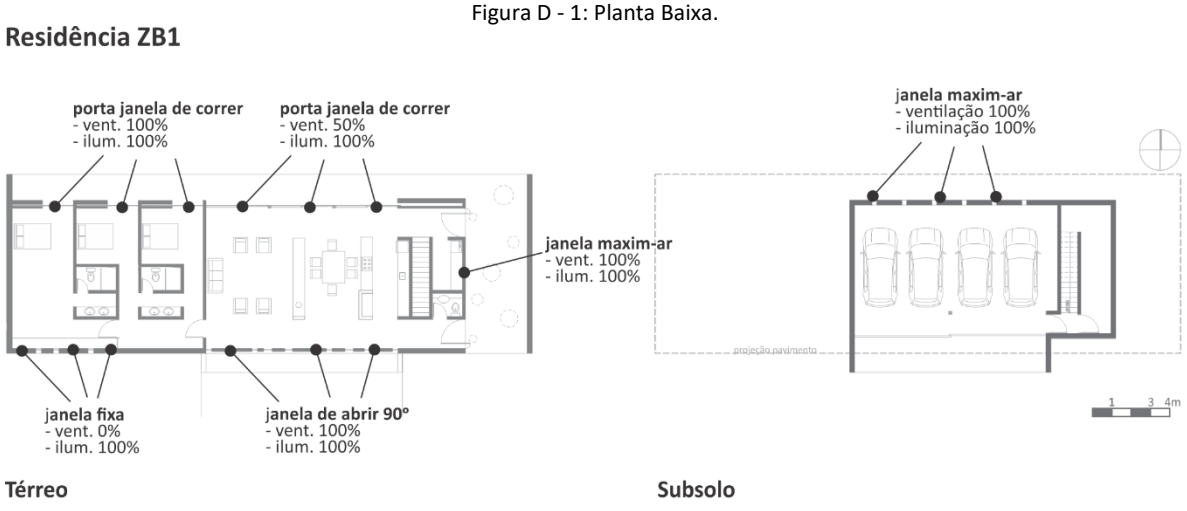
e=espessura; λ=condutividade térmica; p=densidade de massa aparente; c=calor específico; Rt=resistência térmica; U=transmitância térmica; CT= Capacidade térmica; α=absortância solar

*tipo de superfície correspondente aos valores: 0,25 = chapa de aço galvanizada (nova e brilhante); 0,9 = cor de madeira; 0,2 = pintura branca; 0,7 = cor de madeira; 0,1 = vidro incolor.

Fonte: Dados calculados com base na ABNT, 2005.

APÊNDICE D: PERCENTUAL VENTILAÇÃO/ILUMINAÇÃO DE JANELAS

Figura D - 1: Planta Baixa.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

APÊNDICE E: CLASSIFICAÇÃO DO NÍVEL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DA ENVOLTÓRIA

Tabela E - 1: Residência ZB1: Classificação do nível de eficiência energética da envoltória.

Zona Térmica/ Ambiente		Ventilado Naturalmente			Condicionado Artificialmente					
		Resfriamento			Refrigeração			Aquecimento		
		GH_R (°Ch)	*EqNumEnvResfr*	Nível	CA (kWh/m²a)	*EqNum*	Nível	CR (kWh/m²a)	*EqNumEnvA*	Nível
ZT 1	**Dorm1**	0,8	5	A	3,139	1	B	15,57	4	A
ZT 2	**Dorm2**	1,0	5	A	2,957	1	E	16,04	4	A
ZT 3	**Suíte**	66,6	5	A	4,322	1	E	28,85	4	B
ZT 4	**Estar**	76,0	5	A	1,276	4	E	23,12	4	B
Média			5,00	**A**		2,88	**C**		4,17	**B**
***EqNumEnv=0,08 x EqNumEnvResfr + 0,92 x EqNumEnvA* = 4,22**								**Nível envoltória = B**		

CR = Consumo relativo de energia para refrigeração; CA = Consumo relativo de energia para aquecimento; GH_R = Graus-Hora Resfriamento.
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Tabela E - 2: Residência ZB2: Classificação do nível de eficiência energética da envoltória.

Zona Térmica/ Ambiente		Ventilado Naturalmente			Condicionado Artificialmente					
		Resfriamento			Refrigeração			Aquecimento		
		GH_R (°Ch)	*EqNumEnvResfr*	Nível	CA (kWh/m²a)	*EqNum*	Nível	CR (kWh/m²a)	*EqNumEnvA*	Nível
ZT 1	**Dorm1**	2805,3	4	B	17,071	2	D	16,90	4	B
ZT 2	**Dorm2**	3369,8	4	B	19,136	2	D	8,88	5	A
ZT 3	**Dorm3**	2275,8	5	A	15,611	3	C	19,50	4	B
ZT 4	**Suíte**	1105,4	5	A	20,753	2	D	11,66	5	A
ZT 5	**Estar**	3449,9	4	B	14,659	3	C	26,37	4	B
Média			4,25	**B**		2,61	**C**		4,27	**B**
***EqNumEnv=0,44 x EqNumEnvResfr + 0,56 x EqNumEnvA* = 4,23**								**Nível envoltória = B**		

CR = Consumo relativo de energia para refrigeração; CA = Consumo relativo de energia para aquecimento; GH_R = Graus-Hora Resfriamento.
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Tabela E - 3: Residência ZB3: Classificação do nível de eficiência energética da envoltória.

Zona Térmica/ Ambiente		Ventilado Naturalmente			Condicionado Artificialmente					
		Resfriamento			Refrigeração			Aquecimento		
		GH_R (°Ch)	*EqNumEnvResfr*	Nível	CA (kWh/m²a)	*EqNum*	Nível	CR (kWh/m²a)	*EqNumEnvA*	Nível
ZT 1	**Dorm1**	1266,9	4	B	12,841	3	C	12,04	4	B
ZT 2	**Dorm2**	1418,8	4	B	13,747	3	C	12,04	4	B
ZT 3	**Suíte**	975,8	4	B	15,782	3	C	12,30	4	B
ZT 4	**Estar**	1289,3	4	B	8,386	4	B	12,29	4	B
Média			**3,62**	**B**		**4,00**	**B**		**4,00**	**B**
***EqNumEnv=0,64 x EqNumEnvResfr + 0,36 x EqNumEnvA* = 4,00**								**Nível envoltória = B**		

CR = Consumo relativo de energia para refrigeração; CA = Consumo relativo de energia para aquecimento; GH_R = Graus-Hora Resfriamento.
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

APÊNDICE F: EXEMPLO PROGRAMAÇÃO EMS

Programação EMS:

```
!-  === ALL OBJECTS IN CLASS: ENERGYMANAGEMENTSYSTEM:SENSOR ===
EnergyManagementSystem:Sensor,
   T1,                                  !- Name
   SALAESTAR,                           !- Output:Variable or Output:Meter Index Key Name
   Zone Mean Air Temperature;           !- Output:Variable or Output:Meter Name
```

Descrição: Definição do sensor de temperatura para um ambiente (para cada ambiente um sensor).

Programação EMS:

```
!-  === ALL OBJECTS IN CLASS: ENERGYMANAGEMENTSYSTEM:PROGRAM ===
EnergyManagementSystem:Program,
   OverheatingCheck,            !- Name
   IF T1 >= 20 && T1 <= 26,     !- Program Line 1
      SET T1 = 1,               !- Program Line 2
       ELSE,                    !- A4
      SET T1 = 0,               !- A5
      ENDIF,                    !- A6
   IF T2 >= 20 && T2 <= 26,     !- A7
      SET T2 = 1,               !- A8
      ELSE,                     !- A9
      SET T2 = 0,               !- A10
      ENDIF,                    !- A11
   IF T3 >= 20 && T3 <= 26,     !- A12
      SET T3 = 1,               !- A13
      ELSE,                     !- A14
      SET T3 = 0,               !- A15
      ENDIF,                    !- A16
   IF T4 >= 20 && T4 <= 26,     !- A17
      SET T4 = 1,               !- A18
      ELSE,                     !- A19
      SET T4 = 0,               !- A20
      ENDIF,                    !- A21
   IF T5 >= 20 && T5 <= 26,     !- A22
      SET T5 = 1,               !- A23
      ELSE,                     !- A24
      SET T5 = 0,               !- A25
      ENDIF,                    !- A26
   SET ComfortRate1 = (T1 + T2 + T3 + T4 + T5)/5*100;   !- A27
```

Descrição: Definição da temperatura interna de conforto (entre 20 e 26ºC). A temperatura é medida pelo sensor configurado anteriormente. A rotina foi configurada para os resultados saírem em percentual.

Programação EMS:

```
!-  === ALL OBJECTS IN CLASS: ENERGYMANAGEMENTSYSTEM:OUTPUTVARIABLE ===
EnergyManagementSystem:OutputVariable,
   Menor 20,                    !- Name
   ComfortRate2,                !- EMS Variable Name
   Averaged,                    !- Type of Data in Variable
   SystemTimeStep;              !- Update Frequency

EnergyManagementSystem:OutputVariable,
   Entre 20 e 26,               !- Name
   ComfortRate1,                !- EMS Variable Name
   Averaged,                    !- Type of Data in Variable
   SystemTimeStep;              !- Update Frequency

EnergyManagementSystem:OutputVariable,
   Maior 26,                    !- Name
   ComfortRate3,                !- EMS Variable Name
   Averaged,                    !- Type of Data in Variable
   SystemTimeStep;              !- Update Frequency
```

Descrição: Configuração das variáveis de saída: Temperatura menor que 20ºC, entre 20 e 26 ºC e maior que 26ºC.

Obs.: A programação apresentada é resumida.

APÊNDICE G: EXEMPLO DE CONFIGURAÇÃO DE PARÂMETROS PARA SIMULAÇÃO COM O ALGORITMO

Programação dos parâmetros simulados pelo algoritmo:					**Descrição:**
Template: ZB2_SM_PH_BP_1-8_aber_jan.idf.template					Arquivo do *EnergyPlus*
Weather: BRA_SM_SWERA					Arquivo climático de Santa Maria.
Parameters: 41					Número de parâmetros simulados
x0	0.000001	0.15	0.01	#IsolamentoCobertura(XPS_COBERTURA)(m)	Variação da espessura do isolamento térmico de acordo com a orientação solar da fachada.
x1	0.000001	0.15	0.01	#IsolamentoPisoChao(XPS_PISO_CHAO)(m)	
x2	0.000001	0.15	0.01	#IsolamentoParedeNORTE(XPS_PAREDE_NORTE)(m)	
x3	0.000001	0.15	0.01	#IsolamentoParedeSUL(XPS_PAREDE_SUL)(m)	
x4	0.000001	0.15	0.01	#IsolamentoParedeLESTE(XPS_PAREDE_LESTE)(m)	
x5	0.000001	0.15	0.01	#IsolamentoParedeOESTE(XPS_PAREDE_OESTE)(m)	
x6	0.000001	0.15	0.01	#IsolamentoParedeSUL_INTERNA(XPS_PAREDE_INTERNA)(m)	
x7	0.015	0.05	0.001	#infiltracao	Valores de infiltração (Estanqueidade).
x8	0.002	0.006	0.0001	#Ventilation_ESCRITORIO	Valores de renovação do ar.
x9	0.011	0.033	0.0001	#Ventilation_SALAESTAR	
x10	0.004	0.012	0.0001	#Ventilation_COZINHA	
x11	0.001	0.004	0.0001	#Ventilation_LAVABO	
x12	0.003	0.009	0.0001	#Ventilation_DORM01	
x13	0.003	0.009	0.0001	#Ventilation_DORM_VISITA	
x14	0.001	0.003	0.0001	#Ventilation_BANDORMVISITA	
x15	0.001	0.004	0.0001	#Ventilation_BANDORMCASAL	
x16	0.002	0.006	0.0001	#Ventilation_CIRC_2PAV	
x17	0.004	0.011	0.0001	#Ventilation_CLOSET	
x18	0.003	0.008	0.0001	#Ventilation_DORMCASAL	
x19	0.003	0.009	0.0001	#Ventilation_DORM_02	
x20	0.002	0.005	0.0001	#Ventilation_BAN_DORM01e02	
x21	0.75	0.95	0.01	#EficienciaRecuperadorCarlor	Eficiência do recuperador de calor
x22	0.006	0.012	0.0001	#By_pass_ESCRITORIO	Valores de *Bypass.*
x23	0.033	0.065	0.0001	#By_pass_SALAESTAR	
x24	0.012	0.025	0.0001	#By_pass_COZINHA	
x25	0.004	0.009	0.0001	#By_pass_LAVABO	
x26	0.009	0.017	0.0001	#By_pass_DORM01	
x27	0.009	0.018	0.0001	#By_pass_DORM_VISITA	
x28	0.003	0.005	0.0001	#By_pass_BANDORMVISITA	
x29	0.004	0.009	0.0001	#By_pass_BANDORMCASAL	
x30	0.006	0.012	0.0001	#By_pass_CIRC_2PAV	
x31	0.011	0.022	0.0001	#By_pass_CLOSET	
x32	0.008	0.015	0.0001	#By_pass_DORMCASAL	
x33	0.009	0.018	0.0001	#By_passn_DORM_02	
x34	0.005	0.018	0.0001	#By_pass_BAN_DORM01e02	
x35	0	5	1	#ExteriorWindowNORTE	Definição do tipo de janela por orientação solar.
x36	0	5	1	#ExteriorWindowSUL	
x37	0	5	1	#ExteriorWindowLESTE	
x38	0	5	1	#ExteriorWindowOESTE	
x39	21	30	0.05	#tempAberturaJanelasverao(VN_20)	Temperatura de abertura das janelas
x40	21	30	0.05	#tempAberturaJanelasinverno(VN_20)	
Equalities: 0					Condições de igualdade e de restrições (não utilizadas).
Constraints: 0				#gi(x)<=0	
Strings: 4					Definição do tipo de janela por orientação solar.
x35=VidroDuplo_atual,DuploPVC,Laminado8mm,VidroSimples3mm,TriploPVC					
x36=VidroDuplo_atual,DuploPVC,Laminado8mm,VidroSimples3mm,TriploPVC					
x37=VidroDuplo_atual,DuploPVC,Laminado8mm,VidroSimples3mm,TriploPVC					
x38=VidroDuplo_atual,DuploPVC,Laminado8mm,VidroSimples3mm,TriploPVC					
Outputs: 2					Dados de saída: tem relação com as funções objetivo, consumo energético com condicionamento térmico e percentual de horas de desconforto (dados anuais).
187 1.					
946 1.					

APÊNDICE H: DIMENSÕES ATUAIS, MÍNIMAS E MÁXIMAS DAS JANELAS (RELATIVO A ÁREA DO PISO DO AMBIENTE)

Tabela H-1: Dimensões atuais e mínimas das janelas da Residência ZB1.

Ambiente /Área	Janela/ Abertura (%)	Edificação Referencial				Parâmetros de simulação							
						Mínimo				Máximo			
		Dim. (m) Área (m²)	Piso (%)	Ven. (%)	Ilum. (%)	Dim. (m) Área (m²)	Piso (%)	Ven. (%)	Ilum. (%)	Dim. (m) Área (m²)	Piso (%)	Ven. (%)	Ilum. (%)
Dorm1 (ZT1) 11,58 m²	**PJ-N2** (100%)	1,6x2,6/0 4,2	35,9	35,9	35,9	0,8x2,1/0 1,68	14,5	14,5	14,4	3,15x2,10/0 6,61	70,7	70,7	70,7
Dorm2 (ZT2) 11,58 m²	**PJ-N3** (100%)	1,6x2,6/0 4,2	35,9	35,9	35,9	0,8x2,1/0 1,68	14,5	14,5	14,4	3,15x2,10/0 6,61	70,7	70,7	70,7
Suíte (ZT3)* 27,30 m²	**PJ-N1** (100%) **J-S1** (0%)	1,6x2,6/0 4,2 1,5x0,75/1 1,13	19,4	15,2	19,4	0,8x2,1/0 1,68 0,3x0,75/1 0,22	12,7	11,2	12,7	3,10x210/0 6,51 5,30/2,10 3,98	145,6	53,7	145,6
Estar (ZT4) 85,22 m²	**J-S2** (100%) **PJ-N4** (50%)	4,25x2,6/0 11,1 9,45x2,6/0 24,6	41,8	27,4	41,8	2,0x2,1/0 4,20 3,1x2,1/0 6,51	12,6	8,8	12,6	9,70x2,10/0 20,37 9,70x2,10/0 20,37	59,1	44,4	59,2

* Cálculo relativo a 15 m² (ambiente tem 27,3 m²)

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Tabela H-2: Dimensões atuais e mínimas das janelas da Residência ZB2.

Ambiente /Área	Janela/ Abertura (%)	Edificação Referencial				Parâmetros de simulação							
						Mínimo				Máximo			
		Dim. (m) Área (m²)	Piso (%)	Ven. (%)	Ilum. (%)	Dim. (m) Área (m²)	Piso (%)	Ven. (%)	Ilum. (%)	Dim. (m) Área (m²)	Piso (%)	Ven. (%)	Ilum. (%)
Dorm1 (ZT1) 12,38 m²	**PJ-N5** (50%)	1,8x1,4/1 2,56	20,4	10,2	20,4	1,5x1,4/1 2,1	16,9	8,48	16,9	3,8x1,7/1 6,46	52,2	26,1	52,2
Dorm2 (ZT2) 12,23 m²	**PJ-N4** (50%)	1,8x1,4/1 2,52	20,6	10,3	20,6	1,4x1,4/1 1,96	16,0	8,01	16,0	3,5x2,65/0 9,28	75,8	68,8	75,8
Dorm3 (ZT3) 12,91 m²	**J-S1** (50%)	1,8x1,4/1 2,52	19,5	9,8	19,5	1,5x1,4/1 2,1	16,3	8,13	16,3	2,5x1,7/1 4,25	16,3	8,1	32,9
Suíte (ZT4) 11,04 m²	**JN-3** (50%)	1,8x1,4/1 2,52	22,8	11,4	22,8	1,3x1,4/1 1,82	16,5	8,24	16,5	3x2,65/0 7,95	16,5	8,2	72,0
Estar (ZT5) 47,47 m²	**J-N1** (50%) **J-N2** (50%) **J-L1** (50%) **PJ-O1** (50%)	1,2x1,9/0,5 2,28 1,7x1,9/0,5 3,23 5,15x2,4/0 12,36 2,4x2,4/0 5,76	49,8	24,9	49,8	0,7x1,9/0,5 1,33 0,8x1,9/0,5 1,52 1,0x2,4/0 2,40 1,0x2,4/0 2,40	16,1	8,06	16,1	1,8x2,65x0,5 4,77 2,8x2,65/0 7,42 5,15x2,7/0 13,91 4x2,7/0 10,8	77,7	38,9	77,7

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Tabela H-3: Dimensões atuais, mínimas e máximas propostas para as janelas da Residência ZB3.

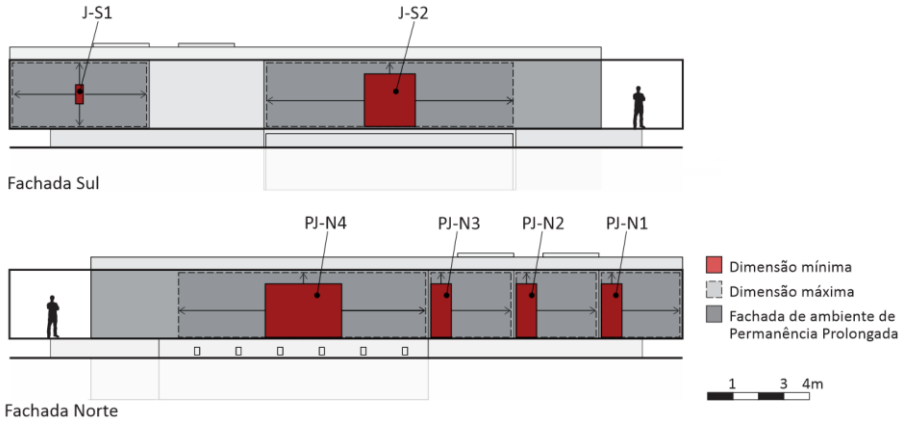
Ambiente	Janela/ Abertura (%)	Edificação Referencial				Parâmetros de simulação							
						Mínima				Máxima			
		Dim. (m) Área (m²)	Piso (%)	Ven. (%)	Ilum. (%)	Dim. (m) Área (m²)	Piso (%)	Ven. (%)	Ilum. (%)	Dim. (m) Área (m²)	Piso (%)	Ven. (%)	Ilum. (%)
Dorm1 (ZT1) 13,49 m²	**PJ-L3** (100%)	1,5x2,6/0 3,9	28,9	28,9	28,9	0,8x2,1/0 1,68	12,5	12,4	12,4	3,0x2,9/0 8,7	64,5	64,5	64,5
Dorm2 (ZT2) 12,23 m²	**PJ-L2** (100%)	1,5x2,6/0 3,9	31,9	31,9	31,9	0,8x2,1/0 1,68	13,7	12,4	12,4	3,0x2,9/0 8,7	71,1	64,5	64,5
Suíte* (ZT3) 16,35 m²	**JN-2** (50%) **JO-1** (50%)	1,6x1,2/0,9 1,92 2x1,2/0,9 2,4	28,9	14,4	28,8	1x1,2/0 1,2 1x1,2/0,5 1,2	16,0	8,0	16,0	3,8x2,9/0 11,02 2,5x2,9/0 7,25	121,8	60,9	121,8
Estar (ZT4) 67,63 m²	**J-S1** (100%)	3,4x0,6/1,5 2,04	45,4	27,1	45,4	2x0,6/1,5 1,23	12,6	8,0	12,6	3,4x2,9/0 9,86	69,9	51,5	69,9
	PJ-O1 (50%)	4,3x2,9/0 12,47				0,8x2,1/0 1,68				4,3x2,9/0 12,47			
	J-N1 (0%)	1,3x2,9/0 3,77				0,8x2,1/0 1,68				1,3x2,9/0 3,77			
	PJ-L1 (66%)	2,45x2,9/0 7,1				0,8x2,1/0 1,68				2,45x2,9/0 7,1			
	J-S2 (100%)	4,85x1,1/0 5,33				2,05x1,1/0 2,25				2,85x2,9/0 14,06			

* Cálculo relativo a 15 m² (ambiente tem 27,3 m²)

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

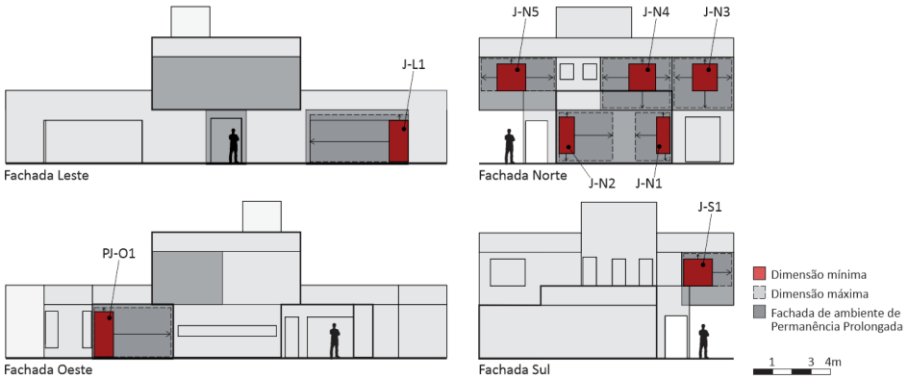
APÊNDICE I: DIMENSÕES MÍNIMAS E MÁXIMAS DAS JANELAS (RELATIVO A FACHADA DO AMBIENTE)

Figura I -1: Fachada dos ambientes de permanência prolongada Residência ZB1.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Figura I -2: Fachada dos ambientes de permanência prolongada Residência ZB2.



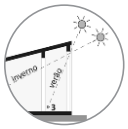
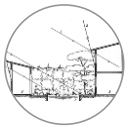
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Figura I -3: Fachada dos ambientes de permanência prolongada Residência ZB3.

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

APÊNDICE J: LINHAS DO TEMPO DA ARQUITETURA PASSIVA NO MUNDO

Quadro J - 1: Linha do tempo detalhada da arquitetura passiva ao longo de toda história mundial.

Data	Breve descrição	Local	Ilustração
	Pré Revolução industrial		
1 milhão a.C.	**Homo Erectus aprende a controlar o fogo** *O domínio do fogo permitiu cozinhar alimentos, endurecer instrumentos, afastar animais, iluminar e aquecer os abrigos. O convívio à volta da fogueira favoreceu o desenvolvimento dos laços sociais e da linguagem.*		
400.000 a.C.	**Encontradas primeiras cabanas** *Arqueólogos encontraram resto de cabanas datadas com quase 400.000 anos e cabanas com ossos e pele com quase 44.000 anos.*		
Séc. XXX a XX a.C	**Stonehenge** *Observatório astronômico baseado na trajetória aparente o Sol.*	Reino Unido	
1100 a.C.	**"Megaron" tradicional grega** *Megaron possuía um beiral que auxiliava aproveitava a radiação solar de inverno ao mesmo tempo que protegia dois raios de verão.*	Grécia Antiga	
Séc. IX a.C a II a.C.	**Evolução do templo grego** *Os templos utilizavam colunas que atuavam como enormes brises que sombreavam o interior.*	Grécia Antiga	
447 a 432 a.C.	**Partenon de Atenas** *Os gregos utilizavam colunas que atuavam como enormes brises-soleil.*	Grécia Antiga	
400 a.C.	**"Megaron" proposta por Sócrates** *Casa conceito descrita por Sócrates* *Megaron proposta por Sócrates foi a primeira concepção de casa passiva que conhecemos na história e a primeira casa solar.*	Grécia Antiga	
Séc. III a.C.	**Casa pátio grega clássica na cidade de Priene** *A casa aproveitava a radiação solar sul (HN) do pátio e contava com área coberta aberta que auxiliava no controle da radiação solar. Proporcionava sombra no verão e radiação solar no inverno.*	Grécia Antiga	
	Apartamentos solares em Olinto *Os edifícios solares eram considerados modernos na Grécia Antiga. Apartamentos solares em Olinto tinham poucas janelas ao norte (HN), muitas a sul e sem janelas a leste e oeste.*	Grécia Antiga	
200 a.C.	**"Casa átrio" romana** *A casa aproveita a radiação solar sul (HN) do pátio. Proporcionava sombra no verão e radiação solar no inverno.*	Roma Antiga	
Séc. II a.C.	***Calidarium* e *Ipocausto*** *Romanos utilizam sistema para aquecimento de água e paredes através da queima de lenha.*	Roma Antiga	
31 a 27 a.C.	**Vitruvio escreve *De Architectura*** *Vitruvio escreve sobre clima e arquitetura no seu tratado.*	Roma Antiga	

Séc. I d.C. (20 d.C.) → **"Heliocaminus"**
Edificação com grandes aberturas envidraçadas para reter o calor e grande massa térmica.
Roma Antiga

72 a 80 d.C. → **Cobertura do Coliseu de Roma**
É a mais antiga cobertura suspensa cobrindo um edifício já registrado. Tinha como principal objetivo proteger o público da radiação solar direta.
Roma Antiga

Séc. VI d.C. → **Primeira legislação ambiental a primeira jurisdição a consagrar o "direito ao Sol"**
Código Justiniano garantia direito a luz do Sol. Protegia principalmente o "Heliocaminus" e os edifícios públicos para que não fossem sombreados pelas novas edificações vizinhas.
Grécia Antiga

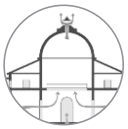
Séc. XII a XV d.C. → **Vitrais góticos**
Vidros coloridos eram utilizados nos países do mediterrâneo para proteger as aberturas da radiação solar direta. Posteriormente se transformou em uma das mais importantes formas artísticas das catedrais.
Europa

Séc. XIV d.C. → **Utilização do vidro expande para janelas**
Utilização do vidro começou a expandir para as janelas, permitindo que os ambientes internos ficassem mais luminosos sem a entrada do ar e com redução da perda de calor.
Europa

1452 → **Tratado "*De Re Aedificatoria*"**
Em seu tratado Alberti afirma que é preciso observar o Sol para verificar a conveniência do tamanho das janelas de acordo com a orientação da edificação.
Itália

1550 → **Sistema de ventilação natural da Villa Costozza**
Edificações tiraram proveito da ventilação natural através de túneis chamados de "ventidotti" que terminavam na base das edificações.
Itália

1556 → **Sistema de ventilação natural da Villa Rotonda**
Palladio adota um sistema de ventilação natural onde o ar é resfriado no subsolo e ascende por efeito chaminé pela parte central da edificação.
Itália



1586-1640 → **Cortinas externas do Procuratie Vecchie**
Sistema utilizado para proteger da radiação solar, quando necessário.
Itália

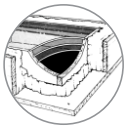
Século XVI → **Utilização de vidro para construir estufas**
Os holandeses foram os primeiros a utilizar o vidro para construir estufas modernas.
Holanda

1650 a 1830 → **Casa passiva "Salt Box"**
Edificação utilizava a geometria com maiores faces em contato com a radiação solar.
EUA

Pós Revolução Industrial

1760/80 a 1830/40 → **Revolução industrial**
Com a Revolução Industrial, o uso de materiais industrializados redefine a relação das edificações com o clima. Há também revolução na área energética, com a exploração incialmente do carvão.
Inglaterra (início)

1767 → **Caixa de aquecimento solar**
Horace de Saussure, naturalista e geólogo suíço, inventa a primeira caixa de aquecimento solar.
Suíça



Século XVIII → **Estufas holandesas com lona** — Holanda

Durante este período os holandeses utilizavam também vidro duplo para controlar a perda de calor.

Final do século XVIII → **Descoberta de métodos para fabricar vidro** — França

O vidro fica mais acessível devido ao estabelecimento de sistema de transporte mais eficiente e diminuição dos custos.

1880 → **Bomba solar de Charles Tellier** — França

Estudos de mecanismos para aproveitar a energia solar. Engenheiro francês Tellier foi o primeiro da época moderna a desenvolver coletores solares de baixa temperatura para impulsionar máquinas, utilizava líquidos com ebulição muito baixa.

Século XVII e Inicio século XIX → **Casa Suíça de Appenzell** — Suíça

Tinham fachadas com faixas de janela protegidas por teto saliente. Proporcionava sombreamento de verão e proteção contra intempéries para as janelas. O branco curvo sob as superfícies capturadas e refletem a luz do dia adicional para baixo.

Século XIX → **Jardim de inverno** — Europa

As estufas começaram a adquirir forma mais luxuosa, funcionavam como jardins de inverno com vegetação exótica. Começou-se a utilizar os jardins de inverno também nas coberturas.

1836 → **Great Conservatory** — Inglaterra

Era o maior prédio de vidro na Inglaterra até a construção do Palácio de Cristal. Para criar o clima ideal para manter a vegetação, havia caldeiras alimentadas por carvão que aqueciam o ambiente.

1851 → **Palácio de Cristal** — Inglaterra

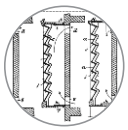
Um marco na utilização do ferro, vidro e na racionalidade da construção Industrial. Primeiro grande edifício público construído sem participação de arquiteto e que marca o início de um período no qual o progresso seria levado adiante pelos engenheiros.

1876 - 1878 → **Publicado o primeiro livro sobre energia solar** — EUA

William Adams escreveu "A Substitute for Fuel in Tropical Countries".

1881 → **Primeiro aquecedor solar do Morse** — EUA

Desenhos da patente do primeiro aquecedor solar do Morse, com três formas de operação.
Precursor da conhecida "Parede Trombe".



1882 → **Invenção do Ventilador** — EUA

Entre 1882 e 1886, o Dr. Schuyler desenvolveu o ventilador elétrico de mesa com duas pás. Em 1882, Philip H. Diehl, (o pai do ventilador moderno), inventou o ventilador de teto. Em 1891 é criado o primeiro motor universal para ventilador, possuía ajuste de velocidade. O primeiro motor de ventilador, criado em 1889 (Nicolas Tesla) não possuía regulagem.

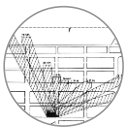
1893 → **Navio polar "Fram" isolado termicamente** — Noruega

O navio foi isolado termicamente para suportar as baixas temperaturas. Muitos autores descrevem como um precursor das casas superisoladas atuais.

1902 → **Invenção do ar-condicionado** — EUA

É Inventado por Willis Carrier para utilizar em uma gráfica de Nova Iorque: Sackett-Wihelms Lithographing and Publishing.
Popularização a partir de 1920.

1904 → **Estudo de projeção de sombras** — EUA
Um dos estudos de William Atkinson, mostrava as sombras projetadas por um edifício de 9 metros de altura. Como resultado, foi aprovado em 1904 uma norma que limitava a altura dos edifícios.



1912 → **"Casa solar"** — EUA
Construída por Atkinson, a casa solar era um pequeno edificado, com a face sul envidraçada e as demais termicamente isoladas. A temperatura interna superava frequentemente 37°C em dias de muito frio.

→ **Urbanismo Solar** — França
Augustin Rey averiguou o espaço mínimo desejado para que os edifícios recebessem sol no inverno sem interferir na edificação adjacente.

1914 a 1918 → **Primeira Guerra Mundial**

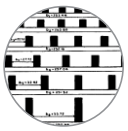
1917 → **"Cité Industrielle" (Cidade Industrial)** — França
Tony Garnier, arquiteto e urbanista francês, projeta cidade para ter igual acesso a Sol para todas edificações.

Década 1920 → ***Zeilenbau*** — Alemanha
Os conjuntos habitacionais alemão, denominados Zeilenbau, gradualmente foram trocando de orientação leste-oeste para norte-sul.

Década 1920 → **Comunidade solar suíça em Neubühl** — Suíça
Conjunto de edifícios orientados a sul e sudeste (HN) para captar o máximo de sol durante o inverno sem que houvesse sombra de um edifício sobre o outro. A fachada sul (HN) era a mais envidraçada.

1927 → **Avanço no processo de fabricação do vidro**
Tornou ainda mais acessível aos arquitetos. Começaram a surgir mais estudos para ganho de calor através do vidro em casas.

1930 → **Diagrama solar de Gropius** — Bélgica
Walter Gropius, arquiteto alemão, apresentou no CIAM, em Bruxelas, um diagrama que mostrou como os blocos de habitações devem ser espaçados para evitar o auto-sombreamento.



1931-32 → **Desenvolvimento do Heliodon** — Reino Unido
Royal Institute of British Architects (RIBA) desenvolveu o Heliodon, equipamento utilizado para simular o movimento aparente do Sol.

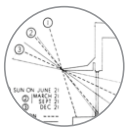
Década 1930 → **Edifício orientado a Sul (HN)** — Alemanha
O arquiteto Hugo Haring começou a construir pequenos edifícios para moradias, orientados a sul (HN).

1933 → **Sistematização do brise-soleil**
Le Corbusier sistematiza o uso do brise-soleil para seus projetos.

1933 → **"House of Tomorrow"** — EUA
Projetada pelo arquiteto George F. Keck, é considerada a primeira casa solar passiva do século XX.

1934 a 1936 → **Artigos sobre orientação solar** — EUA
Henry Wright, da universidade de Columbia publicou numerosos artigos sobre orientação solar e comunidades solares, ajudando a convencer outros arquitetos sobre a importância da arquitetura solar.

1936 → **Provável primeiro diagrama solar bidimensional** — EUA
Keck desenvolve, diagrama solar para demonstrar o sombreamento e incidência solar de diferentes ângulos solares.



1938 → **Lâmpadas fluorescentes chegaram ao mercado** — EUA
É um tipo de lâmpada criada por Nikola Tesla.

→ **Le Corbusier faz o seu primeiro diagrama solar** — Argélia
Primeiro diagrama solar bidimensional de Le Corbusier para um projeto de escritório em Argel.

1939 a 1945 **Segunda Guerra Mundial**

1939 → **"MIT Solar House I"** — EUA
Massachusetts Institute of Technology
Reconhecida como a primeira casa solar ativa.

1940 → **"Sloan House"** — EUA
Primeira vez que o termo "solar house" é utilizado. Descreve o conjunto de estratégias utilizada na casa "Sloan House". Projetada pelo arquiteto Keck, em Chicago.

1941 → **Solar Park** — EUA
Condomínio projetado priorizando edificações orientadas a sul (HN).

→ **Casa Duncan** — EUA
Projetada por Keck, patrocinado pela Libbey-Owens-Ford e com apoio do Instituto de Tecnologia de Illinois foi avaliado o desempenho da arquitetura solar através de medições.

1944 → **"Jacob Second House"** — EUA
Casa projetada por Frank Lloyd Wright, com geometria desenvolvida para aproveitar ao máximo os benefícios da radiação solar.

1945 → **Casas pré-fabricadas "Green´s Ready-Built"** — EUA
Foi "a primeira casa solar pré-fabricada construída." Arquiteto Keck,

→ **Casa Solar de Tucson** — EUA
Possui paredes internas pintadas de preto para acumular o calor do dia e liberar a noite. Arquiteto Arthur Brown.

→ **"Boulder House"** — EUA
Projetado pelo engenheiro George Löf. Foi o primeiro sistema de aquecimento solar de ar. Primeira vez que é integrado um sistema solar ativo com instalação de calefação doméstica já existente.

1947 → **Publicação do livro "Your Solar House"** — EUA
Publicado pela Libbey-Owens-Ford Glass Company, apresentando projetos de 49 arquitetos.

→ **"MIT Solar House II"** — EUA
Seus coletores de calor foram localizados na parede sul (HN). Combinava em um só elemento as funções de captação, armazenamento e distribuição de calor, utilizando sistemas de "parede de água".

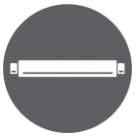
1948 → **Escola Elemental Rosa** — EUA
"A primeira edificação pública aquecida solarmente".
Arquiteto Arthur Brown.

→ **Dover Sun House** — EUA
Dr. Maria Telkes e arquiteta Eleanor Raymond
"A primeira casa aquecida pelo sol do mundo".
Também chamada de "MIT Solar House VI" ou de "Talkes House".
Reconhecido como um projeto exclusivamente feminino.

→ **Reator nuclear pela primeira vez gera energia elétrica** — EUA
Em 3 de setembro de 1948 no Tennessee, Estados Unidos, um reator nuclear liga uma lâmpada elétrica.

1949 → **"MIT Solar House III"** — EUA
Foi a primeira casa solar habitada por uma família.

1950 → **Lâmpadas fluorescentes é popularizada** — EUA
Consumia menos energia, gerava menos calor que as lâmpadas incandescentes e produzia o mesmo fluxo luminoso.



1951 → **Primeiro reator nuclear a gerar eletricidade** — EUA
Foi um pequeno experimento, um reator fermentador, por um laboratório situada em Idaho, EUA. O reator foi ligado em dezembro de 1951.

1954 → **Nascimento das células fotovoltaicas silício** — EUA
Desenvolvida pelo químico Calvin Fuller. Eficiência de conversão era de cerca de 4%.

1956 → **"Denver House"** — EUA
Possui telhado plano e inovadora estrutura de suporte de coletores solares independente. Funcionou por 50 anos. A primeira casa estadunidense a ter equipamentos de aquecimento solar como opcional que não ditam e não distorcem o projeto da casa. Projetado por James Hunter e George Löf.

→ **Usina Nuclear de Calder Hall: Primeira em escala comercial** — Reino Unido
A primeira usina nuclear em escala comercial foi a Usina Nuclear de Calder Hall em Sellafield no Reino Unido. Abriu em 17 de outubro de 1956.

→ **"Solar Building"** — EUA
Primeiro edifício comercial com aquecimento solar ativo no mundo.
Projetado por Frank Bridgers e Don Paxton.

1957 → **Publicação de "Solar Control and Shading Devices"** — EUA
Publicado por Aladar Olgyay, Victor Olgyay.

1959 → **MIT Solar House IV** — EUA
Lexington Massachusetts Institute of Technology – EUA.

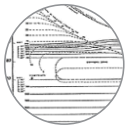
1960 → **Fundação da Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEP)** — Viena (sede)
Arábia Saudita, Irã, Iraque, Kuwait e Venezuela.

1961 → **Fundada a World Wide Fund for Nature (WWF)** — Suíça
Fundado por um grupo de cientistas, é uma Organização não governamental (ONG) internacional que atua nas áreas da conservação, investigação e recuperação ambiental.

1962 → **"St. George s Scholl"** — Grã-Bretanha
Primeiro edifício solar da Grã-Bretanha.
Arquiteto Emslie A. Morgan.
Wallasey, England.

1963 → **Publicação do livro "*Design with Climate: Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism*"** — EUA
Foi o primeiro livro a desenvolver um método racional de projeto que levasse em consideração as variáveis climáticas do lugar.
Autores: Aladar e Victor Olgyay.

→ **O termo bioclimático foi usado pela primeira** — EUA
Utilizado por Victor Olgyay. Os irmãos Olgyay foram os primeiros a criar um procedimento sistemático que possibilitou uma adaptação de uma edificação às necessidades humanas com relação às condições climáticas. O método proposto faz uso de uma Carta Bioclimática.

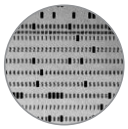


1967 → **"Michel–Trombe House"** — França
Edificação utiliza o que ficou conhecido como "Parede Trombe".
Odeillo, França.

→ **Protótipo do sistema "Roof Pond System"** — EUA
Utilizava um princípio de massa térmica de água para armazenar o calor em períodos quentes e liberá-lo nos períodos frios.
Projetado por Harold Hay.
Atascadero na Califórnia.

1969 → **Publicação do livro "Man, Climate and architecture"** — EUA
Autor: Baruch-Givoni.

Década de 1970 → **Utilização de computador com cartão perfurado e de programas computacionais para o estudo de edificação** — EUA
Entre os programas destacam-se: DEROB, NBSLD e BLAST, e mais tarde, DOE2.



1971 → **Fundação do Greenpeace** — Canadá
Atua em questões relacionadas à preservação do meio ambiente e desenvolvimento sustentável.

→ **"Steve Baer House"** — EUA
Utiliza princípio de massa térmica da água para armazenar o calor em períodos quentes e liberá-lo nos períodos frios.

1972 → **"Humb House"** — EUA
Casa autônoma produz a própria energia.
Arquiteto Michael Reynolds.

→ **Primeira conferência da ONU: Meio Ambiente Humano. Estocolmo – Suécia** — Suécia
Primeiro grande evento sobre meio ambiente do mundo. "Defender e melhorar o meio ambiente para as atuais e futuras gerações se tornou uma meta fundamental para a humanidade." Estabelece 26 princípios relacionados à proteção do meio ambiente e 109 recomendações de ação.

1973 → **Publicação de "Manual of Tropical Housing and Building"** — EUA
Autores: Koenigsberger, Ingersoll, Mayhew, Szokolay

→ **"Atascadero House"** — EUA
Utiliza o sistema "Roof Pond System".
Desenvolvido por Harold Hay, John Edmisten e Enneth Haggard.
Atascadero na Califórnia.

→ **Crise internacional do petróleo**
A elevação do seu preço do petróleo provoca uma crise energética internacional.

1974 → **"Michel Trombe Wall"** — França
Desenvolvido com uma versão ventilada.

→ **Primeira regulamentação térmica de edificações** — França
França foi primeiro país a ter uma regulamentação térmica, em 1974, tratava inicialmente de isolamento e da ventilação das residências.

→ **Início do uso do termo superisolamento** — EUA
O superisolamento é creditado com o início do projeto Lo-Cal House, em 1974. O ano de 1974 foi o responsável pelo "boom" do superisolamento.

1975 → **ASHRAE Standard 90** — EUA
Primeira norma de eficiência energética para projetos e construções de novas edificações.

→ **"Philips Experimental House"** — Alemanha
Edificação com superisolamento e sistema de recuperação de calor.

→ **"DTU zero-energy house"** — Dinamarca
Technical University of Denmark.
"Foi a primeira casa formulada sem necessidade de aquecimento ativo".

1976 → **Segunda edição do "Man, Climate and Architecture" de Givoni** — EUA
A obra toma-se uma referência para arquitetos. O denominado método de Givoni faz uso de um "diagrama bioclimático da edificação".

→ **"Lo-Cal House"** — EUA
Universidade de Illinois, Estados Unidos.
Conceito de edificação superisolada que influenciou projetos futuros.

→ **Publicação do conceito de superisolamento** — EUA
Prof. Wayne Schick, da Universidade de Illinois, publica o conceito de superisolamento.

→ **A primeira turbina eólica comercial ligada à rede elétrica pública foi instalada na Dinamarca** — Dinamarca

1977 → **Realizada a primeira Conferência Nacional Solar Passiva** — EUA

“Saskachewan Conservation House” — Canadá
Projetada por Robert Besant, Rob Dumont, David Eyre e Harold Orr. Foi a primeira casa a demonstrar publicamente a validade do superisolamento. Universidade de Saskatchewan no Canadá.

Casa Branca instalou módulos fotovoltaicos durante a crise do petróleo — EUA
Ronald Reagan (republicano), sucessor de Jimmy Carter (democrata), remover o sistema de geração de energia limpa da construção em 1986.

1978 **“MIT Solar House V”** — EUA
Utiliza princípio de massa térmica da água para armazenar o calor em períodos quentes e liberá-lo nos períodos frios.

1979 **Crise internacional do petróleo**
A elevação do preço do petróleo provoca uma crise energética internacional.

Publicação do livro “The Passive Solar Energy Book” — EUA
Autor: Edward Mazria.

Primeira Conferência Mundial do Clima, Genebra — Suíça
Com caráter científico, apela às nações que tomem conhecimento e investiguem os impactos climáticos. Reuniu 53 países.

“Leger Superinsulated House” — EUA
Casa com superisolamento. Construída em *Masschusetts. Motivou a construção de casas superisoladas nos Estados Unidos e também na Europa.*

Acidente nuclear — EUA
Acidentes na usina nuclear estadunidenses de Three Mille Island.

1980 **Casa experimental em Mendoza** — Argentina
Considerada a primeira casa solar argentina. Arquiteto Enrico Tedeschi.

1981 **Casa Solar de La Plata** — Argentina
O projeto de Elías Rosenfeld (diretor do projeto); Jorge Luis Guerrero e Olga Ravella.

1982 **Criado o R-2000** — Canadá
Programa canadense de certificação que visa à eficiência energética das edificações tendo como um dos principais requisitos o superisolamento.

1984 **Reunião da Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento** — Suíça (Genebra)

1985 **Descoberto buraco na camada de ozônio** — Inglaterra
Foi divulgada em 16 de maio de 1985 pelos pesquisadores Joe Farman, Brian Gardiner e Jonathan Shanklin. Para reverter a situação, foi firmado em 1987 o Protocolo de Montreal, em que os países se comprometeram a substituir os CFCs.

→ **Convenção de Viena para Proteção da Camada de Ozônio (Viena)** — Austrália

1986 → **Acidente nuclear em Chernobyl** — Ucrânia

Pior acidente nuclear da história, em Chernobyl, atual Ucrânia.

1987 → **Protocolo de Montreal (Montreal)** — Canadá

Tratado internacional em que os países signatários se comprometem a substituir as substâncias que demonstrarem ser responsáveis pela destruição do ozônio. Entrou em vigor em 1989.

→ **Publicação do Relatório de Brundtland** — -

O documento intitulado "Nosso Futuro Comum" onde pela primeira vez se ouve falar do conceito de desenvolvimento sustentável: "o desenvolvimento que satisfaz as necessidades presentes, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de suprir suas próprias necessidades".

1988 → **Criação do conceito Passive House** — Alemanha

Conceito construtivo desenvolvido na Alemanha pelos professores Wolfgang Feist e Bo Adamson.

1990 → **Segunda Conferência Mundial do Clima, em Genebra** — Suíça

Avaliação e atualização das decisões tomadas na primeira conferência a partir de novas pesquisas.

→ **BREEAM – Building Research Establishment Environmental Assessment Method** — Reino Unido

Foi pioneiro e lançou as bases de todos os sistemas de avaliação e certificação de edifícios orientados para o mercado que seriam posteriormente desenvolvidos no mundo. Desenvolvido pela Building Research Establishment.

1991 → **Primeira edificação *Passive House*** — Alemanha

Desenvolvido por Wolfgang Feist, em colaboração com Bo Adamson. Darmstadt, Alemanha. Utiliza as cinco estratégias principais: estanqueidade, janelas eficientes, isolamento térmico, controle das pontes térmicas e uso de ventilação mecânica com recuperador de calor.

1992 → **Self-Sufficient Solar House** — Alemanha

A primeira casa autônoma de energia.

→ **Segunda conferência da ONU–Meio Ambiente e Desenvolvimento - Eco 92** — Brasil

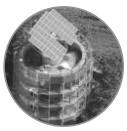
Debate de problemas ambientais mundiais. 172 países participaram. Rio de Janeiro – RJ.

1993 → **Certificação LEED – Leadership in Energy and Environmental Design** — EUA

Inspirado no BREEAM. O LEED é um sistema internacional de certificação e orientação ambiental para edificações utilizado em mais de 160 países, e possui o intuito de incentivar a sustentabilidade de suas edificações. Desenvolvido pela Green Building Council.

1994 → **Heliotrope** — Alemanha

Primeiro edifício do mundo para captar mais energia do que consome, todos os quais é totalmente renovável.
Freiburg - Alemanha. Arquiteto Rolf Disch.



Criado o conceito Minergie — Suíça
Tornando-se um padrão oficial em 1998. Minergie é um rótulo de qualidade suíço para edifícios de baixo consumo de energia baseado.

1995 **Definição do padrão Passive House** — Alemanha
Wolfgang Feist desenvolveu o conceito Passive House baseado na experiência de construção e operação da primeira casa construída em Darmstadt.

1996 **Fundação do Instituto Passive House** — Alemanha
O Instituto Passive House é fundado em 1996 e liderado por F. Feist.

Desenvolvimento do programa computacional EnergyPlus — EUA
Tem suas raízes em dois outros programas: BLAST e DOE-2 que foram desenvolvidos a partir do final da década de 1970.

1997 **Protocolo de Kyoto é assinado** — Japão
O Protocolo de Kyoto define compromissos ambientais para 37 países industrializados, considerados responsáveis pela poluição da atmosfera nos 150 anos anteriores.

Sessão Especial da Assembleia Geral da ONU - Rio+5 — EUA
Nova Iorque, Estados Unidos. Destinada a avaliar os resultados da implantação da Agenda 21.

1999 **Edifício "4 Times Square Building"** — EUA
Um dos arranha-céus mais altos do mundo, com 48 andares e 247 metros de altura, edificado em Nova Iorque, incorpora painéis fotovoltaicos na fachada sul (HN) entre 37º e 43º andar.

"Zero-energy house" — Alemanha
Primeira versão sem sucesso da NZEB.
Construída Dörpe near Hannover.

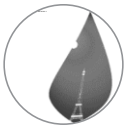
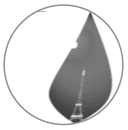
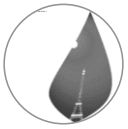
2002 **Terceira conferência da ONU– a Cúpula Mundial sobre Desenvolvimento Sustentável ou Rio+10** — África do Sul
Resultou na Declaração Política e no Plano de Implementação do Desenvolvimento Sustentável. Joanesburgo, África do Sul.

Solar Decathlon — EUA
É uma competição bienal promovida pelo Departamento de Energia dos EUA. Participam equipes de estudantes com o desafio de projetar e construir edifícios altamente eficientes e inovadores alimentados por energia renovável. O primeiro foi realizado em Washington, EUA.

2005 **Protocolo de Kyoto entra em vigor** — Japão
Para que o protocolo entrasse em vigor, era necessário que os países que ratificaram representassem juntos 55% das emissões de gases estufa do mundo. 192 países ratificaram.

2004 **"Sonnenschiff" ou "Sun Ship"** — Alemanha
É o primeiro edifício de escritórios energia positiva (positive energy) do mundo. Freiburg - Alemanha. Arquiteto Rolf Disch.

2008 **Flexibilização do Protocolo de Kyoto** — -
Os mecanismos de flexibilização tornam o Protocolo politicamente sustentável e facilitam o cumprimento das metas pelas nações participantes.

	Início da construção da cidade de Masdar *Projetada pela Foster & Partners pretende ser "a primeira cidade do mundo livre de carbono". Utiliza técnicas tradicionais e atuais para diminuir o consumo de energia. Previsão de conclusão: 2025.*	Emirados Árabes	
2010	**Directiva 2010/31/EU (2010)** *Todos os edifícios construídos na União Europeia a partir de 2020, ou 2018 para edifícios públicos de serviços, deverão ser do tipo Nearly Zero Energy (NZEB), edifícios de baixíssimo consumo energético.*	União Europeia	
2011	**Acidente nuclear no Japão** *Acidente nuclear no Japão devido à um tsunami.*	Japão	
2012	**Quarta conferência da ONU – Cúpula Mundial sobre Desenvolvimento Sustentável ou Rio+20** *Rio de Janeiro, RJ. Objetivo era renovação do compromisso de desenvolvimento sustentável. Participação de 193 nações, trataram de questões ambientais e sociais*	Brasil	
2013	**Instalação de painéis fotovoltaicos na Casa Branca** *Durante a gestão de Barack Obama, como um símbolo de seu compromisso com as energias renováveis.*	EUA	
2015	**Acordo de Paris** *Tratado da Convenção-Quadro da ONU sobre a Mudança do Clima, que rege medidas de redução de emissão dióxido de carbono a partir de 2020. Ao contrário do Protocolo de Kyoto, que se baseava na obrigatoriedade de redução das emissões aos países desenvolvidos, o Acordo de Paris quer envolver todas as nações e incentivar as ações voluntárias e a transparência.*	França	
2016	**Acordo de Paris entra em vigor** *O Acordo de Paris entrou em vigor após ser ratificado por ao menos 55 países que correspondem juntos a 55% da emissão mundial de gases estufa. 169 países ratificaram.*	França	
2017	**EUA iniciaram o processo para deixar o Acordo de Paris**	EUA	
	China inaugura maior usina solar flutuante do mundo *A usina tem capacidade instalada de 40 MW, energia, suficiente para abastecer uma cidade com 15 mil residências.*	China	
2018	**Lâmpadas de halogêneo são proibidas na Europa** *A partir de setembro de 2018 a produção de lâmpadas de halogêneo foi descontinuada, para dar lugar à iluminação LED em toda a Europa.*	Europa	
	Diretiva 2018/844/EU *Pretende acelerar a renovação dos edifícios existentes da União Europeia para que, até 2050, se sejam descarbonizados e com necessidades quase nulas de energia.*	União Europeia	
2019	**Apagões em Nova Iorque** *A onda de calor deixa mais de 50.000 usuários sem energia elétrica (21/07/2019) em Nova Iorque. As companhias do país pedem que os consumidores diminuam o uso de aparelhos de ar condicionado para evitar blecautes.*	EUA	

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

APÊNDICE K: LINHA DO TEMPO DA ARQUITETURA PASSIVAS NO BRASIL

Quadro K -1: Linha do tempo detalhada da arquitetura passiva ao longo de toda história brasileira.

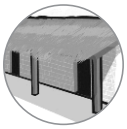
Data	Evento: Breve descrição	Ilustração
44.500 ou 19 mil anos a.C.	→ **Chegada do homem ao continente Americano** *Provável época da chegada do homem ao continente americano – ainda há bastante controvérsia sobre a data mais aproximada.*	
17000 a.C. até 1000 d.C.	→ **Tocas da Serra da Capivara** *No alto sertão piauiense, foram encontrados painéis imensos de pinturas rupestres. Os abrigos eram chamados de tocas e, muitas ainda estavam habitadas quando os arqueólogos iniciaram seus trabalhos.*	
17000 a.C. até atualidade	→ **Casa unitária dos Ianomâmis** *A abertura central, que lembra as casas de pátio grega, serve para a saída da fumaça, ventilação natural, controle da entrada da radiação solar direta, como grandes varandas internas, e entrada da luz solar.*	
	→ **Oca do Alto Xingu** *Utilizam uma abertura no topo da cobertura como fonte de luz, filtro da radiação solar e fonte de ventilação por efeito chaminé. O fechamento de material vegetal permite a infiltração do ar ao mesmo tempo que protege da chuva. As aberturas pequenas protegem do sol.*	
	→ **"Buracos de Bugre"** *Habitação subterrânea indígena utilizada no clima frio. Eram formadas por um buraco no chão que protegia dos ventos e aproveitavam a massa térmica do solo. O fogo era usado para calefação.*	
	→ **Abrigo dos indígenas pampeanos** *Indígenas pampeanos desenvolveram uma técnica construtiva composta de painéis desmontáveis, chamada toldos. Inicialmente eram de material vegetal, posteriormente couro. Os painéis eram ajustados de acordo com as necessidades climáticas da época.*	
	Século XVI	
22 de abril de 1500	→ **Chegada dos portugueses ao Brasil** *A chegada de Pedro Álvares Cabral ao território denominado Ilha de Vera Cruz, muda completamente a cultura arquitetônica do país e a relação dela com o clima e o meio ambiente.*	
1500-1822	→ **Período histórico colonial e imperial do Brasil**	
1538	→ **Primeiros escravos africanos chegaram ao Brasil** *Sua mão de obra foi abundantemente explorada em diversas atividades.*	
Séc. XVI	→ **Uso de janela com um escuro** *Nesse momento as janelas possuem somente uma folha de madeira que abre para o interior do ambiente, denominada "escuro".*	
	→ **Janela geminadas com um escuro** *A adaptação ao clima brasileiro levou a um aumento na dimensão das aberturas, possibilitando maior ventilação e iluminação dos ambientes.*	

→ **Edificações residenciais**
A princípio, as coberturas das casas eram feitas com materiais vegetais, como a palha, semelhante as moradias indígenas. O sistema de cobertura mais comum era o telhado de duas águas. Simplicidade das técnicas utilizadas e pequenas aberturas.

→ **Casa-grande**
Assimilaram elementos das habitações indígenas, como grandes espaços sem divisão, semelhante às ocas. Usavam grossas paredes de taipa ou de pedra e cal, coberta de palha ou telha-vã, alpendre na frente e nos lados, telhados com máximo de proteção contra o Sol forte e as chuvas tropicais - foi uma expressão nova, correspondendo ao nosso ambiente físico.

→ **Senzalas**
Possuíam características semelhantes que as Senzalas dos séculos posteriores. Utilizavam varandas em pelo menos uma de suas faces para proteger da radiação solar intensa.

→ **Varandas e Alpendres**
A varanda surge no Brasil como principal elemento filtrante do exterior, elemento de proteção contra o Sol, a chuva, posto de vigilância, descanso ou contato com o Sol. Eram utilizadas em todas edificações, incluindo Casa-grande e Senzalas.

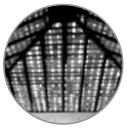


→ **Uso de rede**
Utensílio inventado pelos indígenas, originalmente feita com materiais disponíveis na natureza, como o cipó. Os portugueses adaptaram a rede às suas varandas, passando a utilizar algodão. Facilita a troca de calor do corpo com o ambiente.

Século XVII e XVIII

Século XVII e XVIII

→ **Uso de telha Colonial**
A telha de barro era feita a princípio pela mão de obra escrava e foi utilizada nos edifícios mais abastados. A fabricação manual produzia pequenas falhas e irregularidades que possibilita maior saída de ar quente do que a telha industrializada atual.



→ **Predomino de paredes sobre aberturas**
A área de ventilação e iluminação natural são limitados pelas tecnologias empregadas: taipa e adobe.

→ **Janela colonial com uma ou duas folhas**
Janela colonial, com uma ou duas folhas que abrem para a parte interna. Porém não há controle adequado de iluminação, ventilação e privacidade.

→ **Janela com balaústre**
De seção quadrada ou de geometria variada. Protege da radiação solar direta, melhora o controle de iluminação, ventilação e privacidade. Possibilita a ventilação com segurança.

→ **Janela com rótula**
Era formada por uma treliçado de madeira e por duas folhas de abrir, colocado sobre as janelas existentes, com dobradiças externa. Possibilitava a ventilação permanente do ambiente, quando fechadas, controlando a luminosidade, conforto térmico e privacidade.

→ **Janela com gelosia**
São como "caixotes" sobreposto às janelas, acima do pavimento térreo, formando estruturas que aproveitam os balcões das janelas. É constituída por treliçado de madeira. A metade superior é composta por folhas de abrir. Possibilita a ventilação, com pouca entrada de luz, e protege o interior da visualização externa.

→ **Muxarabis**
É constituído por treliçado de madeira. É um balcão bem saliente, abrangendo dois ou três lanços contínuos de janelas ou a fachada inteira. Controla a passagem de luz excessiva e o fluxo de ar, reduz interna a temperatura e assegura a privacidade.

Urupemas
Alternativa barata a trama de madeira dos muxarabis, rótulas e gelosias. Utiliza no lugar da madeira material vegetal para fazer os tramados. Controla a luz, o vento, protege do sol e mantém a privacidade do ambiente interno.

Alpendres e Varandas
Eram utilizadas em todas edificações: residenciais, públicas, religiosas, particulares. Filtro da radiação solar e da chuva.

Pátios Internos
Herança muçulmana utilizada pela colônia. Era um espaço de atividades religiosas, culturais, cultivo árvores e fontes de água. Criavam um microclima agradável para adaptação climática e conforto ambiental O pátio interno era encontrado em edifícios públicos, religiosos e particulares.

Uso de rede
As redes, invenção indígena, continuaram a ser utilizadas com intensidade no século XVIII.

1753 **Casas dos Bandeirantes**
São ótimos exemplos da utilização da varanda. Entre elas, a mais conhecida é a casa do Padre Inácio, construída em Cotia-SP.

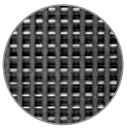
Século XIX

Séc. XIX **Revestimento de Cal**
A caiação das paredes era preferida por causa da cor branca, refletora dos raios solares, o que proporciona maior conforto térmico na moradia. A cal de Portugal era cara e praticamente só no século XIX passou utilizada como material de construção.

Pátios Internos
Foram utilizados em edificações particulares, públicas e religiosas. Exemplo: Residência-Sede da Charqueada São João, Pelotas-RS (1810).

1808 **Chegada da Família Real ao Brasil**
A Família Real aporta no Brasil e estabelece normas referentes a arquitetura e ao urbanismo. Permissão para criação de indústria na colônia. Abertura dos portos as "nações amigas".

1809 **Fim do uso dos muxarabis**
D. João VI determina a retirada dos muxarabis. O ano marca o fim de da influência árabe na arquitetura brasileira quanto a elementos de proteção solar.



Início do uso de vidro
A importação de materiais industrializados possibilitou a utilização de vidros simples e coloridos no lugar das treliças de madeira e urupemas. Predomina as janelas com folhas de vidro em guilhotina. São adotadas nas edificações residenciais, comerciais e institucionais.

1816 **Vinda da Missão francesa**
A partir de então, o neoclassicismo, neogótico, o neobarroco e apropriações ecléticas passam a predominar na arquitetura. A arquitetura que buscava adaptação ao clima perde espaço.

Primeiras décadas de 1800 **Janela guilhotina**
A adoção das janelas guilhotina marca historicamente o definitivo declínio da influência mulçumana.

→ **Uso de rede**
As redes, invenção indígena, continuaram a ser utilizadas com intensidade no século XIX.

1822 → **Independência brasileira - 7 de setembro**

A partir de 1809 → **Aumenta a proporção de janelas**
Tecnologias industrializadas e racionalizadas permitem a diminuição dos fechamentos opacos e aumento dos fechamentos transparentes, possibilitando maior área de ventilação e iluminação.

Séc. XIX → **Porão alto ventilado**
A diminuição dos lotes com as especulações imobiliárias obrigou os proprietários das residências urbanas a aumentar o pé direito do porão para abrigo dos escravos e serviçais. O porão era ventilado, auxiliando no conforto térmico do primeiro pavimento e, o pé-direito elevado, mantinha o ar quente longe do nível dos ocupantes.

→ **Forro Ventilado**
O forro ventilado auxiliava na retirada do ar quente interno e na promoção da entrada do ar refrigerado, renovação do ar, eliminando as impurezas e micro-organismo do ambiente interno.

→ **Bandeiras em portas e janelas**
Elementos que ficam acima das janelas ou portas externas e internas, fixas ou móveis, vazadas ou não. Quando vazadas possibilitam a circulação do ar sem comprometer a privacidade. Quando dispostas nas janelas e portas externas, contribuíam com a iluminação natural, ventilação sem comprometer a privacidade.

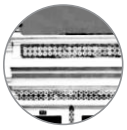
→ **Utilização de azulejo**
A partir do século XIX, passou a ser utilizado mais o azulejo como revestimento das paredes externas, auxiliando na reflexão dos raios solares e proporcionando melhores condições térmicas no interior.

A partir de 1850 → **Surge a veneziana**
Preenchiam os vãos de janelas e portas. Permitem privacidade, com interiores, com sombra e ventilação permanente, porém obstruía a visibilidade para o exterior. O aparecimento das venezianas coincide com o aperfeiçoamento dos hábitos higiênicos.

1870 → **Óculos para ventilação**
Chalés utilizam óculos no frontão para ventilação. Primeiros exemplares datam a década de 1870.

1879 → **Eletricidade surge no Brasil**
Surge no Rio de Janeiro com o início da iluminação interna da estação central da ferrovia D. Pedro II, atual Central do Brasil.

1880 → **Adoção de Platibanda**
Durante o século XIX os beirais foram substituídos gradativamente por platibandas. A partir da década de 1880 as leis municipais não permitiam o escoamento das águas sobre o passeio, decretando o fim oficial dos beirais. O beiral era um importante elemento arquitetônico de proteção solar das edificações.



1881 → **Primeira iluminação pública do Brasil**
A primeira iluminação externa pública surgiu no Rio de Janeiro, na atual Praça da República.

1883 → **Primeira cidade a ter luz elétrica nas ruas**
A cidade de Campos -RJ, foi a primeira cidade a ter luz elétrica nas ruas, em virtude da presença de uma usina termoelétrica.

1887 → **Primeira usina hidroelétrica do país**
Primeira usina hidrelétrica do país foi construída em Portão de Ferro, na cidade de Diamantina (MG).

→ **Primeira capital com iluminação pública elétrica**
Porto Alegre foi a primeira capital brasileira a contar com iluminação pública elétrica.

1888 → **Fim da escravidão**
Princesa Isabel assina a Lei Áurea, que proíbe a escravidão no Brasil.

1889 → **Início da operação da maior hidrelétrica da América Latina**
Usina Hidrelétrica de Marmelos de Juiz de Fora, Minas Gerais.

1892 → **Primeira linha de bondes elétricos**
Foi inaugurada na cidade do Rio de Janeiro, a primeira linha de bondes elétricos instalada em caráter permanente no país.

1899 → **Criação da São Paulo Light**
Entrada do capital estrangeiro no setor elétrico.

Século XIX

1903 → **Primeira lei disciplinando o uso de energia elétrica**
Aprovação, pelo Congresso Nacional, do primeiro texto de lei disciplinando o uso de energia elétrica no país.

1914 a final de 1930 → **Arquitetura Neocolonial**
Apresenta uma grande variedade de elementos de controle solar pertinentes ao clima brasileiro como: diferentes tipos varandas; grandes beirais; predomínio de cores claras e uso de azulejo que refletem os raios solares.

1922 → **Semana de Arte Moderna de São Paulo**
Influencia indiretamente a Arquitetura - criou um clima novo nas artes e ambiente intelectual propício à renovação que se seguiria na arquitetura.

1927-1928 → **Casa Modernista da Rua Santa Cruz – SP de Gregori Warchavchik**
Marco da arquitetura modera brasileira.
Uso de varandas, elementos de proteção solar nas janelas, cor branca que reflete a radiação solar.

1929-1930 → **Casa Modernista da Rua Itápolis – SP de Gregori Warchavchik**
Uso de varandas, elementos de proteção solar nas janelas, cor branca que reflete a radiação solar.

1929 → **Primeira visita de Le Corbusier ao Brasil**
A visita do Le Corbusier influencia os jovens arquivos brasileiros.

Patente do Cobogó, em Recife
Elemento de controle solar desenvolvido antes da sistematização dos brises. Nome oriundo dos sobrenomes dos criadores: Amadeu Oliveira Coimbra, Ernest August Boeckmann e Antônio de Góis.

1935 **Caixa d'água no Alto da Sé, Olinda**
Primeiro uso do Cobogó na arquitetura.
Arquiteto Luis Nunes.

1936-38 **ABI (Associação Brasileira de Imprensa)**
"Primeiro edifício do mundo a ter construído brise moderno."
Rio de Janeiro, projeto dos Irmãos Roberto

1936 **Segunda visita de Le Corbusier ao Brasil**
Auxilia no projeto do Ministério da Educação e Saúde, influencia na adoção de brises.

1936-43 **Primeira utilização do Brise em edifício de grandes proporções**
Ministério da Educação e Saúde, Rio de Janeiro, projetado pelo grupo de arquitetos brasileiros. Utiliza conscientemente os brise nas faces noroeste.

Primeiro uso de pele de vidro
Ministério da Educação e Saúde, Rio de Janeiro. A pele de vidro foi utilizada pela primeira vez e viria a tornar-se o protótipo dos arranha-céus que caracterizariam a prosperidade estadunidense na segunda metade do século XX.

1937 **Obra do Berço, Rio de Janeiro**
"Primeiro exemplo de integração do brise-soleil móvel na arquitetura".
Arquiteto Oscar Niemeyer.

1938 **Institucionalização da exploração de petróleo**
Institucionalização das atividades de exploração de petróleo no Brasil com a criação do Conselho Nacional do Petróleo (CNP).

1938-39 **Pavilhão do Brasil na Feira Mundial, Nova Iorque.**
Uso de proteção solar tipo colmeia: divulgação da arquitetura moderna brasileira no mundo.
Arquitetos Lúcio Costa e Oscar Niemeyer.

1940 **Predomínio da lenha como fonte de energia**
Até 1940 a principal fonte primária de energia no Brasil era a lenha, que respondia por 70% do consumo energético.

1941 **"O Petróleo é Nosso!"**
Descoberta de petróleo no Recôncavo Baiano.

1943 **Edifício Seguradoras**
Adota um sistema de brises que fazem parte da composição.
Projetado por M.M.M. Roberto.

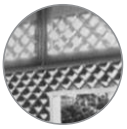
Publicação do livro *Brazil Builds*
Livro de Philip Goodwin divulga a arquitetura brasileira mundialmente, enfatizando as estratégias de adaptação ao clima.

1947-52 **Conjunto Residencial do Pedregulho**
Utiliza amplamente cobogós e ventilação cruzada.

1952 **Estação Rodoviária de Londrina**
Utiliza brises horizontais na composição das fachadas. Projeto do arquiteto Vilanova Artigas.

1953 **Criação da Petrobras**

1954 **Parque Guinle, Rio de Janeiro**
Utiliza amplamente cobogós e brises para proteger da radiação solar direta. Arquiteto Lúcio Costa.



1953-1955 **Edifício Marquês de Herval**
M.M.M. Roberto.
Persianas basculantes em alumínio compões toda a fachada principal do edifício (que não existem mais).

1957 - 1960 **Construção de Brasília**
A construção de Brasília representa o início da influência da arquitetura estadunidense. A crença no condicionamento proporcionado pelos sistemas mecânicos de refrigeração passou a predominar.

1960 **Criação do Ministério das Minas e Energia**

1962 **Criação da Empresa Centrais Elétricas Brasileiras S.A – Eletrobrás**
Criada com o objetivo de participar da coordenação técnica, administrativa e financeira do setor elétrico.

1959 e 1961 **Edifício Avenida Central**
Arquitetura nacional tem nítida influência estadunidenses, início do predomínio de fachadas de vidros sem proteção solar e intenso uso de sistemas de ar condicionado (Estilo internacional). Rio de Janeiro, Arq. Henrique Mindlin.

1972 **Início da construção da usina nuclear Angra I**
Situada em Angra dos Reis, Rio de Janeiro. Em 1985, teve início a operação comercial.

1973 **Crise internacional do petróleo**
A elevação do seu preço do petróleo provoca uma crise energética internacional.

→ **Criação do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia – Inmetro**
Vinculado ao Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior, tem como um dos objetivos verificar a observância das normas técnicas e legais, planejar e executar as atividades de acreditação de laboratórios de calibração e de ensaios.

1975 → **Primeiro hospital da rede Sarah Kubitschek**
Projetado em Brasília, construção entre 1976/80. Utiliza uma série de estratégias de arquitetura passiva, tanto de ventilação, controle da radiação solar, iluminação natural, uso de vegetação, massa térmica entre outras. Arquiteto Lelé.

→ **Criação do Proálcool**
Para enfrentar a crise mundial do petróleo foi instituído o Plano Nacional do Álcool e o Programa Nacional do Álcool (Proálcool).

→ **Início da construção da usina hidrelétrica de Itaipu**
Na época era a maior hidroelétrica do mundo. Construção finalizada em 1982.

1976 → **Início da construção da usina nuclear Angra II**
Situada em Angra dos Reis, Rio de Janeiro. Entrou em operação comercial no ano de 2001.

1979 → **Crise internacional do petróleo**
A elevação do seu preço do petróleo provoca uma crise energética internacional.

1981 → **Criação do Programa Conserve**
Foi a primeira iniciativa do poder público para incentivar o uso de medidas de eficiência energética em nível nacional. Visava promover a conservação de energia na indústria, o desenvolvimento de produtos eficientes e a substituição de energéticos importados por fontes nacionais.

1982 → **Programa de Mobilização Energética (PME)**
Um conjunto de ações guiadas para incentivar medidas de conservação de energia e substituir derivados de petróleo por fontes renováveis de energia.

1984 → **Criação do Programa Brasileiro de Etiquetagem**
Coordenado pelo Inmetro, responsável por fornecer informações sobre o desempenho dos produtos, a fim de influenciar a escolha dos consumidores para que tomem decisões de compra mais conscientes.

1985 → **Criação do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica - Procel**
Vinculado ao Ministério das Minas e Energia, executado pela Eletrobrás, com a missão de articular o setor elétrico e a sociedade, visando fomentar a eficiência energética e o uso racional de energia.

1987 → **Casa Ennio Cruz da Costa**
Utiliza estratégias passivas como: ventilação natural, parede trombe, beirais amplos, massa térmica do solo entre outras. Porto Alegre – Bairro Belém Velho.

1990 → **1° Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído – ENCAC**
Realizado em Gramado-RS onde se discutiu a necessidade de ser desenvolvida uma normalização sobre o desempenho térmico e energético de edificações adequada à realidade brasileira.

1991 → **1° Encontro Nacional de Normalização Ligada ao Uso Racional de Energia e ao Conforto Ambiental em Edificações**

Teve o intuito de definir diretrizes básicas para o desenvolvimento da normalização brasileira e sua compatibilização com as normas argentinas e uruguaias.

1992 → **A primeira turbina de energia eólica do Brasil**

Foi instalada em Fernando de Noronha-PE. A segunda turbina foi instalada em maio de 2000 e entrou em operação em 2001.

→ **Segunda conferência da ONU–Meio Ambiente e Desenvolvimento - Eco 92**

Debate de problemas ambientais mundiais. 172 países participaram. Rio de Janeiro – RJ.

1993 → **4° Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído – ENTAC**

Propõe itens básicos a serem inseridos na norma de desempenho térmico e energético de edificações.

1994 → **Hospital da Rede Sarah de Salvador**

Destaca-se a continuação dos projetos da Rede Sarah iniciados na década de 1970. O Hospital da Sarah de Salvador, evidencia o uso de sheds para prever ventilação e iluminação natural.

→ **Plano Real e aumento de consumo de energia**

O consumo de energia cresce após o plano Real. Aumenta o poder aquisitivo e os preços dos eletrodomésticos diminuem, impactando diretamente no consumo elétrico residencial.

1996 → **Criação do LabEEE (Laboratório de Eficiência Energética em Edificações)**

Vinculado ao Núcleo de Pesquisa em Construção do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

1997 → **Lei n.9.478**

Lança a Política Energética Nacional (PEN) e cria o Conselho Nacional de Política Energética e a Agência Nacional de Petróleo. Ficaram determinados os princípios da PEN em relação ao aproveitamento racional das fontes de energia, visando à conservação energética e a preservação do meio ambiente.

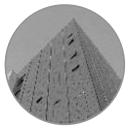
→ **Cresce o uso de vidro e ar-condicionado**

Crescente predomínio de fachadas envidraçadas com uso de ar-condicionado principalmente em edificações corporativas e comerciais. Exemplo o Shopping Brasília, projetado por Ruy Ohtake em 1997.

Século XXI

2000 - ? → **Predomínio de arranha-céus envidraçados**

Principalmente em edificações corporativas continua o predomínio de pele de vidro em todos os climas do país com o uso excessivo de ar-condicionado.



2000/ 2004 → **Último Hospital da rede Sarah Kubitschek projetado por Lelé**

Construído entre 2004 a 2008 no Rio de Janeiro. Assim como o primeiro projeto, utiliza variadas estratégias para conforto e eficiência energética.

2000 → **Decreto Federal n° 3330**

Dispondo sobre a redução do consumo de energia elétrica em prédios públicos da Administração Pública Federal.

→ **Promulgada a Lei 9.991**
Regulamenta a obrigatoriedade de investimentos em programas de eficiência energética no uso final por parte das empresas brasileiras distribuidoras de energia elétrica.

2001 → **Regulamentada a lei n° 10.295, "Lei de Eficiência Energética"**
Dispõe sobre a Política Nacional de conservação e Uso Racional de Energia Elétrica, a qual visa a alocação eficiente de recursos energéticos e a preservação do meio ambiente.

→ **Decreto 4.059/2001**
Regulamenta a Lei 10.295 e estabelece os níveis máximos de consumo de energia, ou mínimos de eficiência energética, de máquinas e aparelhos consumidores de energia fabricados ou comercializados no país, bem como as edificações construídas, serão estabelecidos com base em indicadores técnicos e regulamentação específica.

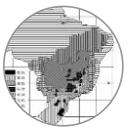
2001 e 2002 → **Apagões no Brasil**
Crise nacional de fornecimento e distribuição de energia elétrica.

2002 → **Decreto Federal n° 4131**
Dispõem sobre medidas emergenciais de redução do consumo de energia elétrica no âmbito da Administração Pública Federal.

2003 → **A Criação do Programa Nacional de Eficiência Energética em Edificações – Procel Edifica**
Com o objetivo de construir as bases necessárias para racionalizar o consumo de energia nas edificações brasileiras.

→ **Criação do Programa de Capacitação de Laboratórios de Conforto**
Parceria entre o Procel Edifica e a Eletrobrás, visando a capacitação de laboratórios para auxiliar na etiquetagem de edificações.

2005 → **Publicação da NBR 15.220 – Desempenho Térmico de Edificações (Parte 1, 2, 3, 4 e 5)**
Estando presente na norma a Parte 3: Zoneamento Bioclimático Brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. O país foi dividido em oito zonas bioclimáticas, cada zona possui um conjunto de recomendações técnico-construtivas.



2006 → **Casa Eficiente, Florianópolis – UFSC/LabEEE**
Casa utiliza diversas estratégias passivas. É uma edificação para estudo e promoção de estratégias passivas.

→ **Inaugurado o Parque Eólico de Osório-RS**
É o segundo maior centro de geração de energia eólica no Brasil (em 2011). Possui a capacidade instalada de 150 megawatts.

→ **Plano Nacional de Energia – PNE 2030**
Primeiro estudo de planejamento de longo prazo de caráter energético elaborado pelo governo brasileiro.

2007 → **Descoberto petróleo no Pré-Sal**
A descoberta do petróleo no Pré-Sal promete um futuro sem dependência do petróleo externo.

→ **Primeira certificação ambiental de uma edificação brasileira**
Em junho de 2007, ocorre a primeira certificação ambiental de uma edificação brasileira: a agência do Banco Real, na Granja Vianna, em Cotia/SP recebe a certificação LEED.

→ **Certificação AQUA-HQE (Alta Qualidade Ambiental)**
Sistema de certificação fundado por Vanzolini e desenvolvido pelos professores da Escola Politécnica da USP. Preza pelas boas práticas na construção e operação sustentável de edifícios e; pela a implementação de atividades de planejamento sustentável de alta qualidade.

2009 → **Inaugurado a Usina de Energia Eólica de Camocim-CE**
As 50 torres geram 104,4 megawatts de energia.

→ **Inauguração da Casa E, Porto Alegre**
Casa desenvolvida utilizando estratégias passivas e com baixo consumo de energia.

→ **Inmetro publicou o RTQ-C**
Manual com requisitos técnicos da qualidade para nível de eficiência de edifícios comerciais, de serviços e públicos.

→ **Programa Minha Casa, Minha Vida (PMCMV)**
Foi lançado em março de 2009 pelo Governo Federal. Repete o mesmo padrão construtivo em todo país, sem considerar a adaptação climática.

2010 → **Selo Casa Azul**
Tem como objetivo reconhecer e incentivar projetos que contribuam com a redução de impactos ambientais. São 53 critérios, incluindo critérios de conforto térmico e de eficiência energética. A adesão é voluntária para os projetos apresentados à Caixa Econômica Federal.

→ **Foi publicada a RTQ-R**
Esse documento contém a metodologia para analisar as edificações residenciais e enquadrá-las em níveis de eficiência energética de "A", mais eficiente a "E", menos eficiente.

→ **Promulgada a Lei 12.212**
Alterou o percentual destinado aos consumidores de baixa renda. As concessionárias e permissionárias de distribuição de energia elétrica devem aplicar, no mínimo, 60% dos recursos dos seus programas de eficiência energética em unidades consumidoras beneficiadas pela Tarifa Social.

→ **Certificação Qualiverde**
Adesão opcional, como primeira proposta de decreto de lei, de caráter governamental, cidade do Rio de Janeiro, para conceder benefícios fiscais para empreendimentos com características sustentáveis

2011 → **Início da Construção da Usina Hidrelétrica do Belo Monte – Pará**
A usina de Belo Monte será a terceira maior hidrelétrica do mundo em potência instalada. Será a maior usina hidrelétrica inteiramente brasileira.

→ **Plano Nacional de Eficiência Energética – PNEf**
Descreve ações diversas que podem ser desenvolvidas para aumentar a conservação de energia nos setores industrial, transportes, edificações, iluminação pública, educação, entre outros.

2012

→ **Inaugurado o Complexo Eólico Alto Sertão I – Bahia**
É o maior parque gerador de energia eólica do Brasil e da América Latina. As 184 torres geram 294 megawatts de energia.

→ **Proibição da venda de lâmpadas incandescente com mais de 150W**

→ **Resolução Normativa 482 da ANEEL**
Permite que o consumidor instale pequenos geradores (tais como painéis solares fotovoltaicos e microturbinas eólicas, entre outras fontes renováveis) em sua unidade consumidora e troque energia com a distribuidora local com objetivo de reduzir o valor da fatura de energia elétrica.

2013

→ **Criação da NBR 15575**
Por intermédio da qual edifícios residenciais passaram a ser objeto da regulamentação, no sentido da avaliação de desempenho.

→ **Proibição da venda de lâmpadas incandescente com potência entre 60 e 100W**

→ **Publicação do Requisitos de Avaliação da Conformidade para Eficiência Energética de Edificações – RAC**

2014

→ **Obrigatória Etiquetagem de Edificações Públicas Federais**
Publicado no Diário Oficial a Instrução Normativa que torna obrigatória a etiquetagem nos projetos e construções de edificações públicas federais, com área superior a 500m², novas ou que recebam retrofit que altere seus sistemas de iluminação, condicionamento de ar ou sua envoltória. Estas edificações devem obter ENCE "A".

→ **Selo Procel e LEED (Leadership in Energy and Environmental Design)**
Equivalência que torna possível projetos com Selo Procel Edificações estarem de acordo com as exigências do pré-requisito de Energia e Atmosfera da certificação LEED, que trata do desempenho energético mínimo no sistema de classificação LEED BD & C de 2009.

→ **Criação da Associação Casa Passiva Brasil**
Teve por finalidade discutir a implementação do conceito Passive House no Brasil. UFPEL - Pelotas – RS.

→ **Proibição da venda de lâmpadas incandescente com potência entre 41 e 60W**

→ **Resolução Normativa 687 da ANEEL**
Tem o objetivo de aprimorar a resolução 482 de 2012, tornando possível instalar pequenas usinas geradoras, como as microturbinas eólicas, geradores de biomassa e de energia solar fotovoltaica. Esse processo de compensação é chamado de "autoconsumo remoto".

2016

→ **Primeiro seminário internacional da Casa Passiva Brasil**
Realizado na UFPel – Pelotas.

2017 → **Primeira utilização residencial de ventilação mecânica com recuperador de calor**

Utilizado pela primeira vez o sistema ventilação mecânica com recuperador de calor em edificação residencial no Brasil, em Foz do Iguaçu-PR.

→ **Usina de fotovoltaica de Nova Olinda**

Inaugurado no Piauí, capacidade de suprir o consumo elétrico de 300 mil famílias, com potência de 292 MW e 930 mil painéis fotovoltaicos, acompanham a trajetória aparente do Sol. É (2018) o maior parque solar da América Latina.

2018 → **Novo apagão de energia**

21 de março: Apagão deixa 70 milhões de pessoas sem energia elétrica em 14 estados do Norte e Nordeste brasileiro.

→ **Greve dos caminhoneiros, também chamada de Crise do Diesel**

Greve iniciada em maio, evidenciou, entre outras coisas, a grande dependência brasileira dos combustíveis fósseis.

→ **Construção da primeira edificação *Passive House* no Brasil**

A edificação, com 80 m², foi inaugurada em 23 de julho de 2018 em Natal-RN e será utilizada como laboratório e ambiente para cursos. O projeto foi financiado pelo Ministério Federal da Educação e Pesquisa da Alemanha e executado em parceria com o SENAI – RN.

→ **Segundo seminário internacional da Casa Passiva Brasil**

Realizado na UFPel – Pelotas.

2019 → **Energia de usinas fotovoltaica centralizadas de grande porte ultrapassam a capacidade instalada das usinas nucleares no Brasil**

Em 2019, a energia solar de usinas fotovoltaica centralizadas de grande porte passa a ser a sétima maior fonte de energia do Brasil.

Fonte: elaborado pelo próprio autor.