



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DA INTEGRAÇÃO LATINO-AMERICANA
Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território
Centro Interdisciplinar de Tecnologia e Infraestrutura
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PGECI)
Mestrado em Engenharia Civil

Linha de Pesquisa 3: Sustentabilidade e Meio Ambiente

***DESIGN* GENERATIVO PARA CRIAÇÃO DE ELEMENTOS DE
CONTROLE SOLAR PARA A ARQUITETURA**

MARCELO LANGNER

Foz do Iguaçu
2020



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DA INTEGRAÇÃO LATINO-AMERICANA
Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território
Centro Interdisciplinar de Tecnologia e Infraestrutura
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PGECI)
Mestrado em Engenharia Civil

DESIGN GENERATIVO PARA CRIAÇÃO DE ELEMENTOS DE CONTROLE SOLAR PARA A ARQUITETURA

MARCELO LANGNER

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof^a. Dr^a. Helenice Maria Sacht

Foz do Iguaçu

2020

MARCELO LANGNER

**DESIGN GENERATIVO PARA CRIAÇÃO DE ELEMENTOS DE CONTROLE SOLAR
PARA A ARQUITETURA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof^a. Dr^a. Helenice Maria Sacht
UNILA

Prof^o. Dr^o. Egon Vettorazzi
UNILA

Prof^a. Dr^a. Maria Gabriela Caffarena Celani
UNICAMP

Prof^a. Dr^a Marieli Azoia Lukiantchuki
UEM

Foz do Iguaçu, 05 de agosto de 2020.

Catálogo elaborado pelo Setor de Tratamento da Informação
Catálogo de Publicação na Fonte. UNILA - BIBLIOTECA LATINO-AMERICANA - PTI

L284d

Langner, Marcelo.

Design generativo para criação de elementos de controle solar para a arquitetura / Marcelo Langner. - Foz do Iguaçu-PR, 2020.

146 f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Orientador: Helenice Maria Sacht.

1. Controle solar. 2. Eficiência energética. 3. Design generativo. 4. Otimização multicritério. I. Sacht, Helenice Maria Orient. II. Título.

CDU: 620.9:502

Dedico este trabalho a minha
companheira.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à UNILA por possibilitar a realização do presente mestrado. A professora Helenice Maria Sacht, pela orientação e apoio durante todo o desenvolvimento da pesquisa.

A todo corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e aos colegas, em especial Carlos Alberto Brant, Fernando Davies, Wagner de Almeida Ferreira e William Thomas por todo o apoio e companheirismo durante as disciplinas cursadas.

Ao amigo Egon Vettorazzi por todo o incentivo intelectual e exemplarismo, desde a graduação até este momento.

A meus familiares, mãe, pai e irmãs, pelo suporte.

A minha companheira Thais Soares, por tudo.

RESUMO

Arquitetos, engenheiros e projetistas podem fazer o uso de algoritmos evolutivos de otimização, em conjunto com programas de simulação computacional de eficiência energética, para a criação de ferramentas individuais de design generativo responsivo. Esse tipo de ferramenta pode ser aplicada para o estudo e otimização de elementos de controle solar, por exemplo. O objetivo da presente pesquisa foi realizar uma análise comparativa de programas e algoritmos de otimização multiobjetivo, que permitem a resolução multicritério, em conjunto com programas de simulação computacional para a verificação das condições de eficiência energética, conforto térmico e iluminação natural de diferentes tipologias de elementos de controle solar. A metodologia utilizada incluiu o uso de ferramentas, tais como, ferramentas de programação visual (*Grasshopper*), ferramentas CAD (*Rhinoceros*) e de simulação computacional de consumo energético e iluminação (*EnergyPlus* e *Radiance*), para permitir a manipulação de parâmetros de elementos de controle solar de forma generativa e responsiva, considerando a cidade de Foz do Iguaçu-PR. Os resultados demonstraram que o programa *Opossum* é o mais acessível em termos de configuração, o programa *Wallacei X* utilizado juntamente com o algoritmo NSGA-II apresentaram melhor desempenho para estudos com número de simulações reduzido, já o programa *Octopus* utilizado juntamente com o algoritmo SPEA-2 e *Hype* demonstrou estabilidade para estudos com maior quantidade de simulações, sendo o mais indicado para interoperabilidade com o *EnergyPlus* e *Radiance*. Além da avaliação dos programas, foram salientadas as tipologias e características de elementos de controle solar cujo uso, implica ao mesmo tempo, em melhores condições de conforto térmico, lumínico e eficiência energética.

Palavras-chave: Elemento de controle solar. Eficiência energética. Design generativo. Otimização Multicritério.

ABSTRACT

Architects, engineers and designers can make use of evolutionary optimization algorithms, in conjunction with computational energy efficiency simulation programs, to create individual tools of responsive generative design. This type of tool can be applied to the study and optimization of solar control elements. The objective of the present research was to carry out a comparative analysis of software and multiobjective optimization algorithms, which allow multicriteria resolution, together with computer simulation programs to verify the conditions of energy efficiency, thermal comfort and natural lighting of different types of elements of solar control. The methodology used included the use of tools, such as visual programming tools (Grasshopper), CAD tools (Rhinoceros) and computer simulation of energy consumption and lighting (EnergyPlus and Radiance), to allow the manipulation of parameters of control elements generatively and responsively, considering the city of Foz do Iguaçu-PR. The results showed that the Opossum program is the most accessible in terms of configuration, the Wallacei X program used together with the NSGA-II algorithm showed better performance for studies with reduced number of simulations, whereas the Octopus program used together with the SPEA-2 and Hype demonstrated stability for studies with a greater number of simulations, the most suitable for interoperability with EnergyPlus and Radiance. In addition to the evaluation of the programs, the typologies and characteristics of elements of solar control were highlighted, whose use implies, at the same time, in better conditions of thermal comfort, lighting and energy efficiency.

Keywords: Solar control device. Energy efficiency. Generative design. Multicriteria optimization.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	19
2. OBJETIVOS	22
2.1 OBJETIVO GERAL	22
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	22
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
3.1 ELEMENTOS DE CONTROLE SOLAR E SUAS ORIGENS.....	23
3.1.2 <i>Surgimento dos Elementos de Controle Solar</i>	<i>23</i>
3.1.3 <i>Arquitetura Islâmica</i>	<i>25</i>
3.2 DESIGN DOS ELEMENTOS DE CONTROLE SOLAR.....	28
3.2.1 <i>Pórticos, Pergolados, Marquises e Varandas</i>	<i>32</i>
3.2.2 <i>Prateleiras de Luz.....</i>	<i>34</i>
3.2.3 <i>Elementos Vazados.....</i>	<i>35</i>
3.2.4 <i>Treliças e Grelhas</i>	<i>36</i>
3.2.5 <i>Beirais</i>	<i>37</i>
3.2.6 <i>Brisés-soleil.....</i>	<i>38</i>
3.2.7 <i>Toldos.....</i>	<i>39</i>
3.2.8 <i>Persianas e Venezianas.....</i>	<i>40</i>
3.2.9 <i>Elementos de Controle Solar Complexos.....</i>	<i>41</i>
3.3 ELEMENTOS DE CONTROLE SOLAR E VISTA DE QUALIDADE	42
3.4 ELEMENTOS DE CONTROLE SOLAR NA ÚLTIMA DÉCADA	43
3.5 ALGORITMOS GENERATIVOS E SEU USO NA ARQUITETURA.....	45
3.5.1 <i>A evolução do CAD.....</i>	<i>45</i>
3.5.2 <i>Arquitetura Paramétrica e Algoritmos Generativos</i>	<i>46</i>
3.5.3 <i>Uso do Design Generativo para Elementos de Controle Solar</i>	<i>49</i>
4. METODOLOGIA.....	54
4.1 PROGRAMAS DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	56
4.1.1 <i>Rhinoceros e Grasshopper</i>	<i>57</i>
4.1.2 <i>Energyplus e Radiance.....</i>	<i>59</i>

4.1.3 Ladybug Tools	60
4.1.4 Octopus, Wallacei X e Opossum	63
4.1.6 Ordem de Utilização dos Programas de Simulação Computacional.....	65
4.1.7 Clima para Estudo de Elementos de Controle Solar.....	66
4.1.8 Modelo para Simulação Computacional	68
4.1.9 Parâmetros de Simulação Computacional	71
4.1.10 Elementos de Controle Solar Utilizados nas Simulações	77
4.1.11 Análise dos Dados	79
5. RESULTADOS.....	82
5.1 PROJETOS RECENTES COM UTILIZAÇÃO DE ELEMENTOS DE CONTROLE SOLAR.....	82
5.1.1 Resultados da Pesquisa Bibliográfica.....	82
5.1.2 Projetos Recentes que Fazem o Uso de Elementos de Controle Solar.....	84
5.2 DETERMINAÇÃO DO FATOR DE VISIBILIDADE.....	85
5.3 CRIAÇÃO DO SCRIPT COM PLATAFORMA DE PROGRAMAÇÃO VISUAL GRASSHOPPER.....	87
5.4 ALGORITMOS DE OTIMIZAÇÃO E PROGRAMAS	88
5.5 OTIMIZAÇÕES	93
5.5.1 Veneziana Vertical - Orientação Norte.....	94
5.5.2 Veneziana horizontal - Orientação Norte.....	98
5.5.3 Treliça - Orientação Norte	101
5.5.4 Elemento Complexo Voronoi – Orientação Norte	104
5.5.5 Veneziana Vertical - Orientação Oeste.....	107
5.5.6 Veneziana Horizontal - Orientação Oeste.....	110
5.5.7 Treliça - Orientação Oeste.....	113
5.5.8 Elemento Complexo Voronoi - Orientação Oeste	116
5.5.9 Todas as Opções Analisadas em Comparação aos Casos Otimizados.....	118
5.6 DISCUSSÃO	122
5.7 PANORAMA SOBRE AS DIFICULDADES ENCONTRADAS NA EXECUÇÃO DAS SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS	124
6. CONCLUSÃO.....	126

6.1 SUGESTÃO PARA PESQUISAS FUTURAS.....	128
REFERÊNCIAS	129

LISTA DE FIGURAS

Figura 3-1: Reconstrução da primeira casa da Idade de Ferro	24
Figura 3-2: Templo Megaron.	24
Figura 3-3: Território da expansão Islâmica.	26
Figura 3-4: Jardim de uma casa pátio	27
Figura 3-5: Típica casa pátio no Cairo.....	27
Figura 3-6: Coeficiente de sombreamento de elementos de controle solar	32
Figura 3-7: Pórtico	33
Figura 3-8: Pérgula.....	33
Figura 3-9: Marquise Malba, Buenos Aires	34
Figura 3-10: Varanda Edifício no Jardim Japonês em Buenos Aires.	34
Figura 3-11: Prateleira de luz vista interna.....	35
Figura 3-12: Prateleira de luz vista externa.....	35
Figura 3-13: Elemento vazado em residência de Foz do Iguaçu-PR.....	36
Figura 3-14: Elemento vazado no MAM do Rio de Janeiro.	36
Figura 3-15: Trelças de madeira na Casa Branca / Studio MK27.....	37
Figura 3-16: Grade metálica na fachada do edifício Teatro Popular Oscar Niemeyer. ...	37
Figura 3-17:Templo Indiano Hoysaleshwara com beiral construído no século XIII.	37
Figura 3-18: Beiral em Edifício no Jardim Japonês em Buenos Aires.	37
Figura 3-19: Edifício Cité de Refuge.....	38
Figura 3-20: Brises mistos (verticais e horizontais), no Palácio Gustavo Capanema-RJ.	39
Figura 3-21: Brise vertical em loja na rua Oscar Freire-SP.	39
Figura 3-22: Brise horizontal no Edifício Colombia 325-SP.	39
Figura 3-24: Toldo sobre janela.	40
Figura 3-25: Toldo sobre porta janela.....	40
Figura 3-26: Veneziana externa.	41
Figura 3-27: Persianas Internas.	41
Figura 3-28: Elemento de sombreamento complexo em formato Voronoi.	42
Figura 3-29: Elemento de sombreamento complexo em formato de Fractal.....	42
Figura 3-30: Elemento de controle solar do Edifício Al Bahar Towers.....	42

Figura 3-31: Elemento complexo em fachada do Edifício Small Scale em Beijing-China.	42
Figura 3-32: Elemento de Controle Solar sem obstrução da vista externa	43
Figura 3-33: Elemento de Controle Solar com obstrução da vista externa	43
Figura 3-34: Esquema da criação de cobertura com elementos de controle solar acoplado a estrutura de iluminação zenital.....	50
Figura 3-35: Otimização por algoritmos evolutivos de elementos de controle solar.	50
Figura 3-36: Modelo utilizado para simulação no EnergyPlus com algoritmos.	51
Figura 3-37: Parâmetros e resultados das simulações.....	51
Figura 3-38: Modelo utilizado para simulação no EnergyPlus com algoritmos.	52
Figura 3-39: Modelo utilizado para simulação no EnergyPlus com algoritmos evolutivos.	52
Figura 4-1: Fluxograma da metodologia.	55
Figura 4-2: Diagrama do fluxo de trabalho entre os programas	57
Figura 4-3: Interface do programa Rhinoceros 6.....	58
Figura 4-4: Esquema de programação visual por ícones no Grasshopper.....	58
Figura 4-5: Fluxograma de funcionamento do Ladybug.....	61
Figura 4-6: Fluxograma de funcionamento do Honeybee.	61
Figura 4-7: Fluxograma de funcionamento do Butterfly.	62
Figura 4-8: Fluxograma de funcionamento do Dragonfly	62
Figura 4-9: Interface do <i>Octopus</i>	64
Figura 4-10: Estratégias bioclimáticas para edifícios em Foz do Iguaçu-PR.	67
Figura 4-11: Planta baixa, corte e perspectiva da célula.	70
Figura 4-12: Fluxograma do <i>script</i> para criação dos elementos de controle solar de forma generativa.....	76
Figura 4-13: Ângulo de visão do observador.	78
Figura 4-14: Componente View Analysis.	78
Figura 4-15: Item que se repete na tabela e gráfico das análises.	80
Figura 5-1: Elementos de controle solar utilizados nos artigos.....	82
Figura 5-2: Numero de publicações de 2007 a 2018.	83
Figura 5-3: Programas utilizados para simulação computacional de conforto e eficiência energética.....	83

Figura 5-4: Elementos de controle solar utilizados nos edifícios analisados na revista eletrônica ArchDaily.	84
Figura 5-5: Script análise do fator de visibilidade.	85
Figura 5-6: Itens considerados e complexidade das variáveis do <i>script</i> criado para desenvolvimento de elementos de controle solar através de projeto generativo.....	87
Figura 5-7: Interface Octopus.	89
Figura 5-8: Interface de análise dos dados do programa <i>Wallacei X</i>	90
Figura 5-9: Interface Opossum.	91
Figura 5-10: Janela Resultados Opossum.	91
Figura 5-11: Gráfico do desempenho dos algoritmos de otimização para conforto térmico.	92
Figura 5-12: Gráfico do desempenho dos algoritmos de otimização para demanda energética.....	93
Figura 5-13: Gráfico de todas as simulações (azul) <i>versus</i> os melhores resultados e o <i>Pareto Front</i> (vermelho) da veneziana vertical norte.	97
Figura 5-14: Gráfico de todas as simulações (vermelho) <i>versus</i> os melhores resultados e o <i>Pareto Front</i> (azul) da veneziana horizontal norte.....	100
Figura 5-15: Gráfico de todas as simulações (vermelho) <i>versus</i> os melhores resultados e o <i>Pareto Front</i> (azul) da treliça norte.	103
Figura 5-16: Gráfico de todas as simulações (vermelho) <i>versus</i> os melhores resultados e o <i>Pareto Front</i> (azul) do elemento complexo voronoi norte.....	106
Figura 5-17: Gráfico de todas as simulações (vermelho) <i>versus</i> os melhores resultados e o <i>Pareto Front</i> (azul) da veneziana vertical oeste.....	109
Figura 5-18: Gráfico de todas as simulações (vermelho) <i>versus</i> os melhores resultados e o <i>Pareto Front</i> (azul) da veneziana vertical oeste.....	112
Figura 5-19: Gráfico de todas as simulações (vermelho) <i>versus</i> os melhores resultados e o <i>Pareto Front</i> (azul) da treliça oeste.....	115
Figura 5-20: Gráfico de todas as simulações (vermelho) <i>versus</i> os melhores resultados e o <i>Pareto Front</i> (azul) do elemento complexo voronoi oeste.....	118
Figura 5-21: Gráfico de todas as simulações (azul) <i>versus</i> os melhores resultados e o <i>Pareto Front</i> (vermelho) da veneziana vertical norte.	121
Figura A-1: <i>Script</i> completo.....	142

Figura A-2: Script elementos de controle solar.	143
Figura A-3: Scrit Zona térmica.	144
Figura A-4: Script materiais.	144
Figura A-5: Script Resultados.	145
Figura A-6: Script coleta de dados e programas otimizadores multiobjetivos.	146

LISTA DE TABELAS

Tabela 3-1: Uso de elementos de controle solar.....	29
Tabela 3-2: Tipos de elementos de controle solar e Condicionantes que interferem na sua eficiência.	31
Figura 3-19: Edifício Cité de Refuge.....	38
Figura 3-31: Elemento de Controle Solar sem obstrução da vista externa	43
Fonte: (MADEIGUINCHO, 2020)	43
Figura 3-32: Elemento de Controle Solar com obstrução da vista externa	43
Fonte: (KOGAN, 2013).....	43
Tabela 3-3: Derivações do CAD em outras disciplinas.....	45
Tabela 4-1: Exigências e sugestões do Código de Obras, NBR 15575 e INI-R.....	69
Tabela 4-2: Características físicas dos componentes construtivos.	70
Tabela 4-3: Parâmetros para calibragem do modelo computacional.	71
Tabela 4-4: Ícones do <i>Honeybee</i> e <i>LadyBug</i> para modelagens da célula para estudo da demanda energética.	73
Tabela 4-5: Ícones do <i>Honeybee</i> para estudo de iluminação natural.	75
Tabela 4-6: Ícones do <i>Honeybee</i> e <i>Ladybug</i> para leitura dos resultados	75
Tabela 4-7: Características resumidas dos elementos de controle solar analisados.	79
Tabela 5-1: Limites aletas elementos de controle solar.	86
Tabela 5-2: Resultados das simulações da célula referência.....	94
Tabela 5-3: Resultados mais relevantes das simulações venezianas verticais norte.	96
Tabela 5-4: Resultados mais relevantes das simulações venezianas horizontais norte.	99
Tabela 5-5: Resultados mais relevantes das simulações das treliças norte.....	102
Tabela 5-6: Resultados mais relevantes dos elementos complexos voronoi norte.	105
Tabela 5-7: Resultados mais relevantes das venezianas verticais oeste.	108
Tabela 5-8: Resultados mais relevantes das venezianas horizontais oeste	111
Tabela 5-9: Resultados mais relevantes das treliças oeste obtidos por Pareto Front .	114
Tabela 5-10: Resultados mais relevantes dos elementos complexos Voronoi oeste. ...	117
Tabela 5-11: Resultados: Demanda Energética com Uso de Venezianas Verticais Otimizadas <i>versus</i> todas as possibilidades.....	119

Tabela 5-12: Diferença entre o <i>Pareto Front</i> da otimização e todas as possibilidades.	121
Tabela 5-13: Diferença entre os melhores resultados da otimização e todas as possibilidades.	121
Tabela 5-14: Resultados <i>Pareto Front</i> dos elementos de controle solar na orientação norte.....	122
Tabela 5-15: Resultados <i>Pareto Front</i> dos elementos de controle solar na orientação oeste.	123
Tabela 5-16: Tempo médio de simulação de cada célula com elementos de controle solar.	124

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Demanda energética das venezianas verticais	97
Equação 2: Demanda energética	97
Equação 3: Demanda energética com veneziana horizontal norte	100
Equação 4: Percentual de conforto térmico com veneziana horizontal norte	100
Equação 5: Percentual de iluminação natural com veneziana horizontal norte	101
Equação 6: Demanda energética com treliça norte	103
Equação 7: Percentual de conforto térmico com treliça norte	103
Equação 8: Percentual de iluminação natural com treliça norte	103
Equação 9: Demanda energética com elemento complexo Voronoi norte	106
Equação 10: Percentual de conforto térmico com elemento complexo Voronoi norte	106
Equação 11: Percentual de iluminação natural com elemento complexo Voronoi norte	106
Equação 12: Demanda energética com veneziana vertical oeste	109
Equação 13: Percentual de conforto térmico com veneziana vertical oeste	109
Equação 14: Percentual de iluminação natural com veneziana vertical oeste	109
Equação 15: Demanda energética com veneziana horizontal oeste	112
Equação 16: Percentual de conforto térmico com veneziana horizontal oeste	112
Equação 17: Percentual de iluminação natural com veneziana horizontal oeste	112
Equação 18: Demanda energético com treliça oeste	115
Equação 19: Percentual de conforto térmico com treliça oeste	115
Equação 20: Percentual de iluminação natural com treliça oeste	115

1. INTRODUÇÃO

No processo de projeto, os arquitetos geralmente dão início pelo conceito, com uma imagem vaga da forma e soluções relacionadas ao desempenho, o que prejudica a eficiência energética final da edificação (SONG, GHABOUSSI e KWON, 2016). O fato de os profissionais negligenciarem o uso de ferramentas de simulação computacional de eficiência energética na fase inicial é devido à modelagem energética ser uma tarefa demorada, porém é durante o estudo inicial da forma que a modelagem energética tem o potencial de trazer maiores funcionalidades e ganhos de eficiência para o projeto (GRANADEIRO, *et al.*, 2013).

Esse cenário custoso da modelagem computacional para fins de simulação vem sofrendo mudanças com o surgimento de novos ambientes e ferramentas de projeto. O projeto paramétrico, processos generativos e pensamento algorítmico estão alterando os métodos de criação e desenvolvimento dos produtos e *design* das coisas (OXMAN, 2017a).

Essas mudanças na arquitetura e engenharia surgem principalmente devido ao projeto paramétrico, que possibilita o desenvolvimento das variáveis e componentes de projeto por parâmetros, que são manipulados facilmente no decorrer de todo o processo projetual.

O projeto paramétrico traz um mundo de possibilidades ao campo da arquitetura e engenharia, que possibilita a criação de regras de eficiência e desempenho que atuem durante o desenvolvimento do projeto, por exemplo, que o projetista acompanhe simultaneamente o desempenho energético do edifício durante o processo de desenvolvimento da forma, ou até seja alertado quando determinada métrica de consumo ultrapasse o desejado. Isso tudo é possível com as ferramentas paramétricas de projeto associadas a ferramentas de simulação computacional.

Embora o projeto paramétrico traga consigo muitas facilidades, ele muda a forma de interação do projetista com os métodos e ferramentas de projetos tradicionais. Ao invés da interação profunda com desenho e prancheta, passa a interagir muito mais com regras, funções e receitas de projeto, do que com o desenho em si que é um resultado dos objetivos de projeto. Esse novo método traz consigo a necessidade de aplicação de um novo paradigma, que exige o pensamento algorítmico e paramétrico dos componentes arquitetônicos para projetar (OXMAN, 2017a).

Para aqueles que já estão habituados ao processo de projeto paramétrico associado a ferramentas de simulação computacional, segundo Santos, Schleicher e Caldas (2017a), o *design* pode ser desenvolvido responsivamente ao desempenho, criando um ciclo interativo e cansativo de criação e avaliação, que pode limitar a profundidade da exploração dentro de um espaço de solução projetual. Para esses casos o *design* generativo surge como uma possibilidade de exploração mais profunda da forma para o desempenho, possibilitando um ciclo automático de otimização da forma.

O *design* generativo pode ser compreendido por uma abordagem que se difere das demais existentes de modo que o projetista irá interagir com os produtos e materiais por meio de um sistema generativo e não mais de maneira direta. Desta forma, o projeto não será mais resultado de uma ação direta e exclusiva do projetista e sim, da mistura de parâmetros abstratos e possíveis variações de projeto (BIAO; RONG, 2008).

Dentre todas as exigências de desempenho ao exercício do arquiteto e engenheiro, os relacionados ao desempenho de eficiência energética e conforto ambiental tem grande relevância para a sustentabilidade e passivo ambiental do mundo.

No mundo, o consumo de energia elétrica das edificações residenciais representa 22% de toda energia produzida (ABERGEL, *et al.*, 2018), e no Brasil, 28,98% (EPE, 2019). O consumo energético advindo da refrigeração de edifícios é a que apresenta maior potencial de crescimento no mundo até 2050, sendo o Brasil a 6^o nação com maior potencial de uso de ar-condicionado no mundo (BIARDEAU, *et al.*, 2019) (DEAN, *et al.*, 2016). A necessidade do desenvolvimento de projetos residenciais com eficiência energética está cada vez mais presente na realidade brasileira e, com o advento do aquecimento global, países de climas quentes como o Brasil tendem a consumir cada vez mais energia com climatização (LAMBERTS, 2020).

Devido à necessidade de mitigação do consumo excessivo de recursos energéticos, várias alternativas surgiram em prol de auxiliar engenheiros e arquitetos a projetarem e construir edifícios mais eficientes nas últimas décadas, dentre elas podemos citar os edifícios passivos e de consumo quase nulo encontrados em diversas localidades do mundo. Esses edifícios são caracterizados pelo uso de elementos arquitetônicos que utilizam recursos naturais do local de implantação, como vento e radiação solar de forma a proporcionar conforto ambiental, e quando necessário empregar elementos ativos de baixo consumo energético (MARINO, NUCARA e PIETRAFESA, 2017).

Segundo Caldas e Norford (2002), dentre os elementos construtivos, a janela é um dos mais complexos quando se trata de desempenho térmico e lumínico. Pois ao mesmo tempo em que pode maximizar a iluminação natural e reduzir o consumo de iluminação artificial, tem o efeito de aumentar ou diminuir a carga térmica da edificação de acordo com a orientação e localização geográfica, influenciando assim no consumo de energia com climatização e conforto térmico. Por isso, é necessário considerar sempre os usos da edificação e estabelecer as prioridades, estudando as aberturas de forma a favorecer a função da arquitetura, e ainda, controlar a radiação solar por meio do sombreamento.

Com o advento do ar-condicionado, o sombreamento tem se tornado útil para redução do consumo energético em escala global, embora, não seja gratuito, seu investimento tem compensado (LECHNER, 2015). Os elementos de controle solar vêm sendo utilizados em várias culturas ao longo da história como na arquitetura do Antigo Egito, Grega e Romana, na arquitetura vernácula e contemporânea. Seu uso foi explorado de forma criativa e inteligente por arquitetos como Frank Lloyd Wright e Le Corbusier. Praticamente todos os edifícios de Frank Lloyd Wright fazem uso de grandes saliências para o sombreamento das aberturas que em sua maioria eram amplas para maximizar a ventilação e iluminação natural (LECHNER, 2015).

Com base na necessidade de projetos de edificações com desempenho energético e as possibilidades do uso de ferramentas computacionais que permitem a exploração mais abrangente e inteligente dos elementos construtivos, esse trabalho propõe estudar a criação de elementos de controle solar, a partir desse novo paradigma projetual, com ferramentas de *design* ou projeto paramétrico associadas às ferramentas de simulação computacional de eficiência energética buscando verificar as ferramentas computacionais disponíveis.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Realizar uma análise de programas computacionais utilizados para o desenvolvimento de projetos, por meio de algoritmos de otimização multiobjetivo, que permitem a definição multicritério, para resolução de problemas na criação de elementos de controle solar, verificando as condições de eficiência energética, conforto térmico e iluminação natural.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Atualmente, existem diferentes algoritmos de otimização multiobjetivo para o desenvolvimento de projeto generativo. Optou-se por selecionar os algoritmos multiobjetivos disponíveis, compatíveis com o programa *Grasshopper*, são eles: SPEA-2, NSGA-II, HYPE, RBFMOpt, MACO, NSPSO e MOEA/D . Diante disso, foram desenvolvidos os seguintes objetivos específicos:

1. Avaliação das ferramentas computacionais e sua utilização para o desenvolvimento e detalhamento de elementos de controle solar;
2. Realização de simulações computacionais com diferentes elementos de controle solar, utilizando as ferramentas citadas e avaliando a sua usabilidade com finalidades comparativas;
3. Análise das melhores respostas em termos de elementos de controle solar, verificando a eficiência das ferramentas, de forma a alcançar melhores soluções em termos de eficiência energética, após a análise da demanda de energia para garantir melhores condições de conforto térmico e iluminação natural.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 ELEMENTOS DE CONTROLE SOLAR E SUAS ORIGENS

3.1.2 Surgimento dos Elementos de Controle Solar

Para compreensão da origem dos elementos de controle solar, se faz necessário entender o que levou o homem a desenvolvê-los, e em que momento da evolução da sociedade e arquitetura ele foi criado e aprimorado.

A espécie humana surgiu cerca de 350 mil anos atrás (MOLINARO e PAGANI, 2018), tendo como seu primeiro abrigo as cavernas, com a função principal de proteção contra predadores e condições climáticas extremas, como tempestades e nevadas (VARZANEH, AMINI e BEMANIAN, 2014). Quando seu conhecimento permitiu uma diminuição na mortalidade e técnicas de monocultura agrícola, diminuindo a sua necessidade de migração para alimentação, o homem começou a buscar umidade e temperatura estável para obter conforto térmico em seu abrigo e locais de convívio, manipulando a incidência solar, os ventos predominantes, as técnicas e materiais de construção (PRUITT e KRAMER, 2017; MARAGNO e ROURA, 2010).

Os primeiros registros da civilização humana indicam que seu desenvolvimento inicial foi originado no Vale do Indo, localizado entre o nordeste da África e sudeste da Ásia, acerca de 4000 a.C em clima quente e seco, relativamente confortável para sua sobrevivência (PRUITT e KRAMER, 2017).

As principais culturas que apresentam aspectos de manipulação do espaço construído para melhor conforto térmico foram as dos antigos Egípcios, Gregos, Chineses e Indianos (MARAGNO e ROURA, 2010). Assim, de acordo com a singularidade de cada ambiente, as civilizações desenvolveram e adaptaram as técnicas construtivas a materiais disponíveis na sua região.

Os primeiros elementos de controle solar desenvolvidos pelo homem foram similares ao que conhecemos hoje como varandas ou alpendres. Eles são citados na descrição das residências da região de Amarna no antigo Egito estudadas pela arqueóloga Kate Spence (SPANACE, 2004). São caracterizadas como os principais exemplos das casas do antigo Egito e apresentam elementos com o alpendre ou varanda em sua composição como citado pela pesquisadora:

A característica mais interessante da ampliação da habitação é o alpendre. Isso é claramente um acréscimo, quando sua parede leste se sobrepõe à parede leste da casa. A relação com a entrada para o térreo mostra que o alpendre foi adicionado mais tarde do que a extensão do térreo ao oeste e ao sul. A escadaria que leva ao alpendre começa na porta do andar térreo. É preservado a uma altura de 1,27m da varanda e geralmente começa na porta do andar térreo. É claro, portanto, que a entrada principal da casa em sua forma posterior não levou ao andar térreo, mas ao primeiro andar. Duas bases de coluna que supostamente caíram de cima do térreo foram encontradas ao norte da varanda; esses são de tamanhos diferentes e são mais bem acabados do que no hall central, que parece ter apenas uma forma grosseira (SPANCE, 2004, p.146).

As varandas também podem ser encontradas nas residências dos antigos gregos, como no caso da residência na região de Messenia, Grécia (Figura 3-1), que em sua descrição apresenta uma varanda e beirais. Essa residência é caracterizada como original de 1200 a.C. (SNODGRASS, 1987).

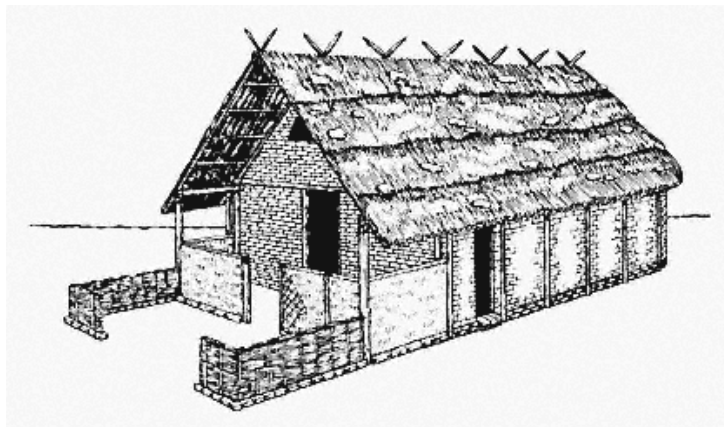


Figura 3-1: Reconstrução da primeira casa da Idade de Ferro
Fonte: (SNODGRASS, 1987).

Ainda na Grécia, século IV a.C., Sócrates propôs um projeto de templo Megaron (Figura 3-2) com uma varanda orientada para o sul, para possibilitar a entrada de radiação solar para aquecer em épocas frias e sombrear em épocas quentes (MARAGNO e ROURA, 2010).



Figura 3-2: Templo Megaron.
Fonte: (MARAGNO e ROURA, 2010).

Segundo Denzer (2013), Sócrates propôs o mesmo princípio para casa nas escrituras Xenophon”s Memomorabilia III:

Em casa com um aspecto sul, os raios do sol petrificam-se nos pórticos no inverno, mas no verão o caminho do sol está bem acima de nossas cabeças e acima do telhado, de modo que há sombra. Se, então, esse é o melhor arranjo, devemos construir o lado sul mais alto para obter o sol de inverno e o lado norte mais baixo para evitar os ventos frios (DENZER, 2013, p.10).

Antes da arquitetura Islâmica, pressupõem-se que os espaços sombreados como pátios, varandas e pórticos apresentavam função puramente climática (LECHNER, 2015), e conforme o homem começou a se desenvolver intelectualmente, passou a fazer uso principalmente da luz do sol para criar ambientes de características religiosas.

A arquitetura que melhor representa o domínio da luz e radiação natural para conforto térmico é derivada da civilização Islâmica, devido ao seu desenvolvimento social e econômico ocorrer em região de clima quente com bioma desértico e mediterrâneo, com alta exposição solar, ventos fortes e alta oscilação de temperatura (GARCÍA-PULIDO, 2012).

Contudo, o uso dos elementos de controle solar foram acontecendo simultaneamente em diversas culturas dentre os Antigos Gregos, Romanos, Egípcios, Chineses e Indianos, que já apresentavam elementos semelhantes na sua arquitetura, tais como, os pórticos, colonatas, beirais, treliças, varandas e saliências, que são parte da cultura vernacular desses povos, antes da influência direta da expansão Islâmica no século XX (LECHNER, 2015) (MARAGNO e ROURA, 2010).

3.1.3 Arquitetura Islâmica

A arquitetura Islâmica foi originada no século VII pela civilização muçulmana expandindo seu desenvolvimento em diversos territórios, desde a Espanha no Ocidente até a Índia no Oriente (Figura 3-3). Teve influência dos povos do Norte da África como os Persas e Egípcios, e a Grego Romana do Mediterrâneo (ALCALÁ, 1999; SOUZA, 2012). Embora essa arquitetura se desenvolveu com bases já bem consolidadas, absorvendo elementos de extrema importância para sua riqueza em arquitetura bioclimática como os pórticos, as varandas, os pátios internos e chaminés de

vento ou coletores de vento, eles aperfeiçoaram esses elementos através da sua cultura religiosa e técnicas artesanais.



Figura 3-3: Território da expansão Islâmica.

Fonte: (RUTHVEN e NANJI, 2004).

A Expansão do povo árabe e sua disseminação associada ao Islamismo aconteceu devido a ocorrência de condições climáticas adversas em seu território tradicional entre 450 a 750 d.C. Os sistemas de irrigação da Arábia secaram, fazendo com que mais de seiscentos assentamentos árabes fossem abandonados (GARCÍA-PULIDO, 2012). Assim devido a necessidade de melhores condições de vida e da filosofia incorporada da nova religião revelada a Muhammad (570-632), o povo árabe no início do século VII expandiu seu território, conseguindo não só conquistar outras áreas, mas também influenciar povos diversos com as ideias e manifestações culturais e artísticas semelhantes advindas do Islamismo (MANDEL, 1985).

Pode-se observar na Figura 3-3 que os povos Islâmicos, devido a um comportamento menos hostil respeitando o idioma, cultura e costumes locais tiveram uma grande aceitabilidade dos povos conquistados perdurando suas conquistas até o século XIII (MELLO, 1975). Assim, a sua manifestação artística e cultural incorporou as características de construção dos locais conquistados e mesclou o processo de criação da arte e arquitetura com os costumes árabes e de outras culturas (MARAGNO e ROURA, 2010).

Uma das principais contribuições da arquitetura islâmica foi seu desenvolvimento ambiental as casas pátios. Embora já existissem na arquitetura Persa e Egípcia, a religião islâmica

atribuiu ao seu interior significado transcendente e aperfeiçoou não somente a sua forma mais também seu uso (ALCALÁ, 1999; SOUZA, 2012; GARCÍA-PULIDO, 2012).

As casas pátio foram aperfeiçoadas as condições climáticas, tirando proveito de uma série de mecanismos físicos combinados: radiação solar, evaporação e ventilação para gerar conforto ambiental. Sua configuração espacial e forma são de linguagem comum, mas com muita preocupação da interação com o meio ambiente (GARCÍA-PULIDO, 2012).

Devido a sua localização, as casas pátio se defendiam da radiação solar direta e entrada de ventos quentes, se fechando para o exterior e se abrindo para os pátios internos. As aberturas voltadas para os pátios internos geralmente eram protegidas por alpendres e as voltadas para o exterior por treliças, fazendo com que os ambientes internos fossem escuros, mas com temperaturas mais amenas (GARCÍA-PULIDO, 2012).

O pátio que abrigava o jardim se apresenta como a peça principal que funcionava para ventilar, iluminar, coletar água e climatizar os ambientes internos de forma natural. Esses pátios (Figura 3-4 e Figura 3-5) tinham conexão direta com os ambientes internos e torre de ventilação. Eram compostos por jardins com espelhos d'água, revestimento de azulejo, pórticos, pérgolas, alpendres e vegetação, que criavam um microclima sombreado, possibilitando acumular o ar frio durante a noite para climatizar o edifício durante o dia através dos efeitos termo físicos, chaminé e Venturi (GARCÍA-PULIDO, 2012; MARAGNO e ROURA, 2010; ALCALÁ, 1999).



Figura 3-4: Jardim de uma casa pátio
Fonte: (EISSA, 2004).



Figura 3-5: Típica casa pátio no Cairo
Fonte: (EISSA, 2004).

O aperfeiçoamento dos pátios na arquitetura árabe e islâmica não aconteceu somente pela necessidade de adaptação, mas também pela interpretação de que representava um lugar intermediário entre a terra e o Éden prometido no Alcorão, sendo planejado e desenvolvido como um local sagrado (ALCALÁ, 1999). Isto também aconteceu na manipulação da luz solar com desenhos geométricos das gelosias, muxarabi e arte dos azulejos, que passam a ser utilizados para decorar ambientes de característica religiosa (ALCALÁ, 1999).

O caráter religioso da arquitetura islâmica e a sua influência em outras culturas prevalece até os dias atuais, e teve grande importância para o desenvolvimento e aperfeiçoamentos dos elementos de controle solar em diferentes culturas, dentre elas a portuguesa, que ao colonizar o Brasil, trouxe consigo a herança de uma arquitetura preocupada com a interação com o meio ambiente.

3.2 *DESIGN* DOS ELEMENTOS DE CONTROLE SOLAR

Os elementos ou dispositivos de controle solar são componentes externos e/ou internos com função de controlar e/ou bloquear os raios solares de um edifício. Podem ser classificados como fixos ou móveis nas posições horizontais, verticais ou mistos (BROW e DEKAY, 2004; BITTENCOURT, 2004).

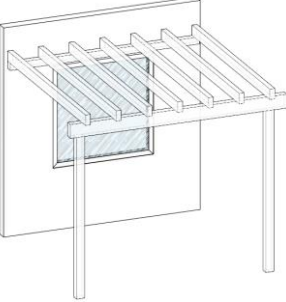


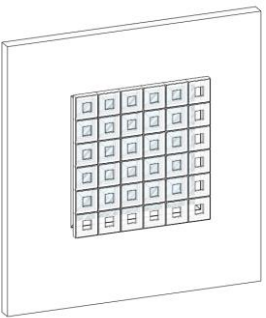
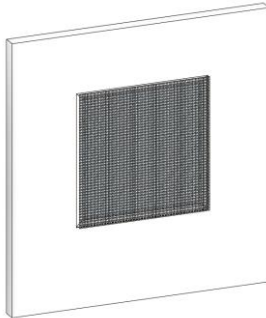
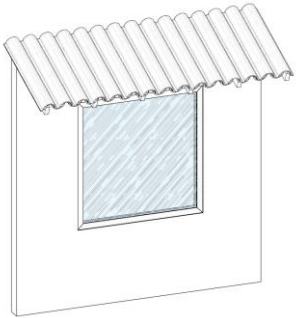
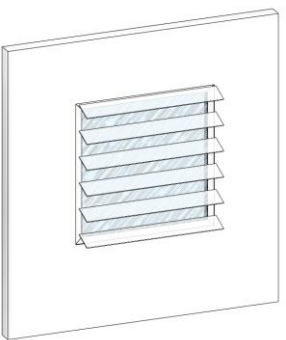
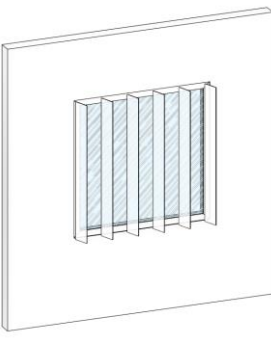
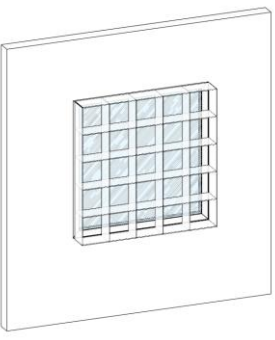
Embora os elementos de controle solar sejam geralmente elementos construtivos, há ocorrência do uso de componentes externos não construídos, tais como: a vegetação do entorno imediato, que também podem proporcionar proteção solar nos edifícios. Com isso, pode-se definir que um elemento de controle solar é qualquer elemento que proporcione proteção do edifício da radiação solar direta ou que proporcione sombreamento.

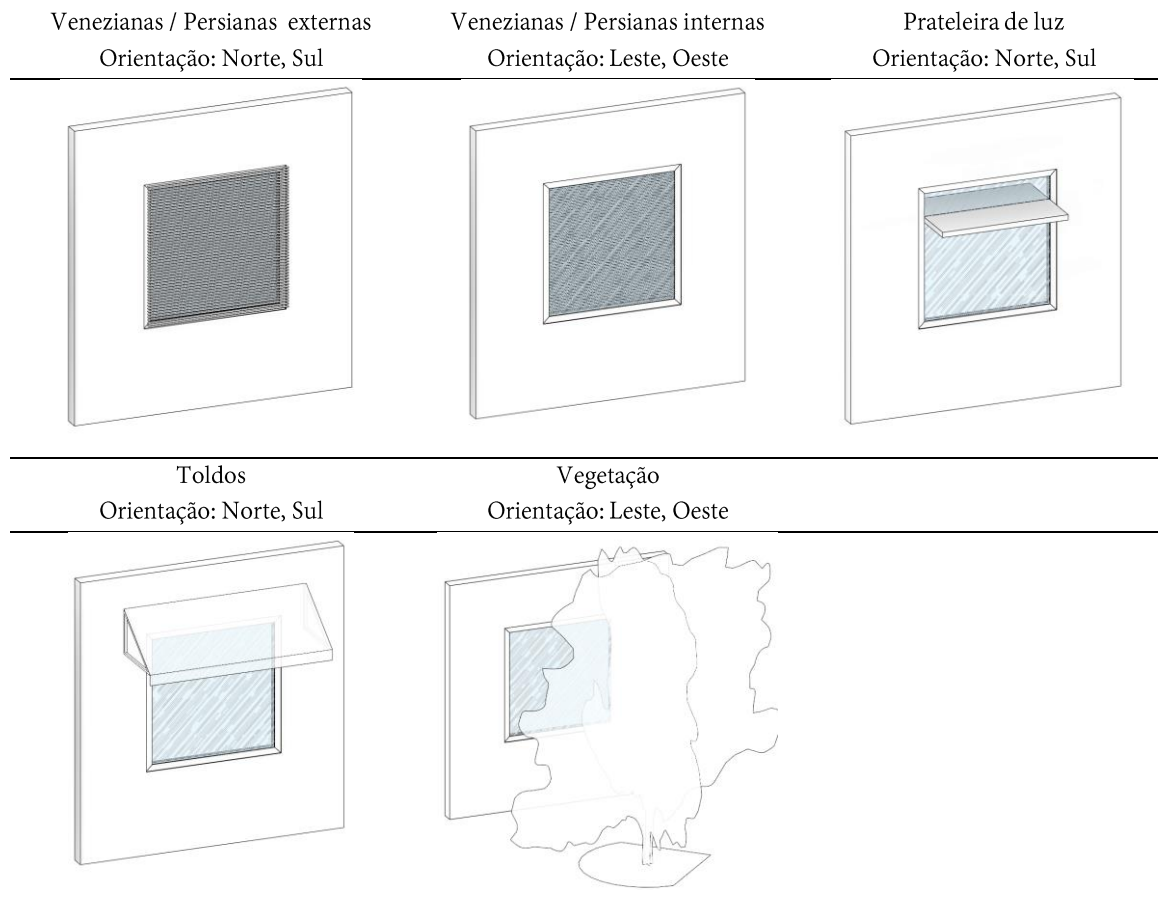
O sombreamento passivo ou controle da radiação solar direta pode ser alcançado pelo uso do paisagismo do entorno, edificações independentes no entorno, extensão da edificação, elementos estruturais do edifício e elementos não estruturais do edifício (BROW e DEKAY, 2004).

Dentre os elementos de controle solares mais utilizados pode-se citar: pórticos, pergolados, marquises, varandas, estante ou prateleira de luz, elementos vazados, treliças e grelhas, beirais, brises, toldos, persianas, venezianas, pergolados, cortina, dentre outros (BROW e DEKAY, 2004; LITTLEFIELD, 2011).

Ainda que os elementos de controle solar sejam recomendados para todos os tipos de edificação, a escolha da sua tipologia e características influencia diretamente na sua eficiência. Gurgel (2012), explica em seu livro “*Design Passivo*”, que os elementos de controle solar devem ser projetados de forma a criar sombra sem gerar desconforto ao usuário, considerando as características climáticas do local e a trajetória aparente do sol durante todos os períodos do ano, e propõem que sejam orientados de acordo com a indicação da Tabela 3-1 para latitudes do hemisfério sul.

Tabela 3-1: Uso de elementos de controle solar.

<p>Pérgolas Orientação: Norte, Sul</p>	<p>Marquise Orientação: Norte, Sul</p>	<p>Varanda Orientação: Norte, Sul</p>
		
<p>Elementos perfurados Orientação: Leste, Oeste</p>	<p>Treliças e grelhas Orientação: Leste, Oeste</p>	<p>Beiral Orientação: Norte, Sul</p>
		
<p>Brise Horizontal Orientação: Norte, Sul</p>	<p>Brise Vertical Orientação: Leste, Oeste</p>	<p>Brise Misto Orientação: Leste, Oeste</p>
		



Para as fachadas orientadas a norte e sul, para o hemisfério sul, onde o sol é relativamente alto durante as estações quentes, recomenda-se o uso de elementos fixos ou móveis instalados horizontalmente, tais como: beirais, pérgolas com vegetação caducifólia, toldos, marquises, varandas e brises horizontais ou mistos.

Para fachadas leste e oeste, onde o sol se apresenta baixo e com radiação mais intensa durante o nascente e o poente, é pertinente o uso de elementos fixos ou móveis na vertical e externamente ao edifício, tais como: Brises verticais ou mistos, muxarabis, elementos estruturais perfurados, vegetação, persianas e venezianas.

É possível observar na Tabela 3-2, que cada elemento de controle solar apresenta condicionantes de dimensões e componentes diferentes de acordo com sua tipologia.

Tabela 3-2: Tipos de elementos de controle solar e Condicionantes que interferem na sua eficiência.

Elemento de controle solar	Condicionantes
Pérgolas	Distância entre vigas; dimensões (altura, largura, comprimento) das vigas, área de sombreamento da pérgola.
Marquise	Dimensão (largura, comprimento) da marquise, diferença de altura da marquise e abertura.
Varanda	Largura, comprimento e altura.
Elementos perfurados	Dimensão do elemento (altura, largura, profundidade), dimensão e geometria dos vãos perfurados, distância entre o elemento e a abertura.
Treliças e grelhas	Dimensão (altura, largura) e geometria dos vãos ou área de permeabilidade do ar e luz solar.
Beiral	Comprimento do beiral, altura entre o beiral e a abertura.
Brise Horizontal	Quantidade, dimensão (altura, largura, comprimento) e ângulos das aletas, distância entre o elemento e a abertura.
Brise Vertical	Quantidade, dimensão (altura, largura, comprimento) e ângulos das aletas, distância entre o elemento e a abertura.
Brise Misto	Quantidade, dimensão (altura, largura, comprimento) e ângulos das aletas, distância entre o elemento e a abertura.
Venezianas / Persianas	Quantidade, dimensão (largura, comprimento) e ângulos das aletas. Instalação interna ou externa.
Prateleira de luz	Dimensão (largura, comprimento) e ângulos da aleta. Dimensão da abertura acima da prateleira de luz.
Toldos	Dimensão (largura, comprimento) e ângulos do toldo.
Vegetação	Quantidade, dimensão (altura, largura), espécie, distância entre abertura e a vegetação.

Com isso, os elementos de controle solar podem ser selecionados levando em consideração as estratégias passivas indicadas para a localização geográfica, a orientação solar e o coeficiente de sombreamento (Figura 3-6). Contudo, cada elemento apresenta limitações, vantagens e desvantagens, grau de complexidade de montagem e manutenção, eficiência no sombreamento e distribuição da iluminação natural distintas, que influenciam na sua escolha e devem estar alinhados com os objetivos almejados de eficiência energética (BROW e DEKAY, 2004).

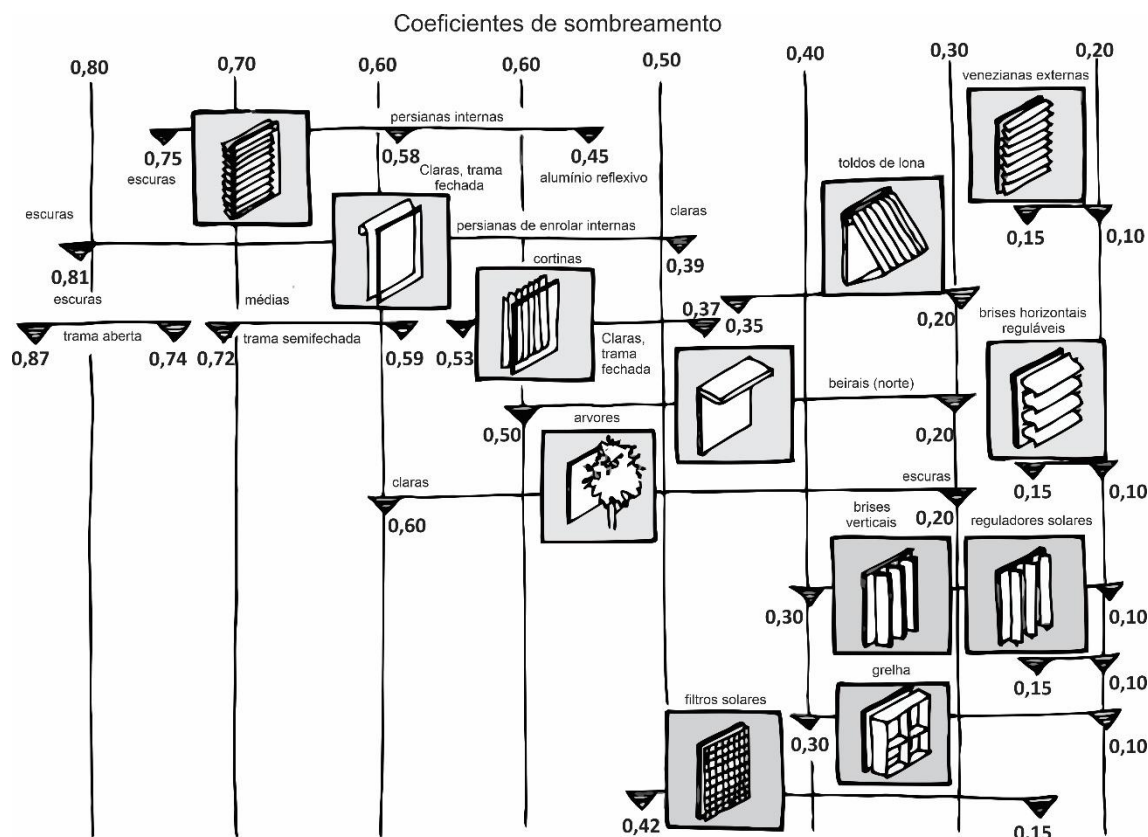


Figura 3-6: Coeficiente de sombreamento¹ de elementos de controle solar
 Fonte: Adaptado pelo autor de Brow e DekaY (2004).

3.2.1 Pórticos, Pergolados, Marquises e Varandas

Os pórticos, pergolados, marquises e varandas são exemplos de áreas sombreadas construídas ao redor da edificação, que funcionam como locais de transição entre áreas públicas e privadas utilizadas para variadas funções como encontro, circulação, descanso, trabalho, lazer e convívio. Esses espaços sombreados proporcionam uma diminuição da carga térmica das paredes externas, e consequentemente reduzem as temperaturas dos espaços internos do edifício (LITTLEFIELD, 2011).

A área sombreada criada pelas varandas diminui significativamente a iluminação natural dos ambientes, sendo necessário um estudo solar cuidadoso para buscar um equilíbrio entre o sombreamento e a iluminação natural fornecida por janelas e demais aberturas (LITTLEFIELD, 2011).

¹ Coeficiente de sombreamento: representa o índice de sombra que um elemento de proteção solar proporciona, variando de 0 a 1.

Embora os pórticos, pergolados, marquises e varandas sejam semelhantes entre si, o seu uso na arquitetura apresenta particularidades, tanto em termos de função, como em relação ao estilo arquitetônico e sua composição.

Os pórticos (Figura 3-7) geralmente são elementos adicionados nos acessos principais dos edifícios, como um ambiente externo coberto por um teto sustentado por colunas (CHING, 2000). Esse elemento está muito presente na arquitetura clássica e Roma, e apresentam particularidades, tanto no uso dos materiais, como no seu *design*, que é criado baseado em proporções de simetria.

As pérgulas (Figura 3-8) são estruturas de colunas paralelas que suportam vigas e sarrafos que servem como um teto vazado (CHING, 2000). Seu principal uso é o de servir de suporte para trepadeiras e criar uma área sombreada permeável ao sol, à chuva e ao vento, de forma que possibilite o resfriamento do ar e proteção da edificação dos raios solares (LITTLEFIELD, 2011). Sua origem deriva da arquitetura islâmica, que utilizava as pérgolas construídas de madeira em suas casas pátios com a mesma função que utilizamos hoje, sombrear e resfriar o ar que entra no edifício.



Figura 3-7: Pórtico
Fonte: (MURRAY, 2020)



Figura 3-8: Pérgula
Fonte: (ARCHITEXTIT- EINAT EREZ-KOBILER, 2018)

As marquises, também conhecidas como alpendres, são muito similares às varandas (Figura 3-9). Elas são coberturas de uma água, que se projetam de uma parede ou uma fachada a fim de proteger uma entrada. (CHING, 2000). Muitos edifícios comerciais adaptaram esse elemento como veículo de comunicação visual e proteção das vitrines e entradas de estabelecimentos comerciais.



Figura 3-9: Marquise Malba, Buenos Aires

Fonte: LANGNER, M. Levantamento Fotográfico em junho de 2016.



Figura 3-10: Varanda Edifício no Jardim Japonês em Buenos Aires.

Fonte: LANGNER, M. Levantamento Fotográfico em junho de 2016.

Já as varandas (Figura 3-10) são estruturas abertas e cobertas ao redor da edificação comumente utilizadas nas fachadas frontais e laterais (CHING, 2000). Seu uso é predominante residencial, sendo que é considerado como uma extensão do ambiente de convívio em localidades de clima quente e com alta precipitação. Tem ainda a função de criar um ambiente externo sombreado, que protege a edificação do superaquecimento e deterioração do edifício pela exposição a chuva e sol.

3.2.2 Prateleiras de Luz

As prateleiras de luz (Figura 3-11 e Figura 3-12) são elementos de sombreamento compostos por duas prateleiras, uma interna e outra externa à edificação, com superfície clara ou espelhada que reflete os raios solares para o teto do ambiente, proporcionando uma iluminação natural de forma indireta, melhor distribuída e protegendo a abertura dos raios solares diretos. Para o funcionamento da prateleira é necessário que haja uma vidraça acima do plano da prateleira para transferência do reflexo sol ao interior (BROW e DEKAY, 2004; KWOK e GRONDZIK, 2013).

Sua principal função é proteger a abertura da exposição solar e direcionar a iluminação natural de forma indireta, sem prejudicar a visualização do exterior e a ventilação natural.



Figura 3-11: Prateleira de luz vista interna
Fonte: (ARCHITECTURE 2030, 2020)



Figura 3-12: Prateleira de luz vista externa
Fonte: (ARCHITECTURE 2030, 2020)

As prateleiras de luz apresentam uma melhoria e homogeneização da iluminação natural dos ambientes, possibilitando uma extensão da iluminação, ao mesmo tempo em que diminui o ofuscamento, superaquecimento e consumo de iluminação artificial durante os períodos diurnos (KWOK e GRONDZIK, 2013; LAMBERTS, DUTRA e PEREIRA, 2014).

3.2.3 Elementos Vazados

O elemento vazado ou o cobogó (Figura 3-13 e Figura 3-14) é uma solução inteligente de protetores mistos em escala reduzida que funcionam como protetores solares, que auxiliam na ventilação natural dos ambientes, além de servir como elemento de fechamento estrutural do edifício sendo uma ótima opção para climas quente e úmidos (BITTENCOURT, 2004; LITTLEFIELD, 2011; VIEIRA, BORBA e RODRIGUES, 2012).

Sua origem deriva da invenção de dois comerciantes e um engenheiro no início do século 20 em Pernambuco que se inspiraram nas treliças dos antigos muxarabi de madeira derivados da arquitetura islâmica (VIEIRA, BORBA e RODRIGUES, 2012; PAULERT, 2012). Ele foi patenteadado em 1929 por A. C. Coimbra & Cia que na época foi comercializado como um novo sistema de blocos de concreto perfurado para confecção de fechamentos verticais (VIEIRA, BORBA e RODRIGUES, 2012).

Desde então, os elementos vazados foram aperfeiçoados e se apresentam com variados modelos, tamanhos e materiais possibilitando seu uso em grande e pequena escala em ambientes internos e externos.



Figura 3-13: Elemento vazado em residência de Foz do Iguaçu-PR.

Fonte: (LANGNER, 2017)



Figura 3-14: Elemento vazado no MAM do Rio de Janeiro.

Fonte: (LANGNER, 2014)

3.2.4 Trelças e Grelhas

As trelças e grelhas são grades comumente de madeira ou metal utilizadas para filtrar a luz solar e proteger da radiação solar direta. Sua origem deriva da arquitetura árabe e egípcia, que utilizavam o muxarabi (balcões externos fechados por trelças ou grades), com vegetação para refrigerar a água potável em recipientes de barro e climatizar os ambientes por evapotranspiração (FEENEY, 1974; LECHNER, 2015). A partir da expansão do império islâmico seus preceitos se espalharam para variadas culturas, que multiplicaram as suas funções.

As trelças e grelhas tem uma grande importância na arquitetura islâmica, que se apropriou desse elemento, não só para criação do muxarabi, mas também para filtrar o sol nas aberturas e aumentar a privacidade dos usuários com as gelosias e servir de estrutura para vegetação nas casas pátios (ALCALÁ, 1999).

As possibilidades das grades serem suporte para trepadeiras, permite aproveitar a característica de sombreamento e resfriamento do ar que a vegetação gera, através da evapotranspiração, além da purificação do ar (LECHNER, 2015; LITTLEFIELD, 2011) (Figura 3-15). Devido a sua eficiência e versatilidade de composição e fabricação, seu uso está se tornando cada vez mais popular, não somente como uma solução de elemento de controle solar, mas como um elemento fixo de decoração de edifícios, como pode-se observar na Figura 3-16 (LECHNER, 2015).



Figura 3-15: Treliças de madeira na Casa Branca / Studio MK27.

Fonte: (DELAQUA, 2015).



Figura 3-16: Grade metálica na fachada do edifício Teatro Popular Oscar Niemeyer.

Fonte: (LANGNER, 2014)

3.2.5 Beirais

O beiral é uma extensão do telhado, posicionada além das paredes limítrofes do edifício (CHING, 2000). Sua principal função é proteger a edificação da chuva e excesso de insolação em dias quentes (Figura 3-17).

Esse elemento é observado na arquitetura de várias culturas, desde o oriente até o ocidente e geralmente é confeccionado com os mesmos materiais do telhado (LECHNER, 2015). Ao longo da história da arquitetura esteve presente principalmente em edifícios religiosos (Figura 3-18), palácios públicos e residências vernaculares, passando por poucas modificações.



Figura 3-17: Templo Indiano Hoysaleshwara com beiral construído no século XIII.

Fonte: (KAMATH e DAKETI, 2016).



Figura 3-18: Beiral em Edifício no Jardim Japonês em Buenos Aires.

Fonte: (LANGNER, 2016)

Os beirais são muito eficientes para climas quentes e podem ser calculados tanto para sombrear a face norte (hemisfério sul) durante um período do ano, como em todos os períodos (GURGEL, 2012). Geralmente sua largura se encontra entre 40 e 80cm a partir da face externa da parede.

3.2.6 Brises-soleil

Os Brises-soleil são elementos de controle solar externos, normalmente palhetas na vertical, horizontal ou em ambas as direções, afim de proteger as janelas da incidência direta da luz solar (CHING, 2000; KRUGER e SEVILLE, 2016).

Esse elemento surgiu a partir do resultado de um erro do arquiteto modernista Le Corbusier, quando projetou o edifício *Cité de Refuge* na França (hemisfério norte), com fachadas envidraçadas orientadas para o sul. O edifício funcionou muito bem no inverno com o aquecimento passivo, mas superaqueceu no verão, surgindo assim o brise-soleil como solução para sombrear a fachada (Figura 3-19) Le Corbusier ao buscar uma solução observou que o sombreamento precisava ser resolvido como um problema geométrico e sistematizou a forma de calcular esse elemento para as aberturas de seus edifícios (LECHNER, 2015).



Figura 3-19: Edifício Cité de Refuge
Fonte: (CORBUSIER, 2019).

No hemisfério sul, os brises com palhetas verticais ou mistos são indicados para as aberturas orientadas ao leste e oeste, já os com palhetas na horizontal são indicados para as aberturas orientadas ao norte, e a sul a depender da latitude. Os brises mistos com paletas verticais e horizontais são indicados em para as aberturas orientadas ao sudeste, sudoeste, nordeste e noroeste (BITTENCOURT, 2004). No caso das orientações leste e oeste, se forem móveis, a eficiência de funcionamento é maior (Figura 3-20, Figura 3-21 e Figura 3-22).



Figura 3-20: Brises mistos (verticais e horizontais), no Palácio Gustavo Capanema-RJ.

Fonte: (LANGNER, 2014)



Figura 3-21: Brise vertical em loja na rua Oscar Freire-SP.

Fonte: (LANGNER, 2017)



Figura 3-22: Brise horizontal no Edifício Colombia 325-SP.

Fonte: (LANGNER, 2017)

3.2.7 Toldos

Os toldos são coberturas geralmente confeccionados em lona e estrutura metálica, que se projetam como um telhado e são posicionados à frente de portas e janelas de um edifício, oferecendo proteção contra a chuva e a luz solar direta (CHING, 2000; BITTENCOURT, 2004).

Os toldos eram utilizados no século XX como elementos para sombrear janelas no verão, de forma que pudessem ser retirados durante o inverno. Assim eram utilizados em muitos edifícios de luxo e grandes hotéis até a metade do século XX, devido a sua praticidade, eficiência e facilidade (LECHNER, 2015).

Após esse período, os edifícios de luxo começaram a utilizar os condicionadores de ar e os toldos passaram a ser utilizados somente por edificações mais simples, o que gerou uma

associação desse elemento com edifícios pobres degradados (LECHNER, 2015). Ainda assim, seu uso é ainda muito comum nas cidades da Europa, principalmente em estabelecimentos comerciais localizados no entorno de praças, sendo uma forma versátil de controle solar durante o verão, que pode ser facilmente removida no inverno.

No início do século XXI, os toldos passaram a ser reutilizados em edificações e fachadas de edifícios de luxo e estão recuperando o seu prestígio na arquitetura, se apresentando como elementos práticos, duráveis e com uma ótima atratividade estética (Figura 3-23 e Figura 3-24) (LECHNER, 2015).



Figura 3-23: Toldo sobre janela.

Fonte: (DOUGLAS, 2019).



Figura 3-24: Toldo sobre porta janela.

Fonte: (DOUGLAS, 2019).

3.2.8 Persianas e Venezianas

As persianas são elementos de controle solar anexados internamente ou externamente às aberturas, formados por pequenas lâminas verticais ou horizontais, fixas ou moveis que podem ser deslocadas por meio de cordões com função de controlar a incidência de radiação e luz solar (WEISZFLOG, 1998). Já as venezianas são elementos de controle solar incorporados na face externa das janelas, formadas por lâminas horizontais de madeira, metal ou plástico com pequenas frestas que possibilitam a passagem do ar obstruindo a entrada da radiação e luz solar (WEISZFLOG, 1998).

Na literatura, as persianas e venezianas apresentam funções similares e dependendo do autor se apresentam como um único elemento. Por definição, a diferença entre elas é que a veneziana se apresenta como uma parte da esquadria (uma folha ou tela para proteção da radiação solar) e a persiana se apresenta como um acessório adicionado internamente ou externamente com aletas reguláveis.

Atualmente, com o avanço da ciência dos materiais e da mecânica, as persianas e venezianas se tornaram um grande auxiliar para eficiência energética dos edifícios. Segundo Lechner (2015), as venezianas estão ficando com uma qualidade melhor, tanto no uso interno como externo, podendo ser controladas manualmente ou remotamente, possibilitando um bom controle de iluminação em edifícios comerciais.

Apesar da sua eficiência como elemento de controle solar, Lechner (2015), Littlefield (2011), Brow e Dekay (2004) indicam que as venezianas e persianas externas tem mais eficiência do que as internas e a escolha de cores claras melhora o seu desempenho energético (Figura 3-25 e Figura 3-26).

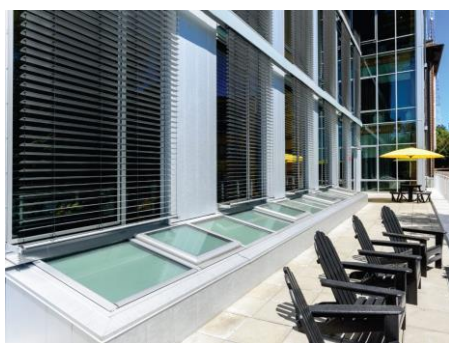


Figura 3-25: Veneziana externa.
Fonte: (ARCHITECTURE 2030, 2020)



Figura 3-26: Persianas Internas.
Fonte: (DOUGLAS, 2019)

3.2.9 Elementos de Controle Solar Complexos

Além das tipologias de elementos de controle solar definidas pela literatura com características geométricas semipadronizadas e funções predefinidas, surgiram com base no uso de ferramentas computacionais, os elementos de controle solar complexos, resultantes da mescla entre as primeiras tipologias e geometrias complexas e orgânicas, criados por regras matemáticas e responsivos ao desempenho de sombreamento.

As principais características dos elementos de controle solar complexos são sua organicidade e adaptabilidade formal em resposta a função, gerados através diferentes métodos, tais como: diagramas matemáticos que simulam geometrias encontradas na natureza como o Voronoi²

² Modelo de decomposição de um espaço, determinado pela distância para certo grupo de objetos no próprio espaço. Tais objetos são chamados geradores ou sementes (AURENHAMMER, 1991).

(Figura 3-27) e o Fractal³ (Figura 3-28), adaptação individual de todos os elementos de uma geometria qualquer a um formato singular (Figura 3-29 e Figura 3-30).



Figura 3-27: Elemento de sombreamento complexo em formato Voronoi.

Fonte: (LINK, 2019)

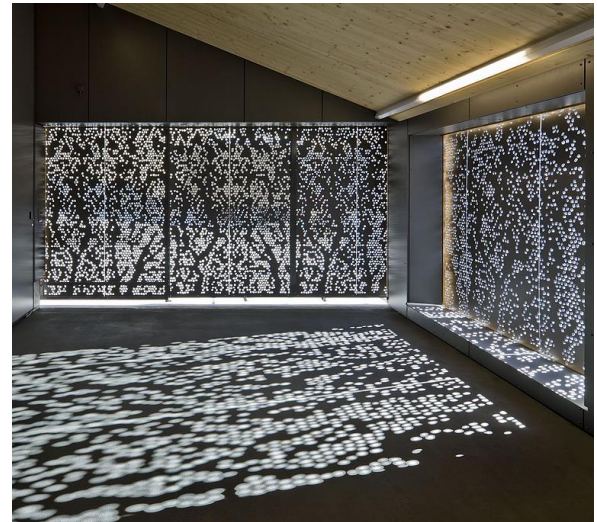


Figura 3-28: Elemento de sombreamento complexo em formato de Fractal.

Fonte: (BRUAG, 2019)



Figura 3-29: Elemento de controle solar do Edifício Al Bahar Towers

Fonte: (SOUZA, 2019)



Figura 3-30: Elemento complexo em fachada do Edifício Small Scale em Beijing-China.

Fonte: (ARCHITECTURE, 2019)

3.3 ELEMENTOS DE CONTROLE SOLAR E VISTA DE QUALIDADE

Além da eficiência energética e conforto térmico e visual proporcionados pelos elementos de controle solar, outro fator a ser considerado é o potencial de permeabilidade da visão do usuário as vistas externas e da paisagem do entorno. Os elementos de controle solar quando bem dimensionados podem manter a transparência das janelas sem desconforto por ofuscamento e

³ Fractal é uma figura geométrica não clássica que pode ser encontrada na natureza, constitui-se em um objeto onde as partes separadas repetem os traços do todo completo em qualquer escala.

superaquecimento, conseqüentemente evitando o uso de cortinas internas que bloqueiam a entrada excessiva de iluminação natural, e com isso bloqueiam também a vista externa propiciada pela janela.

Na **Figura 3-31** é possível observar o elemento de controle solar tipo brise-soleil horizontal, não está obstruindo a vista externa enquanto que na **Figura 3-32**, observa-se o uso de uma treliça que, devido ao dimensionamento da distância entre as aletas, está obstruindo parte da vista externa.



Figura 3-31: Elemento de Controle Solar sem obstrução da vista externa

Fonte: (MADEIGUINCHO, 2020)



Figura 3-32: Elemento de Controle Solar com obstrução da vista externa

Fonte: (KOGAN, 2013)

A importância da vista externa pelas janelas não é mero direito do usuário e sim elemento fundamental para a qualidade de vida, melhorando a saúde, psique e produtividade com comprovada redução da fadiga ocular (HESCHONG e MAHONE, 2003), recuperação pós-operatório mais rápida (ULRICH, 1984) e redução de doenças relacionadas com estresse (LEHRER, 2009). Assim, no projeto de elementos de controle solar se faz necessária a inclusão de parâmetros que ditem a qualidade das vistas externas.

3.4 ELEMENTOS DE CONTROLE SOLAR NA ÚLTIMA DÉCADA

Atualmente, os elementos de controle solar estão diretamente ligados com eficiência energética e demonstram um grande potencial de redução do consumo de energia quando aplicados de forma eficiente. Ouahrani e Touma (2018), afirmam que através de simulações computacionais, com o uso de brise-soleil é possível alcançar uma economia de energia de 39,5% a 36,6% em edifícios de escritórios com fachadas de vidros orientadas para o sul e leste no Catar. Resultados similares foram alcançados nas pesquisas de Lavin e Fiorito (2017) para a cidade de Sidney,

Austrália, com uso de elementos perfurados, e na pesquisa de Barbosa (2015), com uso de persianas na cidade do Rio de Janeiro, Brasil.

O projeto de elementos de controle solar quando desenvolvido objetivando exclusivamente a eficiência energética e conforto térmico, não considera em suas variáveis, aspectos como a interação do usuário com a visão da paisagem, sendo que esse parâmetro, segundo Vera e Ureta (2015), pode beneficiar a usabilidade do edifício como também o bem-estar dos usuários.

Conforme a tecnologia dos materiais, a eletrônica e a computação se desenvolvem, as tendências a integração de diversas áreas para melhoria do conforto ambiental e eficiência energética tende a acontecer. A união de materiais com a eletrônica pode ser vista nas pesquisas desenvolvidas por Saranti, Stamatakis, Mandalaki, Tsoutsos e Zervas entre 2012 a 2016, onde se faz uso de elementos de controle solar de variadas tipologias com células fotovoltaicas. Esses experimentos demonstram grande potencialidade para geração de energia com os elementos de controle solar além das suas funções elementares (MANDALAKI, *et al.*, 2012; SARANTI, TSOUTSOS e MANDALAKI, 2015; STAMATAKIS, MANDALAKI e TSOUTSOS, 2016).

Embora haja grande variedade de tipologias de elementos de controle solar já desenvolvidos no decorrer da história da arquitetura e engenharia, existe uma grande tendência à customização de elementos arquitetônicos, de forma a mitigar o uso de matéria prima de confecção, sem diminuir a eficiência funcional destes. Para isso, é fundamental o uso de formas que explorem melhor a geometria para vencer esforços de tração, compressão e deterioração por agentes externos. Muitas dessas explorações estão sendo feitas por meio de soluções por algoritmos de otimização.

Lavin e Fiorito (2017), afirmam que através do uso de algoritmo generativo de otimização é possível alcançar melhorias significativas no conforto ambiental e eficiência energética de edifícios com uma grande gama de possibilidades. Já Zani, Andaloro, *et al.* (2017), explicam que devido a quantidade de parâmetros a serem respeitados na construção de um edifício, o uso de algoritmos generativos possibilita a exploração ampla de elementos de controle solar sem infringir regras ou interferir em aspectos funcionais.

3.5 ALGORITMOS GENERATIVOS E SEU USO NA ARQUITETURA

3.5.1 A evolução do CAD

O uso de computadores para resolução de problemas de arquitetura e engenharia já data meio século, porém, somente após a acessibilidade dos profissionais a computadores pessoais e com grande poder de computação foi possível o incremento na produtividade e resolução de problemas com auxílio da tecnologia (CELANI, 2016).

O primeiro programa ao uso do computador em arquitetura foi o *Sketchpad* de 1960, criado pelo pesquisador Ivan Sutherland em sua tese de pós-doutorado no *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), onde permitia criar formas geométricas no computador a partir de uma caneta de luz (KÓS, 2016; KOWALTOWSKI, *et al.*, 2011; AOUAD, *et al.*, 2013). Esse programa se consagrou como o precursor dos programas CAD (*computer-aided design* ou projeto auxiliado por computador) e sua caneta como inspiração para o *mouse*.

Assim, após o surgimento dos primeiros computadores pessoais em 1970, foram criados os programas CAD comerciais e, somente a partir de 1980, que estes se tornaram mais presentes nos escritórios de arquitetura e engenharia devido seus preços mais acessíveis (KOWALTOWSKI, MOREIRA, *et al.*, 2011). Contudo, o desenvolvimento CAD não foi um fenômeno isolado, e sim um processo paralelo ao desenvolvimento tecnológico conforme pode-se observar no

Anexo 1.

Tabela 3-3: Derivações do CAD em outras disciplinas.

Derivações do CAD	Disciplina	Uso comum
CAE (<i>Computer-Aided Engineering</i>)	Engenharia	Cálculos, análises, dimensionamento e simulações de engenharia.
CAAD (<i>Computer-Aided Architectural Design</i>)	Arquitetura	Desenvolvimento, avaliação e simulação do modelo computacional de edificações e espaços urbanos.
CAM (<i>Computer-Aided Manufacturing</i>)	Manufatura	Auxílio na fabricação por máquinas.

Fonte: (KÓS, 2016; KOWALTOWSKI, *et al.*, 2011).

Até a década de 1980, o termo CAD era utilizado de forma generalizada para Projeto Auxiliado por Computador (KOWALTOWSKI, *et al.*, 2011), e após o uso massivo por empresas e profissionais de desenho técnico, passou a ser mais associado com o termo Desenho Auxiliado por Computador, popularizando o uso de termos mais específicos para as disciplinas ou especialidades

(Tabela 3-3) como CAE (*Computer-aided Enginnering*), CAAD (*Computer-Aided Architectural Design*) e CAM (*Computer-Aided Manufacturing*).

Os avanços tecnológicos e funcionais do CAAD para auxiliar o arquiteto no projeto criaram possibilidades de mudanças e alterações de remodelagem ou reedição do projeto, criando um ciclo mais eficiente (OXMAN, 2017b). Segundo Celani (2016), o computador pode ser utilizado, tanto em níveis básicos, como para representação e análise, e níveis mais avançados, resolvendo problemas através de sistemas generativos, automação e análise sistêmicas, tornando o computador coadjuvante no processo de projeto.

3.5.2 Arquitetura Paramétrica e Algoritmos Generativos

A definição do termo paramétrico é exposta por Komaltowksi, Moreira, et al.(2011) como “um conjunto de propriedades, cujos valores determinam as características de um objeto qualquer”. Já Lara (2016) diz que o termo paramétrico associado a arquitetura, urbanismo e *design* é “um processo de projeto que faz uso da representação dinâmica para gerar formas obedientes às regras ou dados pré-estabelecidos”, assim quando associamos o termo paramétrico a arquitetura, surge a arquitetura paramétrica.

O projeto paramétrico é um processo de formação de estruturas paramétricas de geometria, que gera a geometria dos objetos de *design* desejados, e explora a relação associativa de conceitos geométricos (OXMAN, 2017b). Sendo assim, ela utiliza a parametrização como base técnica de projeto (LARA, 2016), e busca por meio da computação, respostas instantâneas sobre o desempenho do *design* (SANTOS, SCHLEICHER e CALDAS, 2017), associando a geometria topológica a um esquema de algoritmo paramétrico (OXMAN, 2017a). Geralmente, são utilizados modelos geométricos com códigos e um conjunto de equações que permitem controlar os recursos formais dos desenhos como dimensões, ângulos e regras dentro de uma ferramenta computacional (GRANADEIRO, et al., 2013; KOWALTOWSKI, et al., 2011).

Os projetos paramétricos têm como base o uso de ferramentas computacionais acrescidas de objetos paramétricos, que possibilitam o projetista explorar e simular diferentes alternativas de projeto de forma rápida e confiável (KOWALTOWSKI, et al., 2011; LARA, 2016). Com isso, os projetistas estão empregando a parametrização para ampliar sua relação com a forma

arquitetônica, criando elementos formais e arquitetônicos mais elaborados, que se integram a preocupações ambientais, estruturais e construtivas (WORTMANN e TUNÇER, 2017).

Seu desenvolvimento no campo da Arquitetura e Engenharia está possibilitando a geração de documentação para executar projetos com maior nível de detalhamento e complexidade (WORTMANN e TUNÇER, 2017), o que conseqüentemente impacta na forma de desenvolvimento de projetos, na cultura da construção civil e instituições de ensino, tornando a criação de *scripts* e ferramentas CAD conhecimento obrigatório em pesquisas, ensino e prática de projeto (OXMAN, 2017a).

Para Lara (2016), o desenho paramétrico tem quatro funções de projeto: exploração, análise e síntese da gramática da forma através da geração de uma grande quantidade de soluções formais; modelagem paramétrica para criação de modelos digitais dinâmicos a mudanças, uso e controle; utilizar algoritmos de otimização para criar melhores soluções por métodos evolutivos; simular forças físicas como vento, som, iluminação, temperatura, fogo, tempo etc.

As mudanças decorrentes do pensamento paramétrico estão alterando as ferramentas, princípios, técnicas e lógica de projeto (OXMAN, 2017b), fazendo uso da simulação e algoritmos de otimização como parte do processo de projeto. A otimização consiste na minimização ou maximização de uma função (LARA, 2016).

O processo inicial de projeto na arquitetura, geralmente não utiliza análise profunda da influência da forma na eficiência energética, devido à modelagem para simulação computacional ser uma tarefa demorada e custosa, reduzindo o seu potencial de auxílio na criação, incumbindo seu uso apenas na verificação e correção da arquitetura final (GRANADEIRO, *et al.*, 2013). Esse cenário impõe ao projetista uma imagem vaga da arquitetura, limitando o alcance de soluções amplas que afetam o desempenho e os custos das construções (SONG, GHABOUSSI e KWON, 2016), mas também se mostra como um bom cenário para exploração de algoritmos de otimização com a simulação computacional.

Na atualidade, a ascensão de algoritmos de otimização associadas à simulação computacional pode ser atribuída ao desenvolvimento de novas linguagens de programação de programas 3D, como *Grasshopper* para o *Rhinoceros*, *Dynamo* para o *Revit*, conhecidas como plataformas de programação visual. Essas plataformas criaram interface amigável para programação e

comunicação de programas de otimização com programas de simulação como *Radiance* (programa de simulação de iluminação) e *EnergyPlus* (simulação de eficiência energética de edifícios) (SANTOS, SCHLEICHER e CALDAS, 2017). Outro incentivo foi a possibilidade de automatizar processos que refletem em redução de recursos, otimização e precisão no desenvolvimento de projetos (SINGH e GU, 2012).

Como Oxman (2017b) explica, o uso de *script* para solução de projetos está se tornando obrigatório para engenheiros e arquitetos. Contudo, seu uso é comumente realizado por meio de programação que segundo Wortemann e Tunçer (2017) pode ser: programação textual, descritas por linhas de comandos em linguagem específica de programação para redigir funções e equações a serem executadas; e a programação visual que permite a criação de um programa para executar funções e equações arrastando e conectando operações predefinidas.

O uso da programação na criação e desenvolvimento de projetos permite a decomposição do movimento dos parâmetros, tornando o processo altamente flexível a mudanças no modelo paramétrico durante alterações e reedições (WORTMANN e TUNÇER, 2017; OXMAN, 2017b). Contudo, dentre as formas de programação atuais, segundo Oxman (2017b), a programação visual apresenta vantagens na sua utilização, quando permite modificar o projeto, apenas alterando parâmetros pré-definidos, ao invés de reescrever uma quantidade substancial de códigos.

O termo *Design* Generativo pode ser traduzido para o português como Projeto Generativo, embora seja possível empregar *Design* Generativo didaticamente para objetos e protótipos de *design* criados com auxílio de algoritmos de otimização, e, Projeto Generativo para elementos maiores como edificações também criados com auxílio de algoritmos de otimização (SINGH, GU; 2012).

Um sistema de *design* generativo é um modelo composto por um conjunto de regras gerais que são aplicadas para gerar projetos alternativos (GRANADEIRO, et al., 2013). Singh e Gu (2012) explicam que os principais métodos utilizados para o desenvolvimento de projeto com *design* generativo são: Inteligência de enxames (*Swarm Intelligence - SI*), Autômatos celulares (*Cellular Automata - CA*), gramática da forma (*Shape Grammars - SG*), Sistema de Lindenmayer (*L-systems - LS*), algoritmos genéticos (*Genetic Algorithms - GA*).

Assim, chega-se ao ponto em que o *design* generativo com uso de técnicas e algoritmos de exploração e otimização associado a simulação computacional cria um processo de geração do *design*, por meio das respostas das simulações e subsequentemente um ciclo de resultado-otimização que busca a solução ótima. Conforme Erci, Cubukcuoglu, et al. (2019), um dos principais métodos utilizados para se trabalhar com *design* generativo e simulação computacional é com o uso de algoritmos genéticos.

3.5.3 Uso do *Design* Generativo para Elementos de Controle Solar

O uso de ferramentas computacionais para estudo do desempenho ambiental tem se mostrado muito eficiente, possibilitando a interação dos projetistas com aspectos até então, pouco acessíveis, como clima, iluminação, acústica e sistemas mecânicos e elétricos do edifício. Com isso, é possível desenvolver o projeto com base no retorno dos resultados das simulações ambientais (CALDAS e NORFORD, 2002).

O uso padrão da simulação computacional para análise ambiental é através da análise do cenário de resultados, um a um, criando um ciclo de análise e solução desenvolvido pelo projetista. Levando em consideração os múltiplos parâmetros e complexidade do projeto, esse ciclo se torna lento e cansativo, e muita vez resulta na escolha vaga da solução, quando comparado à grande gama de possibilidades (CALDAS e NORFORD, 2002). Embora esse método seja eficiente comparado aos processos predecessores, ele não explora o poder computacional disponível atualmente, e limita o uso do computador a uma ferramenta passiva, contudo, nos últimos anos têm ocorrido esforços para que seu uso se dê de forma mais inteligente e ativa (CALDAS e NORFORD, 2002; KHEMLANI, 1995).

O uso de algoritmos generativos tem se mostrado um método eficiente da computação como ferramenta de auxílio ativo no desenvolvimento de projetos e em particular com desempenho energético (KHEMLANI, 1995; EKICI, CUBUKCUOGLU, et al., 2019). Outro fator é o seu uso para exploração de fachadas, que segundo Gerber, Pantazis e Wang (2017), estão entre os sistemas arquitetônicos mais complexos de um edifício combinando estética, estrutura e preocupações ambientais.

Muitos sistemas de algoritmos generativos fazem uso de algoritmos evolutivos que são definidos por Linden (2008), como:

Modelos computacionais dos processos naturais de evolução como uma ferramenta para resolver problemas, apesar de haver uma grande variedade de modelos computacionais propostos, todos eles tem em comum o conceito de simulação da evolução das espécies através de seleção, mutação e reprodução, processos esses que dependem do desempenho dos indivíduos dessa espécie dentro do ambiente (LINDEN, 2008, p 40).

Pesquisas como a de Turrin, Buelow e Stouffs (2011), aplicaram um método de simulação computacional com algoritmos evolutivos para estudo morfológico de estratégias de sombreamento de uma cobertura com aberturas zenitais (Figura 3-33). Os autores demonstraram a eficiência desse método na exploração de diversas alternativas. O mesmo pode ser encontrado em pesquisa realizada por Rapone e Saro (2012), que identificou em estudo o impacto de brises verticais e horizontais (Figura 3-34) na eficiência energética do edifício.

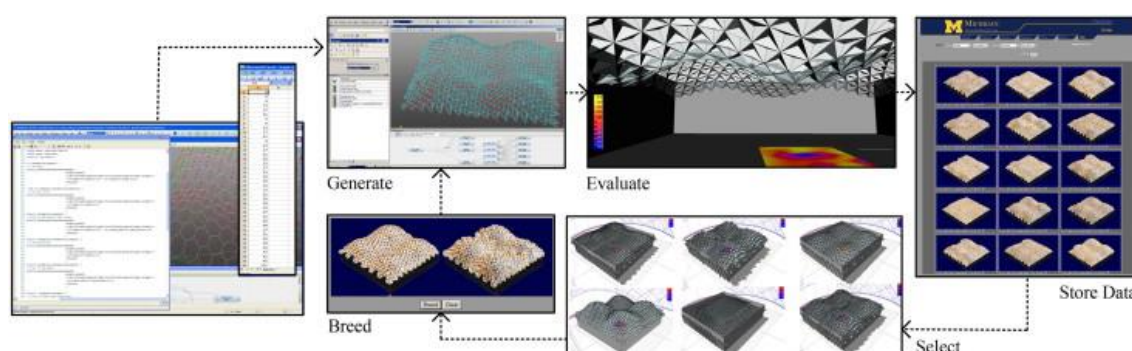


Figura 3-33: Esquema da criação de cobertura com elementos de controle solar acoplado a estrutura de iluminação zenital. Fonte: (TURRIN, BUELOW e STOUFFS, 2011).

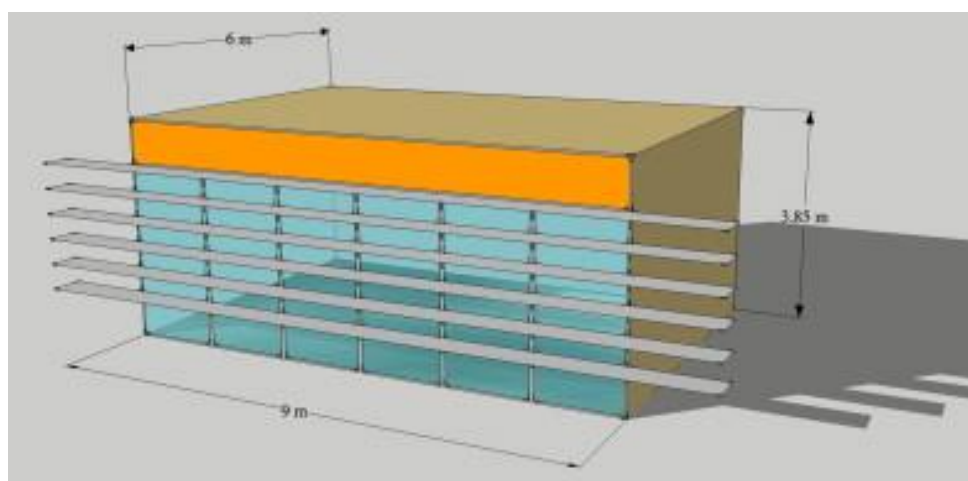


Figura 3-34: Otimização por algoritmos evolutivos de elementos de controle solar. Fonte: (RAPONE e SARO, 2012).

Estudos apresentam resultados significativos relacionados ao uso de algoritmos evolutivos. Delgarm, et al. (2016a), buscaram otimizar o tamanho da janela, tipo de vidro, material da

parede e dimensão do elemento de controle solar para a região de Irã utilizando sistemas inteligentes, alcançando resultados de redução da demanda anual total de eletricidade de 1,6% a 11,3%. Já nos resultados de outra pesquisa desenvolvida pelos mesmos autores (2016b), buscou-se otimizar os mesmos elementos com algoritmo genético multiobjectivo, alcançando uma redução 23,8% a 42,2% do consumo de energia total do edifício, comprovando a superioridade desse modelo de algoritmo de otimização para estudos de eficiência energética (Figura 3-35). Outro estudo realizado para o clima frio da China por Zhanget al. (2017) utilizando algoritmo genético, foi possível analisar quais configurações de elementos de controle solar propiciavam melhor climatização passiva e iluminação natural no inverno e verão para salas de aula (Figura 3-36).

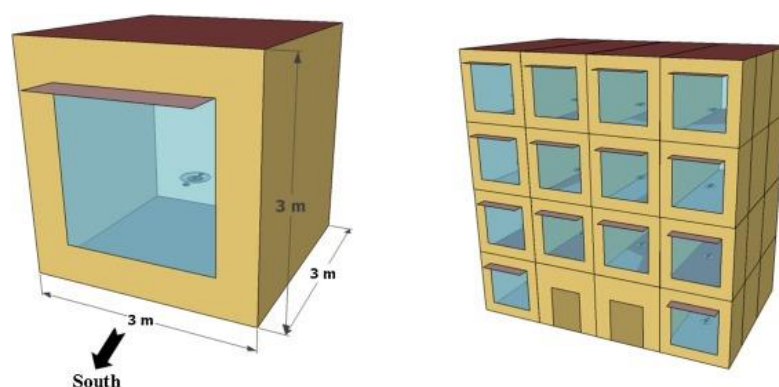


Figura 3-35: Modelo utilizado para simulação no EnergyPlus com algoritmos.

Fonte: (DELGARM, *et al.*, 2016a; DELGARM, *et al.*, 2016b).

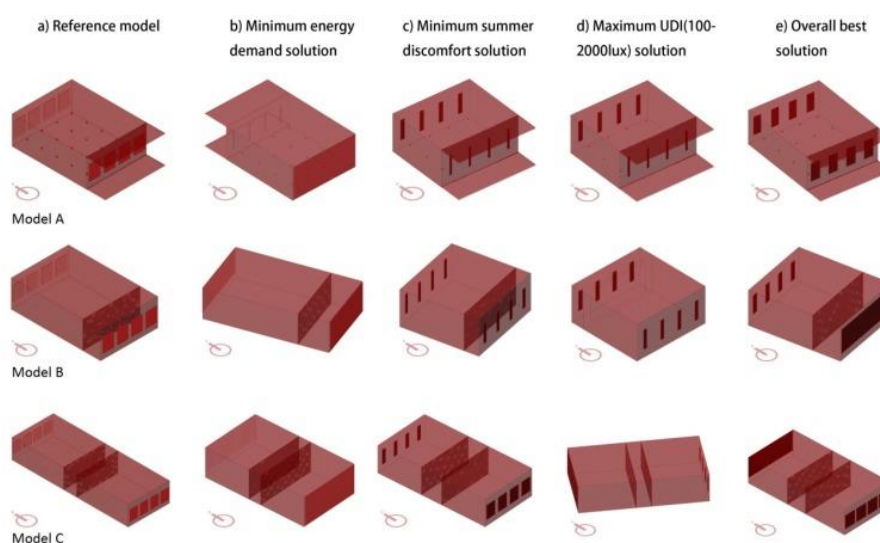


Figura 3-36: Parâmetros e resultados das simulações.

Fonte: (ZHANG, BOKEL, *et al.*, 2017)

Em grande parte dos estudos, percebe-se que há esforços para analisar o desempenho dos elementos de controle solar, associados a outros parâmetros construtivos, como o caso Bre e Fachinotti (2017), que buscou alternativas com tipos de telhado, tipos de parede externa e

interna, orientação solar, absorção solar, tamanho e tipo de janelas sombreadas de uma casa unifamiliar na Argentina (Figura 3-37), conseguindo melhorar de 82% a 95% do conforto térmico em relação ao projeto inicial, por meio de algoritmo evolutivo associado a ferramentas de simulação *Energyplus*. Um estudo similar foi desenvolvido por Gou, Nik, et al. (2018) para otimizar por algoritmos genéticos e com *Energyplus*, praticamente os mesmos parâmetros de Bre e Fachinotti (2017), que alcançaram melhorias significativas (Figura 3-38).



Figura 3-37: Modelo utilizado para simulação no EnergyPlus com algoritmos.

Fonte: (BRE e FACHINOTTI, 2017)

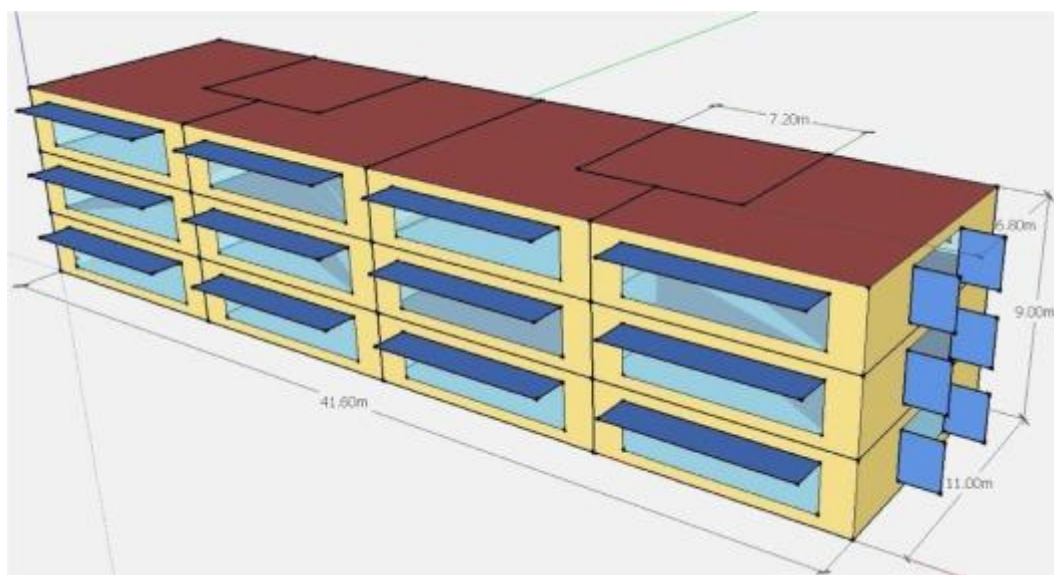


Figura 3-38: Modelo utilizado para simulação no EnergyPlus com algoritmos evolutivos.

Fonte: (GOU, NIK, et al., 2018).

Ekici, et al. (2019), analisaram 36 pesquisas abordando parâmetros de sombreamento de edifícios por meio de algoritmos de otimização, baseados em algoritmos generativos

nos últimos 20 anos publicados em periódicos disponíveis nas bases de dados da Science Direct, Scopus e Thomson Reuters. Os algoritmos mais utilizados foram os de computação evolutiva como GA e NSGA-II que seguem procedimentos inspirados na evolução biológica da teoria de Darwin. Os autores apresentam nos resultados a importância da relação entre melhores métodos e comparação de algoritmos generativos aplicados a soluções de otimização do sombreamento de edifícios, que até então, não foram explorados nas pesquisas.

4. METODOLOGIA

A metodologia do presente estudo compõe um método de pesquisa de estratégias combinadas, utilizando a simulação computacional e a pesquisa experimental, a fim de reproduzir o comportamento do objeto de estudo em ambiente controlado e com parâmetros definidos.

O método de simulação enquadra-se como uma estratégia combinada com outra estratégia de pesquisa, permitindo a identificação de padrões e a projeção de comportamentos sobre o objeto estudado e as variáveis observadas. De acordo com Groat e Wang (2013), a simulação pode ser utilizada em diversa gama de tópicos e para diferentes fins, desde uma aplicação específica e direcionada até na aplicação de teorias.

Já o método da pesquisa experimental irá reduzir e isolar as variáveis significativas e identificar, através dos resultados, os efeitos causais de variáveis-chave. Permite observar o contexto e prever padrões com uma visão de mundo real sob uma situação hipotética e controlada. Os pesquisadores buscam identificar o impacto de uma ou mais variáveis que sejam identificáveis e específicas acerca do fenômeno estudado (GROAT; WANG, 2013).

Através da leitura dos resultados deste método misto é possível criar um modelo matemático que represente o comportamento do modelo simulado.

Os procedimentos metodológicos adotados para o desenvolvimento do presente estudo seguiram as etapas listadas abaixo:

- I. Determinação dos programas a serem utilizados na pesquisa;
- II. Escolha da cidade para as simulações computacionais;
- III. Definição do modelo de controle solar a ser simulado;
- IV. Definição dos parâmetros de simulação computacional.
- V. Comparação do desempenho dos programas utilizados.

Após a definição de todos os aspectos relacionados a metodologia, a mesma seguiu o fluxo de trabalho apresentado na **Figura 4-1**.

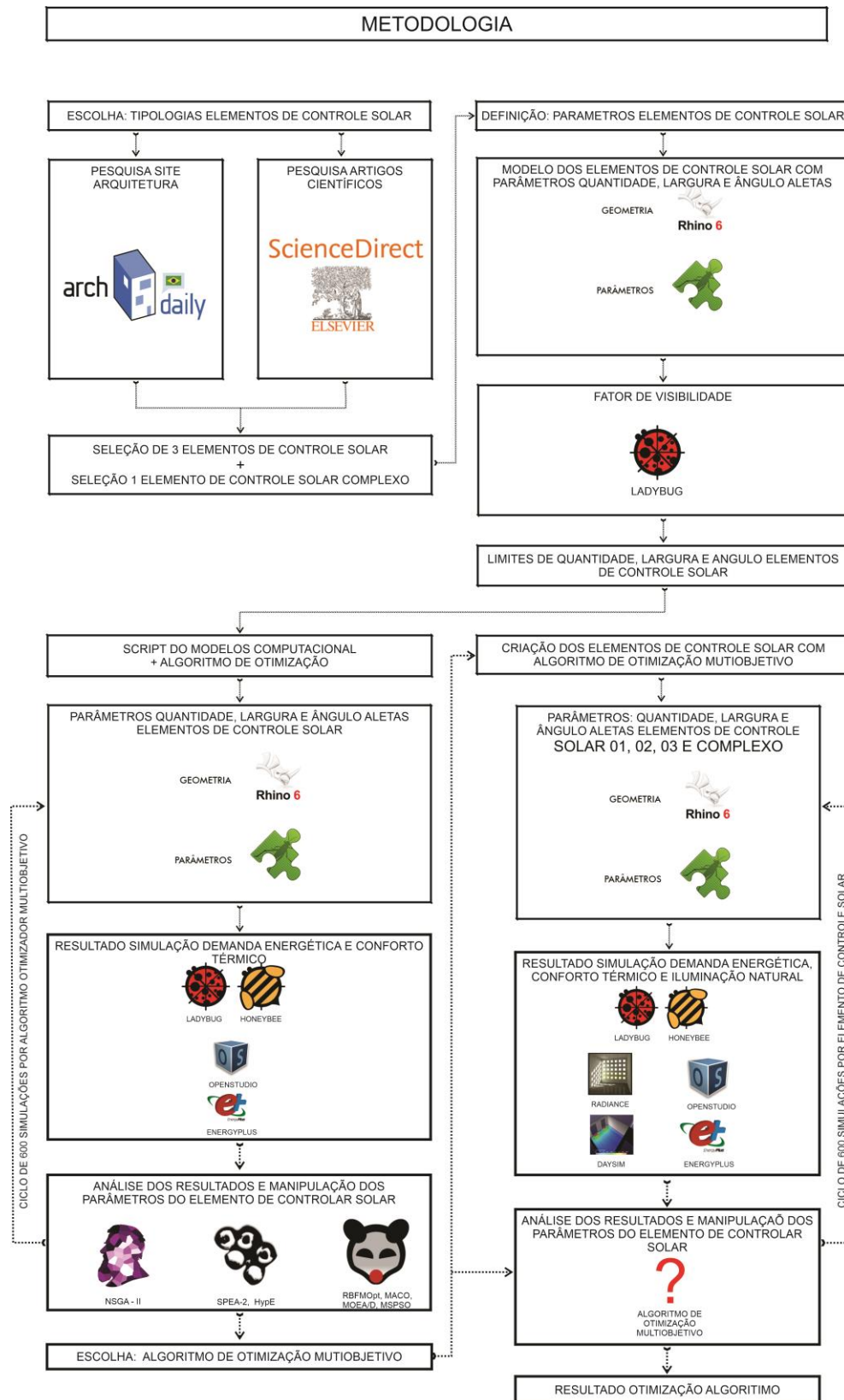


Figura 4-1: Fluxograma da metodologia.

4.1 PROGRAMAS DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Com o avanço tecnológico das plataformas CAD e BIM, e, o aperfeiçoamento dos códigos dos programas da área da Arquitetura, Engenharia e Construção, a interoperabilidade entre as diversas plataformas é uma prática cada vez mais comum, sendo em muitos casos em tempo real, ou seja, os programas trabalham simultaneamente, executando funções específicas, tais como modelagem computacional, renderização, simulação de eficiência energética com simulação de iluminação natural e etc.

A interoperabilidade em tempo real do projeto arquitetônico e desempenho energético já é uma realidade, e pode ser criada através do uso combinado de programas como o *Rhinoceros*, *Grasshopper*, *HoneyBee*, *OpenStudio*, *Energyplus* e *Radiance*. Desta forma, qualquer alteração no projeto arquitetônico (original), durante o uso do programa CAD *Rhinoceros* replicará as alterações nos demais programas de análise energética e iluminação natural, criando assim um fluxo instantâneo que indica como as alterações na arquitetura impactam no desempenho energético e vice-versa.

Outra possibilidade deste avanço é a manipulação de diferentes programas numa única plataforma, por meio de programação visual, assim é possível manipular os parâmetros de todos simultaneamente. De forma geral, é possível alterar a geometria do modelo, características arquitetônicas e do entorno e parâmetros de simulação, por meio de uma plataforma que controla as demais. No fluxo de trabalho da arquitetura, uma plataforma utilizada para manipular programas por programação visual é o *Grasshopper*, facilitando lidar com a interoperabilidade instantânea e a visão em conjunto dos resultados de simulação computacional de mais de um programa.

Esse fluxo é um grande salto para os profissionais que trabalham com projeto generativo, pois possibilita que dentro de plataformas como o *Grasshopper*, os parâmetros sejam manipulados não somente pelo projetista, mas também por algoritmos genéticos e de otimização, que de acordo com objetivos especificados permitem manipular os parâmetros de todos os programas, cruzando dados e estruturando as melhores possibilidades de projeto.

Neste estudo foi criado um fluxo de trabalho combinando programas CAD e programas de simulação computacional de eficiência energética e ainda, programas de otimização, que

utilizam algoritmos de otimização multi-objetivo baseados na plataforma de programação visual *Grasshopper* (Figura 4-2).

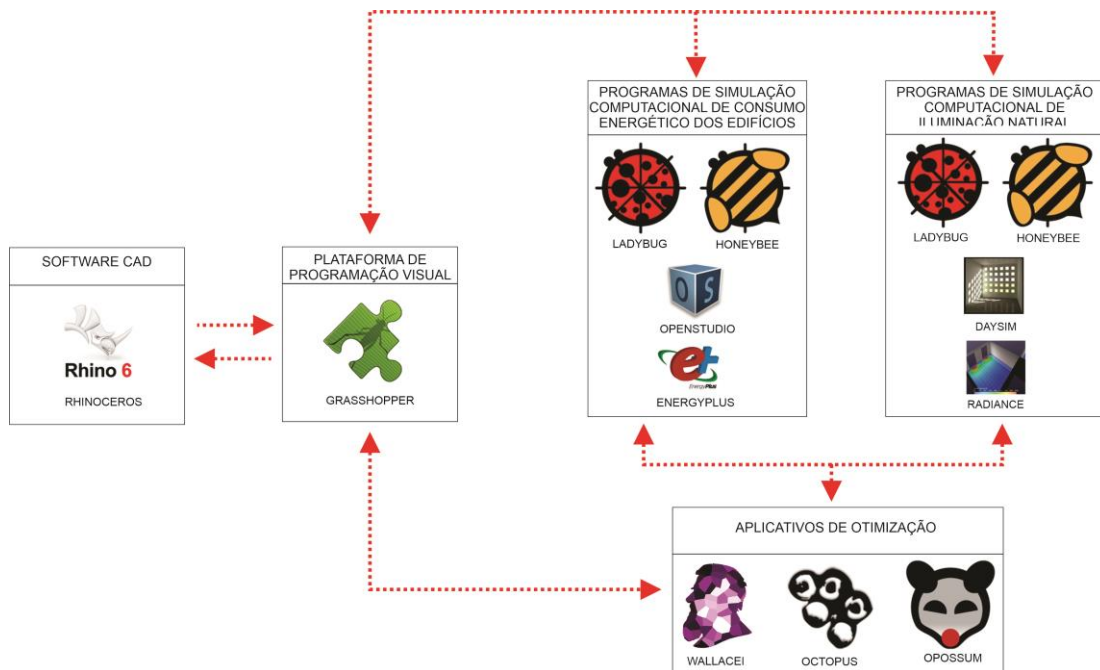


Figura 4-2: Diagrama do fluxo de trabalho entre os programas.
Fonte: (MCNEEL, 2019).

4.1.1 *Rhino* e *Grasshopper*

O *Rhino* é um programa de modelagem de geometria 3D criado pela empresa *Robert McNeel & Associates* no ano de 1998. Atualmente atende as plataformas Windows e macOS, sendo utilizados por *designers*, arquitetos e engenheiros (MCNEEL, 2019). Seu mecanismo de criação é baseado em NURBs (*Nonuniform Rational B-Splines*), que é um método de modelagem utilizado para formas complexas, que permite a criação de geometrias através de linhas *Splines*⁴, ao invés de uma junção de linhas retas. Apresenta uma interface de fácil compreensão e resposta de criação rápida (Figura 4-3).

⁴ Curva definida matematicamente por dois ou mais pontos de controle, esses pontos são chamados de nós.

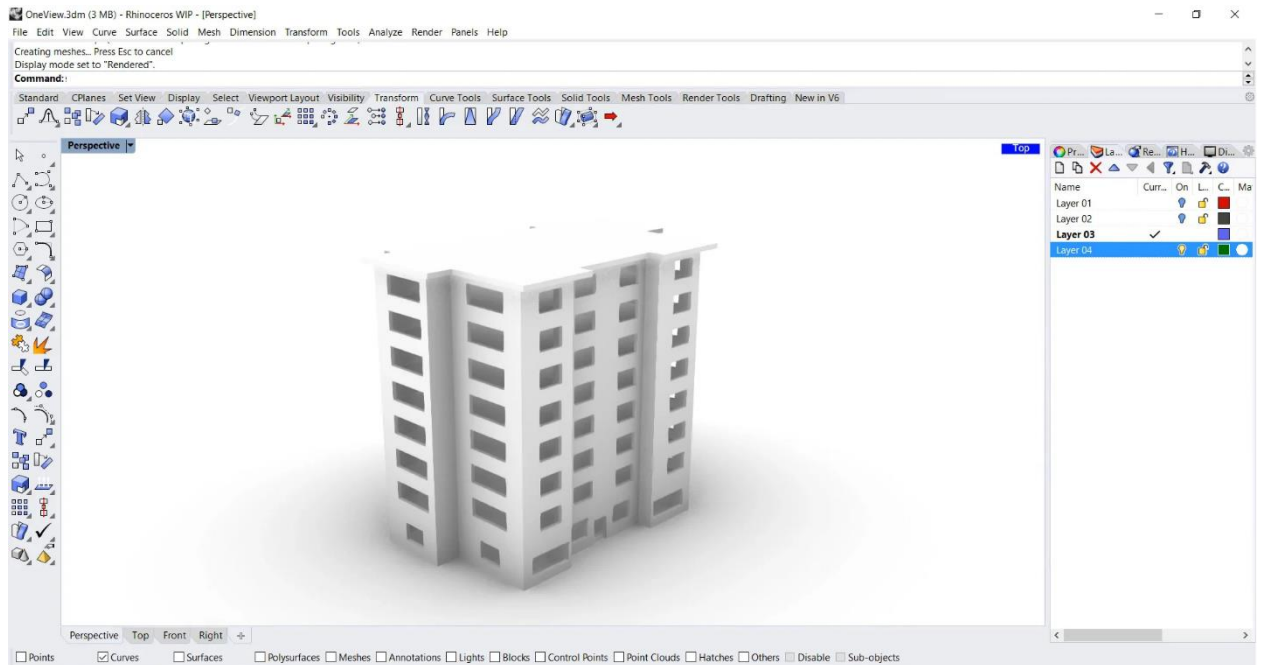


Figura 4-3: Interface do programa Rhinoceros 6.

Fonte: (MCNEEL, 2019).

A partir da versão *Rhinoceros-6* de 2018, o programa incorporou em seu mecanismo o *Grasshopper*, que surgiu inicialmente como um *plug-in* e a agora faz parte integral. O *Grasshopper* é um editor de algoritmo gráfico integrado ao programa de modelagem 3D *Rhinoceros* que permite a criação de script ou programação por linguagem visual (Figura 4-4), sem necessidade de conhecimento prévio de programação textual, possibilitando a utilização e manipulação de ferramentas de terceiros que vão desde análise ambiental até controle robótico (MCNEEL, 2019).

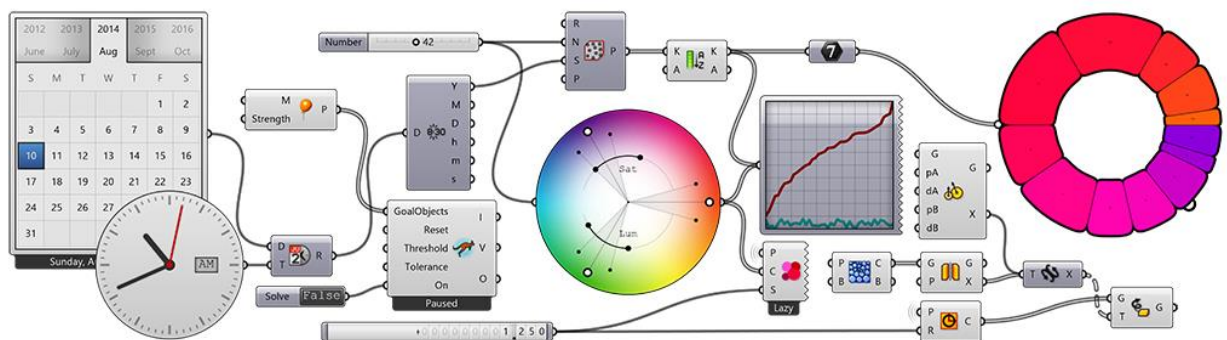


Figura 4-4: Esquema de programação visual por ícones no Grasshopper.

Fonte: (MCNEEL, 2019).

Seu funcionamento acontece por meio de ligação de funções pré-estabelecidas em ícones, que possibilitam a manipulação dos elementos gráficos e informações, tanto do modelo, como dos programas de simulação incorporados nele, assim, o *Grasshopper* cria uma interface para o projetista com os elementos do programa para criação e manipulação de novas funções personalizadas, facilitando o uso para tarefas específicas.

O sucesso do programa *Rhinoceros* está diretamente associado ao uso do NURBS (*Nonuniform Rational B-Splines*) como modelo matemático para gerar superfícies curvas e ao *Grasshopper*, que possibilita a integração com diversos *plug-ins* gratuitos para variadas disciplinas de engenharia, arquitetura e física. O programa tem um custo relativamente baixo, se comparado aos demais utilizados para modelagem 3D e atualmente é utilizado por grandes escritórios de arquitetura do mundo, tais como o *Zaha Hadid Architects*, *UNStudio* e *Bjarke Ingels Group*.

4.1.2 *Energyplus e Radiance*

Os programas mais utilizados para simulação computacional de eficiência energética e avaliação de elementos de controle solar são: *EnergyPlus*, *Radiance*, *DOE-2*, *IES-VE*, *TAS*, *TRNSYS*, *ESP-r*, *Lightscape*, *Design Builder*, *Fluent*, *DIVA*, *Ecotect*, *IENUS*, sendo o *EnergyPlus* e *Radiance* os mais utilizados em pesquisas até o ano de 2015 (KIRIMTAT, *et al.*, 2015).

O *EnergyPlus* é um programa de simulação total de energia de edifícios desenvolvido pelo Departamento de Energia dos EUA (DOE), que engenheiros, arquitetos e pesquisadores utilizam para simular o consumo de energia total de um edifício por climatização mecânica, ventilação, iluminação. Seu algoritmo permite cálculos robustos e precisos de transferência de calor e carga térmica de máquinas e pessoas com personalização do uso anual do edifício. É gratuito e de código aberto, mundialmente reconhecido (DOE, 2019).

Devido a sua manipulação ser por meio de linguagem de programação e seu código aberto, muitos programas surgiram como interface gráfica para modelagem e simulação total de energia de edifícios utilizando o *EnergyPlus* como motor de simulação como *DesignBuilder*, *Simergy*, *Euclid*, *BuildSimHub*, *OpenStudio*, *Honeybee*, entre outros. Dentre eles destacam-se o *BuildSimHub*, *OpenStudio* e *Honeybee*, que fazem parte do portfólio de projetos de modelagem energética predial do

Building Technologies Office (BTO) do Departamento de Energia dos EUA (DOE), junto com o *Radiance* para simulação de iluminação natural e artificial.

O *Radiance* é uma plataforma aberta para simulação de iluminação natural criado por Greg Ward durante seu trabalho no Laboratório Nacional de Lawrence Berkeley entre 1985 a 1997, e continua em constante aperfeiçoamento pelo laboratório. Seu mecanismo de cálculo apresenta poucas limitações da geometria e materiais a serem simulados, sendo amplamente utilizado por engenheiros, arquitetos e pesquisadores para estudo de sombreamento, iluminação natural e controle solar de edifícios e produtos (DOE, 2019). Assim como o *EnergyPlus*, devido ao seu poder de computação, gratuidade e código aberto é muito utilizado como motor de simulação de outras plataformas de estudo de iluminação natural como: *DesignBuilder*, *Simergy*, *Euclid*, *IES-VE*, *OpenStudio*, *Honeybee*, *DIVA* etc.

4.1.3 *Ladybug Tools*

O *Ladybug tools* é um conjunto de programas computacionais gratuitos (*Ladybug*, *Honeybee*, *Butterfly* e *Dragonfly*) para análise ambiental e consumo de energia total de edifícios que faz parte do portfólio de projetos de modelagem energética predial do *Building Technologies Office* (BTO) do Departamento de Energia dos EUA (DOE). Funciona inserido em plataformas de programação visual do *Grasshopper* para *Rhinoceros* e *Dynamo* para *Revit*, utilizando motores de simulação validados mundialmente para simulação, tais como *Radiance*, *EnergyPlus*, *Therm* e *OpenFOAM*.

O conjunto de programas é composto pelo: *Ladybug*, que faz análise detalhada de dados climáticos e sua interação com o edifício (Figura 4-5); o *Honeybee*, que executa simulação de iluminação natural usando *Radiance*, o consumo total de energia utilizando o *OpenStudio* e *EnergyPlus*, e fluxo do calor através do *Therm* (Figura 4-6); o *Butterfly*, que executa simulações da dinâmica computacional de fluidos (CFD) utilizando o *OpenFoam* (Figura 4-7); o *Dradonfly*, que simula fenômenos climáticos de grande escala relacionados a mudança climáticas em centros urbanos e cidades (Figura 4-8).

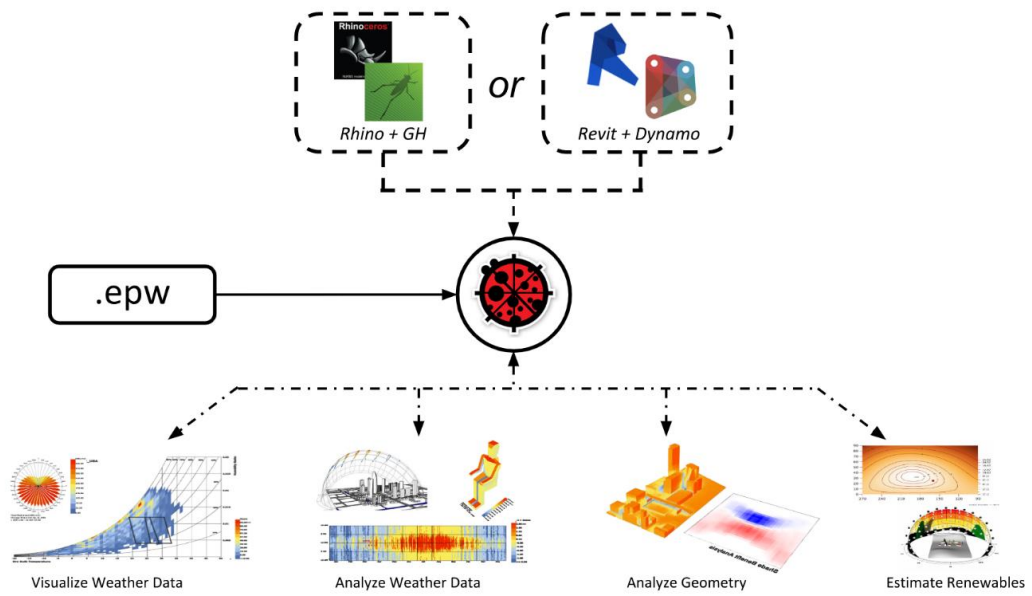


Figura 4-5: Fluxograma de funcionamento do Ladybug.

Fonte: (LADYBUG, 2019).

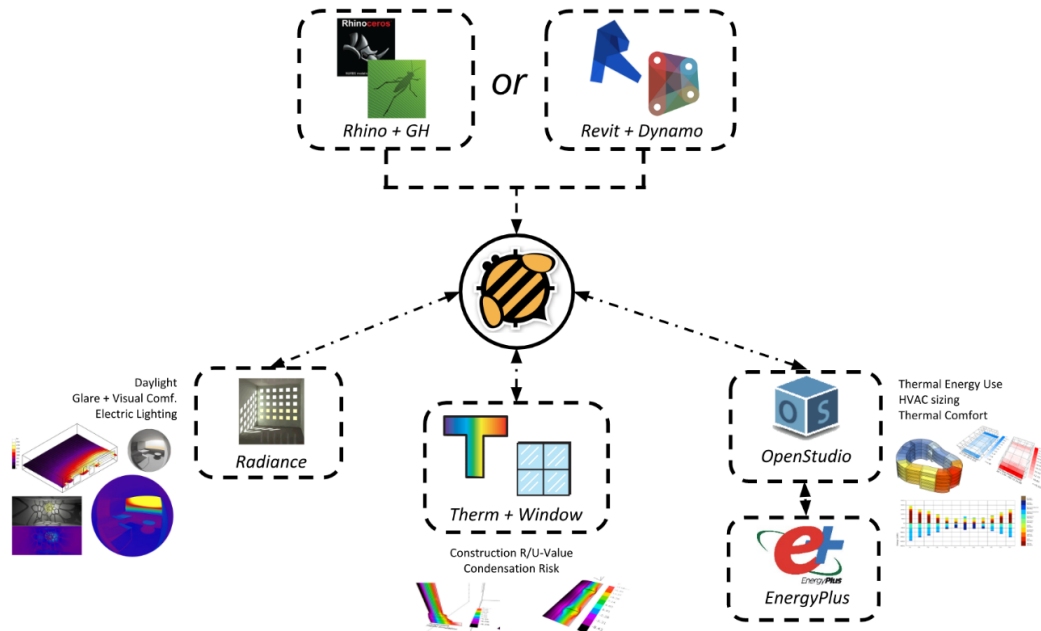


Figura 4-6: Fluxograma de funcionamento do Honeybee.

Fonte: (LADYBUG, 2019).

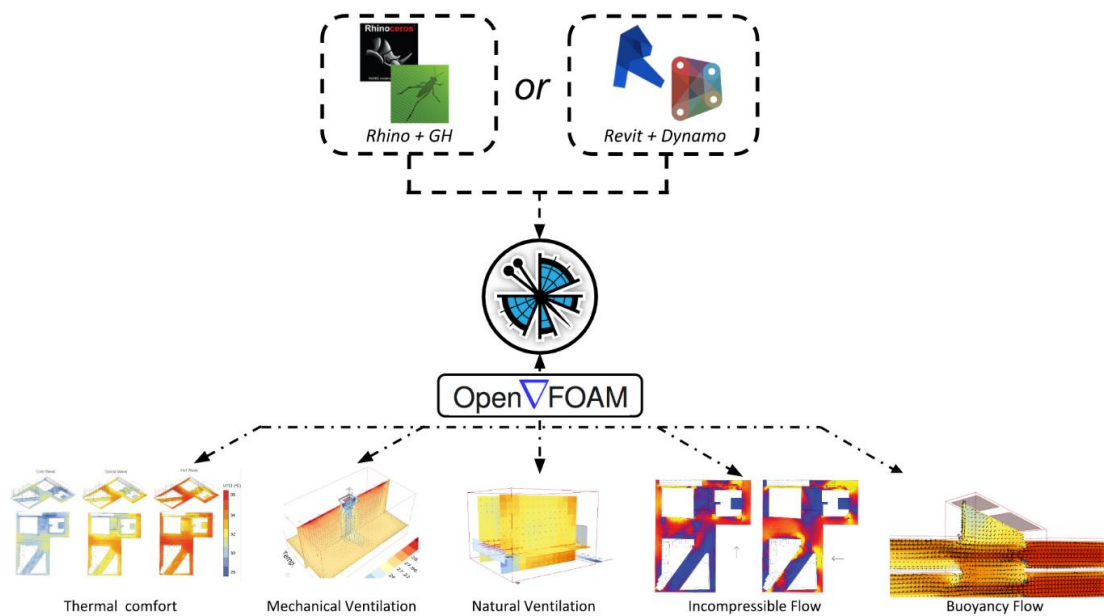


Figura 4-7: Fluxograma de funcionamento do Butterfly.

Fonte: (LADYBUG, 2019).

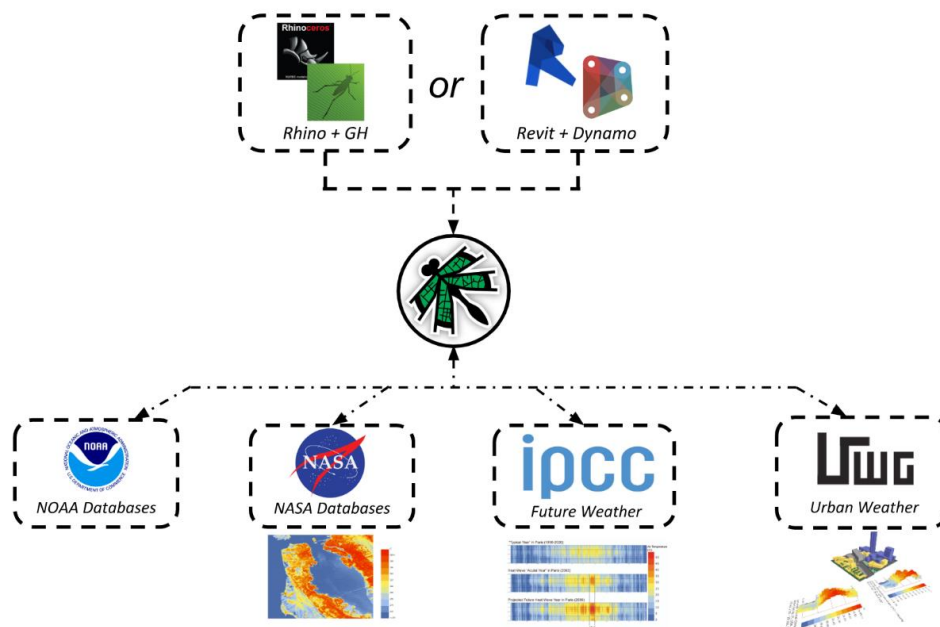


Figura 4-8: Fluxograma de funcionamento do Dragonfly

Fonte: (LADYBUG, 2019).

Esse conjunto de ferramentas é extremamente eficaz para o desenvolvimento de estudos de eficiência energética, pois faz uso de motores de simulação robustos. Apresentam uma interface amigável e possibilidade de integração das ferramentas de simulação, tais como estudo da dinâmica dos fluidos (ventilação), em conjunto com o consumo energético total do edifício, considerando um ambiente de programação visual e parâmetros que criam infinitas combinações de

uso e grande flexibilidade do modelo. Essas ferramentas possibilitam a análise ambiental e de eficiência energética, simultaneamente com as alterações de projeto, durante as fases iniciais, sem grande investimento de tempo de modelagem e análise de dados.

4.1.4 *Octopus, Wallacei X e Opossum*

O processo do *design* baseado em desempenho tem se tornado uma abordagem comum para se trabalhar com eficiência energética. Dentre as estratégias mais utilizadas dos métodos específicos de otimização que mais se destacam são os por Computação Evolutiva (CE) que podem alcançar soluções quase ótimas com muitos parâmetros em um tempo razoavelmente pequeno (EKICI, CUBUKCUOGLU, *et al.*, 2019).

A Computação Evolutiva utiliza procedimentos inspirados na evolução biológica da teoria da relatividade, onde através dos parâmetros é criada uma população inicial, após isso ocorre o acasalamento dos indivíduos que geram novos indivíduos e passam pelo processo de acasalamento novamente. No meio do processo alguns indivíduos passam por mutações que estimulam a exploração de novas espécies de indivíduos. E assim os algoritmos de Computação Evolutiva criam soluções de otimização (EKICI, CUBUKCUOGLU, *et al.*, 2019).

Atualmente existem variados modelos de algoritmos de Computação Evolutiva sendo utilizados para fins de otimização na arquitetura. Os que apresentam resultados e eficiência para estudos destinados a arquitetura e engenharia são: NSGA II (*Nondominated sorting genetic algorithm*), SPEA-2 (*Strength Pareto Evolutionary Algorithm*), HypE (*Hypervolume-Based Many-Objective Optimization*). Além dos algoritmos de Computação Evolutiva também estão disponíveis outros modelos de algoritmos de otimização como: RBFMOpt (*Radial Basis Function Multi-objective Optimization*), MACO (*Multi-objective Ant Colony Optimization*), NSPSO (*Non-dominated Sorting Particle Swarm Optimizer*) e MOEA/D (*multiobjective evolutionary algorithm based on decomposition*).

Para utilização desses algoritmos de otimização multiobjetivo junto aos programas de simulação computacional, é comum o uso do *Octopus, Wallacei X e Opossum* para o programas *Grasshopper* do *Rhinoceros*.

O *Octopus* é um programa que pode ser adicionado ao Grasshopper que faz uso do Algoritmo Evolutivo de Força de Pareto - SPEA-2 (*Strength Pareto Evolutionary Algorithm*), desenvolvido pela ETH Zurich para otimização multiobjetivo, com funcionamento e interface semelhante com os demais programas de otimização para o *Grasshopper*, mas introduzindo o *Pareto Front*⁵. Ele contém um mecanismo visual que permite acompanhar os resultados de otimização de todas as simulações (Figura 4-9).

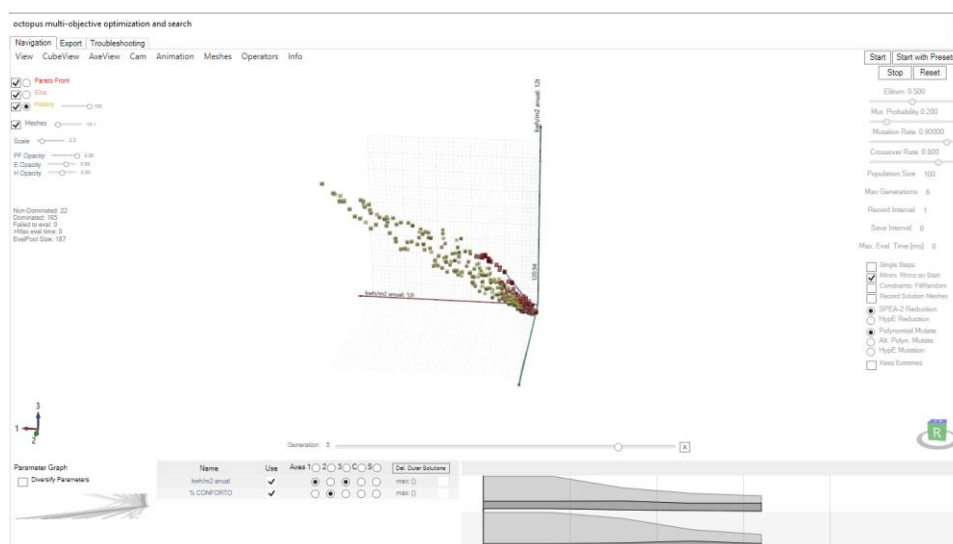


Figura 4-9: Interface do *Octopus*.

Wallacei X é um programa lançado em janeiro de 2018 com grande capacidade de otimização. Ele utiliza o Algoritmo Genético Multiobjetivo - NSGA II (*Nondominated Sorting Genetic Algorithm*) como algoritmo primário para otimização de múltiplos objetos, e permite fazer estudos como o de alcançar o melhor desempenho térmico e lumínico otimizando aberturas, paredes, coberturas e elementos de controle solar simultaneamente, buscando alcançar a solução com melhor resultado, considerando todas as variáveis envolvidas.

O *Opossum* é um programa criado no ano de 2017, e diferentemente dos demais, disponibiliza mais de um algoritmo de otimização, com foco em otimização de estudos arquitetônicos (WORTMANN, 2017). Seus principais algoritmos de otimização mono-objetivo são o RBFOpt e CMA-ES, e para otimização multiobjetivo são o RBFMOpt (*Radial Basis Function Multi-objective Optimization*), o MACO (*Multi-objective Ant Colony Optimization*), o NSPSO (*Non-dominated*

⁵ Conjunto de soluções não dominadas, sendo escolhido como ótimo, se nenhum objetivo pode ser melhorado sem sacrificar pelo menos um ou outro objetivo.

Sorting Particle Swarm Optimizer) e o MOEA/D (*Multiobjective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition*).

De modo geral, o *Octopus* e o *Wallacei X* necessitam que o usuário entenda a lógica dos algoritmos evolutivos para determinar parâmetros como taxa de mutação (uma taxa que determina o grau de mutação entre uma geração e outra), *crossover* (operador genético usado para variar a programação de um cromossomo) entre outros, já o *Opossum* não necessita desse conhecimento prévio, preenchendo os parâmetros automaticamente, e conseqüentemente facilitando o uso por engenheiros e arquitetos.

4.1.6 Ordem de Utilização dos Programa de Simulação Computacional

De forma a detalhar a utilização dos programas acima descritos, será apresentada nesse item uma síntese da ordem de uso e sua finalidade:

1. *Rhinoceros 6*: Programa para modelagem e visualização do modelo virtual em três dimensões e uso da plataforma de programação visual *Grasshopper*;
2. *Grasshopper*: Programa de programação visual para criação do *script* de *design* generativo dos elementos de controle solar, utilizando os Programa de simulação computacional e otimização multiobjetivos;
3. *Ladybug*: Programa para o *Grasshopper*, que permitiu a leitura dos dados climáticos utilizados para simulação nos programas *Energyplus* e *Radiance*;
4. *Honeybee*: Programa para o *Grasshopper*, que permitiu criar e configurar os modelos computacionais para serem simulados nos programas *Energyplus* e *Radiance*;
5. *Energyplus*: Programa utilizado para execução das simulações computacionais do consumo de energia do modelo, por meio da leitura dos dados fornecidos pelo programa *Honeybee*.
6. *Radiance*: Programa utilizado para a simulação das condições de iluminação natural do modelo, por meio da leitura dos dados fornecidos pelo programa *Honeybee*;

7. *Octopus, Wallacei X e Opossum*: Programa para o *Grasshopper* que permitiram o uso dos algoritmos de otimização utilizados para manipular as variáveis dos elementos de controle solar e conseqüentemente, otimizá-los com base nos resultados das simulações do *Energyplus* e *Radiance*.

4.1.7 Clima para Estudo de Elementos de Controle Solar

Para o desenvolvimento das simulações computacionais foi escolhida a cidade de Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil, por tratar-se de um clima temperado úmido, com verões quentes (Cfa), de acordo com a classificação Köppen, e apresentar uma das maiores amplitudes térmicas do estado, com temperaturas que podem variar abaixo de 0°C a 40°C entre o verão e o inverno, além de elevada umidade durante todo o ano (DELGADO, SACTH e VETTORAZZI , 2016). Devido a essas características verifica-se a necessidade de sombreamento para o clima de Foz do Iguaçu durante o verão. O estudo dessa e outras estratégias bioclimáticas que atendam ao clima local se mostra um grande desafio, pois há a necessidade de selecionar e mesclar estratégias que auxiliam nos períodos quentes sem impactar negativamente nos períodos frios.

Delgado, Sacht e Vettorazzi (2016) apresentam as estratégias bioclimáticas mais indicadas para o meio urbano de Foz do Iguaçu, sendo: o uso de vegetação para sombreamento, elevar os edifícios e equipamentos urbanos em relação ao solo para evitar a umidade, captura dos ventos predominantes para ventilação natural e zonas sombreadas ao ar livre com uso de varandas e pátios.

Já as estratégias bioclimáticas para os edifícios em Foz do Iguaçu segundo o Projeteer (2019), as mais indicadas são: ventilação natural em 34% das horas do ano, inércia térmica em 28% das horas do ano e sombreamento em 16% das horas do ano (Figura 4-10).

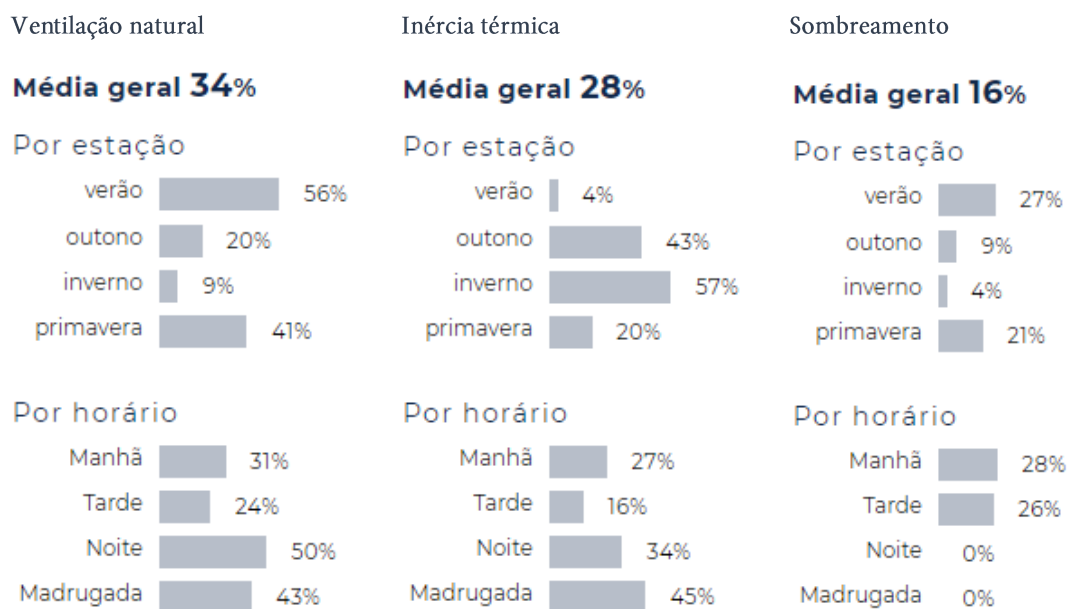


Figura 4-10: Estratégias bioclimáticas para edifícios em Foz do Iguaçu-PR.

Fonte: Adaptado pelo autor de Projeteee (2019).

Foz do Iguaçu segundo a NBR 15220-3 (ABNT, 2005) está situada na Zona Bioclimática 3, e segundo a Instrução Normativa Inmetro para a Classe de Eficiência Energética de Edificações Residenciais – INI-R (CB3E, 2018), que passou a utilizar 24 grupos climáticos para definição dos climas brasileiros está situada no grupo climático 15.

A classificação de climas adotada pelo INI-R foi proposta pelo pesquisador Roriz (2012) (2014), onde divide em 24 grupos as cidades brasileiras diferenciando-as de clima mais frio (Grupo 1) para as de clima mais quente (grupo 24). Para classificação das zonas foram analisados seguintes parâmetros dos dados climáticos: média anual da temperatura do ar; diferença entre a maior e a menor temperatura média mensal; média anual da amplitude térmica, e diferença entre a maior e a menor amplitude térmica mensal” (BAVARESCO, *et al.*, 2017).

A mudança do zoneamento climático está sendo colocada como pauta de discussão na revisão da Norma de Desempenho de edificações habitacionais - NBR 15575 (ABNT, 2013a) em conjunto com a adoção dos parâmetros de eficiência energética utilizados no Programa de Etiquetagem Energética das Edificações - PBE Edifica (LAMBERTS, 2018). Devido a esse fato, o zoneamento bioclimático proposto pela INI-R será utilizado.

Para o estudo vigente, as características climáticas como temperatura do ar, umidade, radiação, luminosidade, direção e velocidade do vento de Foz do Iguaçu serão extraídas de

dados climáticos em formato TMY (*Typical Meteorological Year* ou ano típico meteorológico) montado a partir de dados meteorológicos coletados de 1973 a 2018, disponibilizado no site do *OneBuilding*⁶ e *EpwMap*⁷.

4.1.8 Modelo para Simulação Computacional

As residências consomem 22% de toda energia produzida no mundo (ABERGEL, DEAN, *et al.*, 2018). Somente no Brasil, o consumo de energia elétrica no setor residencial cresceu de 23,3% do ano de 2011 para 25% em 2017 e 28,98% em 2018 (LAMBERTS, DUTRA e PEREIRA, 2014; EPE, 2018; EPE, 2019). Esse crescimento é cada vez mais preocupante devido o Brasil ter atualmente mais da metade do seu consumo energético do setor residencial utilizados por apenas 10% das residências no país, e conforme a acessibilidade a condicionadores de ar aumentar, o consumo energético no setor residencial aumentará também (LAMBERTS, 2020), considerando que o Brasil é a 6º nação com maior potencial de uso de ar-condicionado no mundo (BIARDEAU, *et al.*, 2019).

O consumo energético advindo da refrigeração de edifícios é a que apresenta maior potencial de crescimento no mundo até 2050 (DEAN, *et al.*, 2016). A necessidade do desenvolvimento de projetos residenciais com eficiência energética tende a ser cada vez mais presente na realidade brasileira, com o advento do aquecimento global, países de climas quentes como o Brasil tendem a consumir cada vez mais energia com climatização (LAMBERTS, 2020).

Com intuito de estudar o desempenho de elementos de controle solar criados por meio de *design* generativo, optou-se por modelar uma célula, do tipo *shoebox*⁸, de caráter residencial que representa um ambiente de permanência prolongada (especificamente a sala de estar), com base nas dimensões mínimas de referência do Código de obras de Foz do Iguaçu (FOZ DO IGUAÇU, 1991), NBR 15575 (ABNT, 2013) e INI-R (CB3E, 2018). A escolha pela tipologia de edifício residencial é devido a sua representatividade no consumo de energia e características construtivas.

O INI-R (Instrução Normativa Inmetro para a Classe de Eficiência Energética de Edificações Residenciais) é uma proposta de atualização do RTQ-R (Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência de Edificações Residenciais) que está em fase de aprovação. O uso

⁶ <http://climate.onebuilding.org/>

⁷ <http://www.ladybug.tools/epwmap/>

⁸ Modelo de simulação energética que contempla uma ou algumas zonas térmicas.

dos parâmetros do INI-R ao invés do RTQ-R explica-se por ser uma versão com atualizações referentes aos métodos de simulação e zoneamento climático, possibilitando que o estudo sirva de referência após a aprovação da instrução normativa.

Para determinar as dimensões e uso da célula, foram analisados as exigências de área mínima do ambiente, aberturas para ventilação e iluminação, elemento de controle solar no Código de Obras de Foz do Iguaçu (FOZ DO IGUAÇU, 1991), NBR 15575 (ABNT, 2013b) e INI-R (CB3E, 2018) conforme a Tabela 4-1.

Tabela 4-1: Exigências e sugestões do Código de Obras, NBR 15575 e INI-R.

CÓDIGO DE OBRAS FOZ DO IGUAÇU					
Ambiente	Área mínima (m ²)	Pé direito (m)	Área mínima de abertura de iluminação	Área mínima de abertura ventilação	Elemento de sombreamento
Sala	8,00	2,40	1/6 da área do piso	1/16 da área do piso	-
NBR 15575					
Ambiente	Área mínima (m ²)	Pé direito (m)	Área mínima de abertura de iluminação	Área mínima de abertura ventilação	Elemento de sombreamento
Sala	-	≥ 2,50	-	Zonas 1 a 7 = área (m ²) ≥ 7% da área do piso Zona 8 = área (m ²) ≥ 8% (Norte) e 12% (Nordeste e Sudeste) da área do piso.	Quando não alcançar desempenho térmico = adicionar elemento de sombreamento com capacidade de bloquear 50% da radiação.
INI-R					
Ambiente	Área mínima (m ²)	Pé direito (m)	Área mínima de abertura de iluminação	Área mínima de abertura ventilação	Elemento de sombreamento
Sala	Conforme projeto	Conforme projeto	-	Grupo climático 1 a 16= 10% da área do piso. Grupo climático 17 a 24= 12% da área do piso.	Optativo = varanda, beiral e brise horizontal ≥ 0,5 m.
PARÂMETROS ADOTADOS (CÉLULA)					
Ambiente	Área mínima (m ²)	Pé direito (m)	Área mínima de abertura de iluminação	Área mínima de abertura ventilação	Elemento de sombreamento
Sala	9m ²	2,80	55% área do piso	27,5 % área do piso	

Com base na Tabela 4-1, adotou-se para a célula a ser estudada uma área de 9,00 m² e pé direito de 2,80 m. Já para o dimensionamento da janela, as indicações da NBR 15575, Código de

obras de Foz do Iguaçu e INI-R são para áreas mínimas, e de modo geral não é indicado o uso de elementos de controle solar para o clima, e caso utilizado sem planejamento pode ocasionar problemas de ineficiência na iluminação natural em algumas orientações, por isso, optou-se na escolha de uma janela que representasse um grande vão com 55% da área do piso.

A janela é um dos elementos mais complexos a ser definidos quando objetiva-se melhorar as condições de eficiência energética. Por exemplo, quando se busca melhores condições de iluminação com grandes vãos, conseqüentemente aumenta-se a exposição do ambiente a radiação solar direta, que pode gerar superaquecimento e ofuscamento para os usuários. Assim, o elemento de controle solar funciona como uma opção de solução arquitetônica, quando se objetiva uma boa iluminação natural, otimização da ventilação natural, melhor distribuição da luz solar e bloqueio da radiação solar direta em grandes aberturas.

A célula criada com base nos parâmetros da Tabela 4-1 está representada pela Figura 4-11.

Neste estudo não foram propostas paredes adiabáticas, visando seguir os parâmetros orientadores do INI-R (CB3E, 2018) a fim de possibilitar futuramente o enquadramento nos índices de eficiência energética do Procel Edifica. No caso de utilização de paredes adiabáticas, os resultados poderiam ser diferentes dos obtidos no presente estudo.

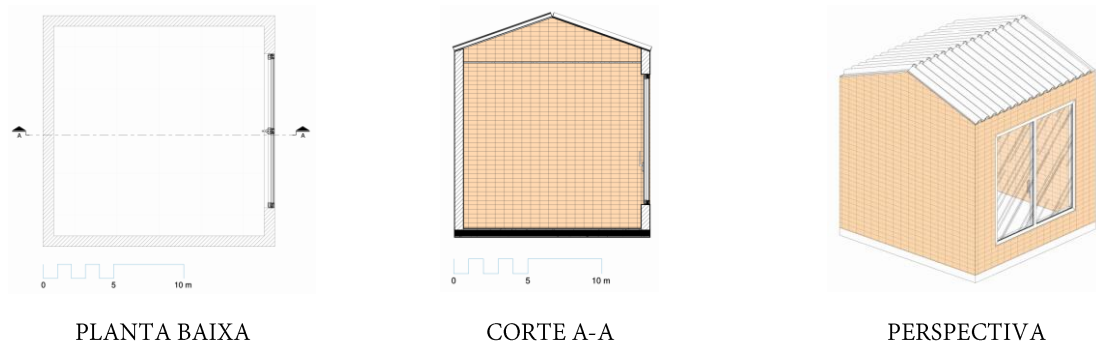


Figura 4-11: Planta baixa, corte e perspectiva da célula.

As características físicas dos sistemas construtivos (Tabela 4-2) das paredes, cobertura e vidro da célula foram definidos com base no edifício de referência do INI-R, já as características do piso interno em contato com o solo e os elementos de controle solar foram extraídos da Biblioteca de componentes construtivos brasileiros para o uso do *EnergyPlus* (LABEEE, 2017).

Tabela 4-2: Características físicas dos componentes construtivos.

Parede externa: tijolo maciço 9,0 x 6,0 x 19,0cm, sem revestimento interno e externo			
Transmitância térmica (U) [W/m ² .K]	Absortância (α)	Emissividade	Capacidade térmica (CT) [kJ/m ² .K]
3,65	0,60	0,90	média (50 < CT ≤ 200)
Cobertura externa: forro de madeira de 1,0 cm; Câmara de ar (> 5,0 cm) e telha cerâmica			
Transmitância térmica (U) [W/m ² .K]	Absortância (α)	Emissividade	Capacidade térmica (CT) [kJ/m ² .K]
2,02	0,4	0,90	leve (CT < 50)
Vidro: vidro simples incolor, com 3 mm de espessura			
Transmitância térmica (U) [W/m ² .K]		Fator Solar	
5,7W/m ² K		0,87	
Piso em contato com o solo: Laje concreto 4 cm Contrapiso 6 cm Piso cerâmico 1.2 cm			
Transmitância térmica (U) [W/m ² .K]	Absortância (α)	Capacidade térmica (CT) [kJ/m ² .K]	
3,57	0,4	234,4	
Elemento de controle solar: Alumínio sem pintura			
Transmitância térmica (U) [W/m ² .K]	Absortância (α)	Emissividade	Capacidade térmica (CT) [kJ/m ² .K]
330	0,05	0,05	3,60

4.1.9 Parâmetros de Simulação Computacional

Para a execução das simulações computacionais foram adotados os parâmetros de calibragem do modelo computacional do INI-R (CB3E, 2018) com definições das cargas de ocupação, equipamentos e iluminação, assim como as configurações do sistema de condicionamento de ar. Os parâmetros adotados são apresentados na Tabela 4-3.

Tabela 4-3: Parâmetros para calibragem do modelo computacional.

VENTILAÇÃO NATURAL	
Ventilação	Ventilação híbrida.
Setpoint de aquecimento (temperatura operativa interna)	≤16°C
Setpoint ventilação natural	≥19°C < 26°C
Setpoint de refrigeração (temperatura operativa interna)	≥ 26°C
ILUMINAÇÃO E GANHOS	
Densidade de potência de equipamentos na sala	120W das 14 h às 21:59
Atividade metabólica da sala	108 Watts/pessoa (2 pessoas)
Densidade de potência de iluminação (DPI)	5,0 W/m ²
Schedules de ocupação da sala em dias de semana e final de semana	14h00 às 22:00.
Schedules de iluminação da sala em dias de semana e final de semana	16h00 às 22:00.
CONDICIONAMENTO DE AR	
Tipo do sistema de condicionamento de ar	Packaged Terminal Heat Pump (PTHP)
Eficiência do motor	0,9
COP - Coeficiente de performance	3,5 W/W
Máximo de horas não atendida do sistema de condicionamento de ar	10%

Termostato de refrigeração	23°C
Termostato de aquecimento	19°C
Taxa de fluxo de ar por pessoa	0,0075 m ³ /s (2 pessoas)
CONFORTO TÉRMICO	
Temperatura operativa	18°C a 26°C
ABERTURAS	
Orientação do estudo	Norte e Oeste

Fonte: (CB3E, 2018)

Observa-se que para o presente trabalho, foi considerada a influência da radiação solar direta nos materiais da célula e desconsiderou-se aspectos que também poderiam influenciar significativamente na melhora do conforto térmico como a transmitância térmica dos materiais e o *Wide Window Ratio* (percentual de abertura da parede). Foram selecionados critérios específicos e uma janela fixa.

A escolha do sistema de ventilação híbrido exigiu que as configurações do *Energypus* fossem alimentadas com um *setpoint* (parâmetro em temperatura) e a definição de quando deveria ser utilizada a ventilação natural ou o condicionamento artificial para climatizar o ambiente durante os períodos de ocupação. Dessa forma, foi definido que quando a temperatura do ar interno estivesse menor ou igual a 16°C, o sistema de aquecimento entraria em funcionamento; quando a temperatura do ar interno e externo estivesse entre 19°C e 26°C o sistema de condicionamento do ar seria desligado e acionado a abertura das janelas, para proporcionar ventilação natural, e, quando a temperatura interna estivesse maior ou igual de 26°C seria ligado o sistema de refrigeração.

Os parâmetros de ganhos são relacionados aos ganhos térmicos que o ambiente tem devido aos equipamentos, sistema de iluminação e a ocupação do usuário, que influenciam na temperatura interna durante os períodos de uso e interferem nas demandas de climatização. Já os parâmetros de climatização do ar estão relacionados aos tipos de sistema, eficiência e temperatura do ar de climatização que devem ser criadas no programa de simulação computacional.

O conforto térmico pode ser definido como a condição da mente que expressa satisfação com o ambiente térmico (ASHRAE, 2005). As características do ambiente que influenciam no conforto térmico são a temperatura do ar, a temperatura radiante, a umidade e a velocidade do ar.

No estudo do conforto térmico, há diferentes métodos propostos para sua aferição, os mais utilizados são o PMV (Voto Médio Predito) e o adaptativo, sendo o primeiro mais indicado

para estudos de ambientes predominantemente climatizados artificialmente e o segundo, para ambientes climatizados naturalmente ou mistos com sistemas artificiais ou mecânicos.

O presente estudo utilizou o modelo de conforto adaptativo como métrica de conforto, o mesmo empregado pelo INI-R, que considera como padrão o percentual de horas ocupadas em conforto térmico (PHOCT). Esse percentual é determinado pela temperatura operativa num intervalo de 18°C a 26°C do ambiente quando ventilado naturalmente.




O método considerado para avaliar as condições de iluminação artificial foi a autonomia espacial da luz do dia (sDA) proposto e aprovado pela IES – *Illuminating Engineering Society* (LM, 2013), que estipula que o ambiente deve ter condições mínimas de iluminação em 50% das horas do ano entre as 8:00 as 18:00. O intervalo do sDA utilizado na pesquisa foi de 250 lux (mínimo) a 3000 lux (máximo) considerando que acima de 3000lux a iluminação solar pode gerar desconforto visual nos usuários. O modelo utilizado é ideal e não considerou obstruções no fator de visão do céu, como edificações ou vegetação no entorno.












4.1.9.1 Criação do Script para Simulação Computacional

A criação do *script* ou algoritmo generativo ocorreu por meio de programação visual no *Grasshopper*, com uso dos componentes do *HoneyBee* e *LadyBug* de modelagem e calibragem das zonas e elementos de controle solar no *EnergyPlus* e *Radiance*, assim como conexão dos parâmetros dos elementos de controle solar e os resultados das simulações aos *plug-ins* que utilizam os algoritmos de otimização.

Para a modelagem da zona térmica da célula foram considerados os componentes listados da Tabela 4-4 em ordem decrescente de utilização na criação do *script*. Os *plug-ins* são alimentados com parâmetros que serão apresentados nos próximos itens da metodologia.

Tabela 4-4: Ícones do *Honeybee* e *LadyBug* para modelagens da célula para estudo da demanda energética.

ÍCONE	NOME COMPONENTE	ATRIBUIÇÃO DO COMPONENTE
	<i>Masses2Zones</i>	Componente para transformar qualquer geometria fechada em zona térmica, com todas as propriedades necessárias para executá-las através de uma simulação no <i>EnergyPlus</i> .
	<i>Set EnergyPlus Zone Loads</i>	Componente para alterar carga de ocupação, iluminação, equipamentos das zonas térmicas.
	<i>Annual Schedule</i>	Componente para gerar lista de agenda de ocupação, iluminação, climatização, etc.

	<i>Set EnergyPlus Zone Schedules</i>	Componente para alterar agenda de ocupação, iluminação, climatização das zonas térmicas.
	<i>Glazing based on ratio</i>	Componente para geração de janelas com base no percentual de abertura da face.
	<i>EnergyPlus Window Shade Generator</i>	Componente para gerar elementos de sombreamento no Energyplus.
	<i>EnergyPlus NoMass Opaque Material</i>	Componente para criar um material opaco personalizado.
	<i>EnergyPlus Window Material</i>	Componente para criar um material de janela personalizado.
	<i>EnergyPlus Construction</i>	Componente para criar sistemas construtivos no EnergyPlus.
	<i>Set EnergyPlus Zone Thresholds</i>	Componente para definir limites de luz natural e pontos de ajustes do sistema de condicionamento de ar.
	<i>Assign HVAC System</i>	Componente para atribuir os recursos de HVAC (Aquecimento, Ventilação e Ar condicionado).
	<i>Set EP Air Flow</i>	Componente para editar o fluxo de ar entre as zonas e aberturas com ventilação natural.
	<i>Export To OpenStudio</i>	Componente para exportar a Zona Térmica para um arquivo do OpenStudio e executá-lo no EnergyPlus.
	<i>Open EPW And STAT Weather Files</i>	Componente para baixar automaticamente um arquivo climático do banco de dados do Departamento de Energia (DOE)

Fonte: (RODRICKS e HEUMANN, 2018)

Após a criação do *script*, qualquer alteração nos parâmetros relacionados ao modelo computacional gera uma simulação no *EnergyPlus* e altera os resultados. Esse fluxo proporcionou agilidade entre a manipulação dos parâmetros e os resultados facilitando a exploração do *design* dos elementos analisados (Figura 4-12).






Num primeiro momento os programas *Octopus*, *Wallacei X* e *Opossum* que utilizam algoritmos de otimização multiobjetivo foram conectados aos parâmetros dos elementos de controle solar para manipulá-los, onde cada alteração permitiu uma nova simulação no *EnergyPlus*, que foram desenvolvidas de forma a verificar a situação com menor consumo energético e melhores condições de conforto térmico com todos os algoritmos de otimização disponíveis nos programas.

Em um segundo momento foi alterado o *script* para análise do consumo energético, melhores condições de conforto térmico e estudo das melhores condições de iluminação natural a partir do *Radiance*. O uso desse *script* foi limitado a capacidade computacional de simulação de um computador com as seguintes características: processador i7-8700K (6 núcleos) com frequência de 4,7

GHz, refrigeração do processador a água, 32 GB de memória DDR4 com frequência de 3600 Mhz, HD SSD M.2 de 250 GB, Placa de vídeo GTX 2070 com 8GB de memória.





O *script* para análise de iluminação natural no *Radiance* utilizou os componentes do Honeybee em ordem decrescente da Tabela 4-5.

Tabela 4-5: Ícones do Honeybee para estudo de iluminação natural.

ÍCONE	NOME COMPONENTE	ATRIBUIÇÃO DO COMPONENTE
	<i>Generate Test Points</i>	Componente para gerar pontos de teste no Radiance e Daysim.
	<i>Annual Daylight Simulation</i>	Componente para configurar os parâmetros de saída da simulação de iluminação natural.
	<i>Radiance Opaque Material</i>	Componente para criar um material opaco para o Radiance.
	<i>MSH2RAD</i>	Componente para converter uma geometria em arquivo para o Radiance.
	<i>Run Daylight Simulation</i>	Componente para executar a simulação de iluminação natural.

Para análise dos resultados foi utilizado os seguintes componentes do *Ladybug* e Honeybee no *Grasshopper*: *Read EP Result*, *Normalize Data by Floor Area*, *Read Annual Results II* e *Adaptive Comfort Calculator* (Tabela 4-6).

Tabela 4-6: Ícones do Honeybee e Ladybug para leitura dos resultados

ÍCONE	NOME COMPONENTE	ATRIBUIÇÃO DO COMPONENTE
	<i>Read EP Result</i>	Componente para leitura dos dados das simulações no <i>EnergyPlus</i> .
	<i>Normalize Data by Floor Area</i>	Componente para transformar o resultado de kwh para Kwh/m ² .
	<i>Read Annual Results II</i>	Componente para leitura dos resultados do <i>Daysim</i> a partir das entradas dos resultados das simulações.
	<i>Adaptive Comfort Calculator</i>	Componente para calcular o conforto adaptativo a partir das entradas dos resultados das simulações.

A Figura 4-12 apresenta o fluxograma do *script* para criação dos elementos de controle solar de forma generativa. O *script* buscou otimizar os seguintes itens:

- Demanda energética total para climatização (ar-condicionado para aquecer e resfriar);
- Aumentar o número de horas de conforto (máximo);
- Aumentar a incidência de iluminação natural dentro de um intervalo de 250 a 3000 lux.

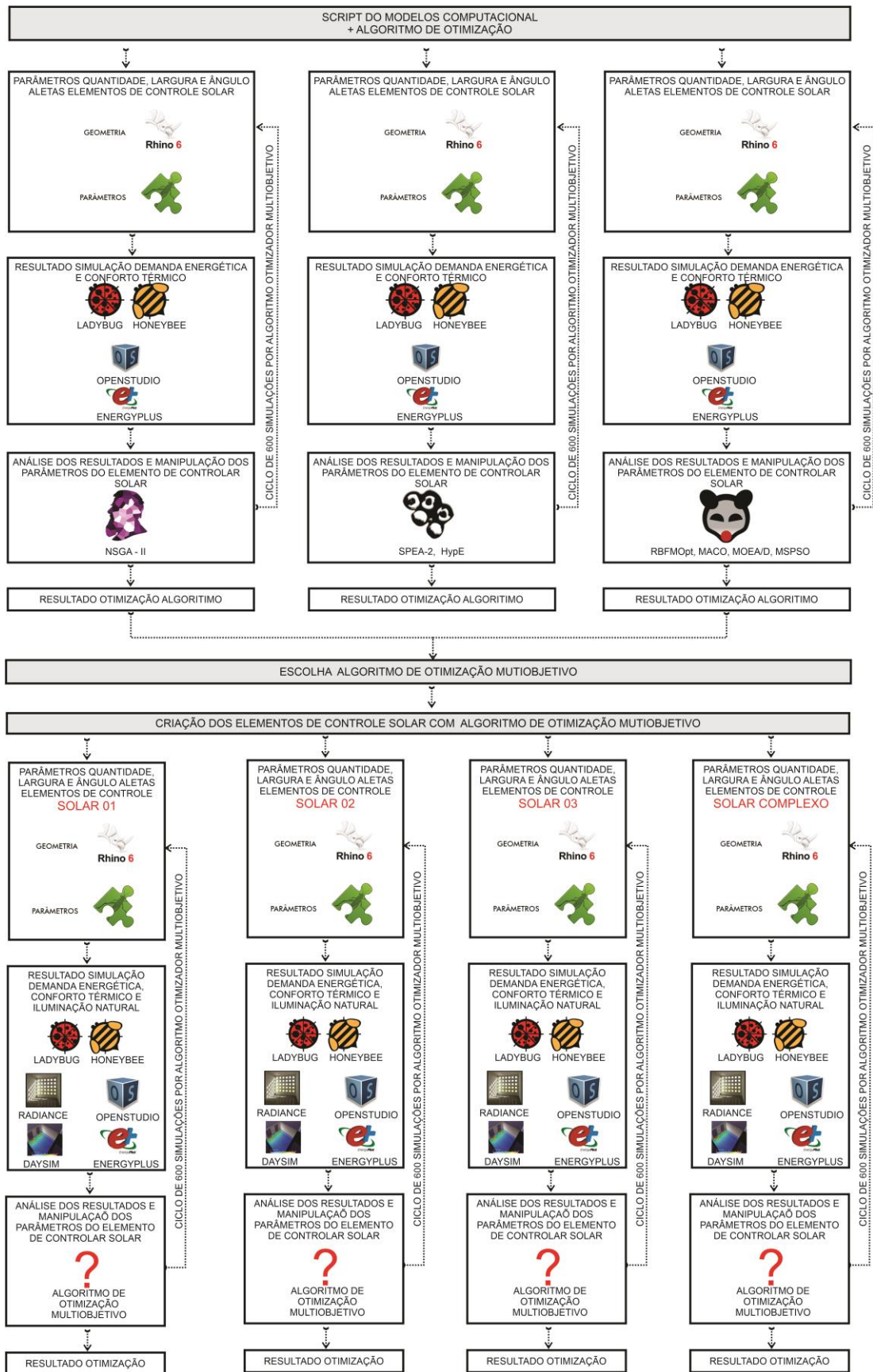


Figura 4-12: Fluxograma do script para criação dos elementos de controle solar de forma generativa.

A avaliação do algoritmo criado será feita de acordo com os seguintes critérios: usabilidade, compatibilidade ou interoperabilidade com outros programas, alcance de resultados ótimos comparado aos seus similares.

4.1.10 Elementos de Controle Solar Utilizados nas Simulações

As possibilidades de tipologias e modelos de elementos de controle solar na arquitetura são infinitas, pois seus componentes são sensíveis a escolha de materiais, largura, forma e ângulo das aletas, além dos demais aspectos que estão intrinsicamente relacionados a criatividade do projetista. Desta forma, se fez necessária uma metodologia para seleção das tipologias, orientação e características das aletas utilizadas no trabalho. Estas foram definidas na seguinte ordem:

1. Tipologia: Pesquisa bibliográfica sistematizada da literatura, e, análise das tipologias mais utilizadas no Brasil em site de referência da área de arquitetura;
2. Dimensionamento das aletas: Definição do fator de visibilidade do usuário do interior ao exterior.

Para se alcançar resultados de caráter científico na pesquisa bibliográfica, foi utilizada uma metodologia de pesquisa de revisão sistemática da literatura. Ela ocorreu pela definição do objetivo da pesquisa com a seleção de tópicos relacionados com os objetivos; estabelecimento de critérios de inclusão e exclusão de material bibliográfico; definição das fontes de informação, estratégia de busca nas fontes de informação e formulação de métodos de avaliação dos resultados obtidos na pesquisa.

Os termos pesquisados foram: Elemento de Controle Solar, Fachada, Energia e Conforto Térmico. Os critérios de exclusão foram feitos por meio de filtros, sendo selecionados artigos somente em idioma inglês (Sendo assim, com a tradução dos termos: *Solar shading device, façade, energy, thermal comfort*), publicados entre 2007 a 2018 na base de dados da *Science Direct*.

Na análise das tipologias de elementos de controle solar utilizados no Brasil optou-se pelo site ArchDaily, que tem grande representatividade nas publicações de projetos arquitetônicos no Brasil. Para revisão foi utilizado filtros por tipologia “Arquitetura Residencial” no “Brasil”, no intervalo de 2010 a 2019.

Após a análise da pesquisa bibliográfica foram escolhidos os 3 tipos de elementos de controle solar mais utilizados em aberturas de janelas e portas, além de um elemento com geometria complexa, de forma a verificar o potencial de eficiência do mesmo frente a elementos tradicionais.

Os limites máximos da quantidade, ângulo e largura das aletas foram definidos de acordo com o fator de visibilidade do usuário, que inclui a avaliação do tamanho (ângulo de visão), conteúdo e potencial de ofuscamento conforme proposta por Heschong e Mahone (2003). Essa metodologia é adotada também como critério extra na Certificação LEED que garante a visibilidade adequada para o exterior, sendo o fator mínimo 3 e o máximo 5.

A metodologia de fator de visão determina que o campo de visão do observador é de 60° na vertical e 60° na horizontal em uma altura média de 1,00 a 1,30m (Figura 4-13). Os fatores de visão da área externa são classificados de 1 a 5, sendo 5 todo o campo de visão do observador, no fator 4 a vista externa corresponde à metade do campo de visão, o fator 3 representa $\frac{1}{4}$, o fator 2 representa $\frac{1}{8}$ e o fator 1 corresponde a $\frac{1}{16}$ do campo de visão total.

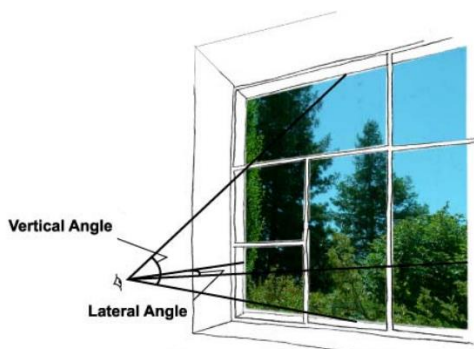


Figura 4-13: Ângulo de visão do observador.
Fonte: (HESCHONG e MAHONE, 2003)

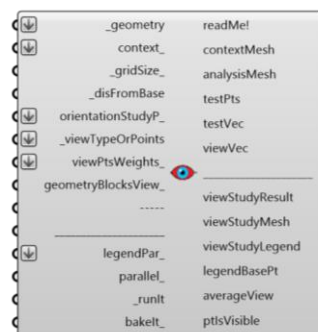


Figura 4-14: Componente View Analysis.
Fonte: (LADYBUG, 2019)

O fator de visão utilizado para determinar os limites dos elementos de controle solar foi o **fator 4**, sendo o intermediário entre o fator máximo da Certificação LEED (fator 5) e o fator mínimo (fator 3). Este foi calculado por meio do uso do componente do programa *Ladybug* (Figura 4-14) e calibrado conforme indicado por Heschong e Mahone (2003).

Devido à infinidade de soluções possíveis para a criação de elementos de controle solar com *design* generativo, decidiu-se adotar para o estudo as orientações solares mais críticas (fachadas oeste e norte) para latitude e clima de Foz do Iguaçu, e aproveitar a oportunidade para analisar o comportamento dos elementos mais utilizados para tais orientações solares.

As características dos elementos de controle solar analisados e alteradas no presente estudo são apresentadas de forma resumida na Tabela 4-7. Os mesmos foram selecionados conforme o fator de visibilidade e serão apresentados com maior detalhamento nos resultados.

Tabela 4-7: Características resumidas dos elementos de controle solar analisados.

Elemento de controle solar	Condicionantes
Treliças e grelhas	Dimensão (altura, largura) e geometria dos vãos ou área de permeabilidade do ar e luz solar.
Venezianas / Persianas	Quantidade, dimensão (largura, comprimento) e ângulos das aletas. Instalação interna ou externa.
Voronoi	Quantidade de orifícios, largura e ângulo das aletas.

4.1.11 Análise dos Dados

Para uma comparação mais completa sobre o uso do algoritmo genético frente a todas as possibilidades da criação do elemento de controle solar, foi selecionado um elemento que apresentasse menor custo computacional para análise (considera a quantidade de recursos utilizados e a quantidade de tempo para execução da simulação computacional). O elemento escolhido para a análise foi a veneziana vertical orientada ao norte, que em todas as possibilidades, considerando o intervalo de parâmetros escolhidos na pesquisa representou 2310 simulações.

As análises foram separadas na seguinte ordem:

- Elementos de controle solar orientados para norte: veneziana vertical, veneziana horizontal, treliça e elemento complexo Voronoi;
- Elementos de controle solar orientados para oeste: veneziana vertical, veneziana horizontal, treliça e elemento complexo Voronoi;
- Veneziana vertical otimizada *versus* todas as possibilidades parametrizadas.

Para organizar os resultados, esses foram organizados em tabelas de forma a deixar claro após análise, quais elementos de controle solar gerados pelo algoritmo tiveram desempenho superior e inferior em termos de demanda energética de climatização, conforto térmico e iluminação natural. Dentre as características dos elementos de controle solar apresentadas estão: a largura das aletas, a quantidade de aletas e qual o grau de inclinação das mesmas. Nos resultados foi possível também obter a visualização dos melhores resultados por categoria conforme a legenda.

Após a apresentação dos melhores resultados, considerando consumo energético, desempenho térmico e iluminação, é possível visualizar o elemento criado pelo algoritmo que obteve o melhor desempenho para todos os objetivos, por meio da otimização Frente de Pareto ou *Pareto Front*, tanto em formato de tabela quanto gráfico. No gráfico são apresentados os resultados de todas as simulações em linhas finas e os melhores resultados em linhas espessas numeradas que fazem correlação com os resultados da tabela, conforme Figura 4-15.

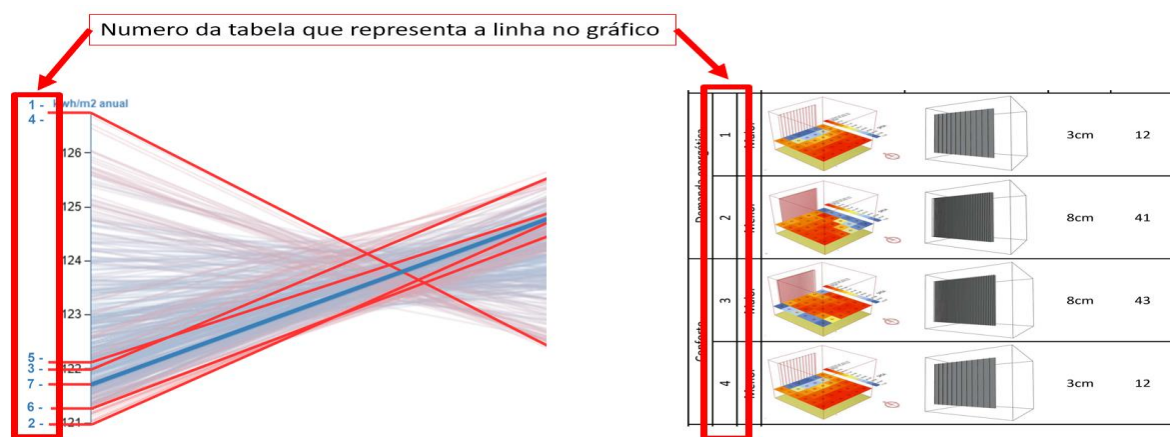


Figura 4-15: Item que se repete na tabela e gráfico das análises.

A diferença entre se utilizar um algoritmo multiobjetivo ao invés de um mono-objetivo para o desenvolvimento de projetos generativos é o fato de que o mono-objetivo buscará o melhor desempenho e eficiência de somente um objetivo de otimização, desconsiderando os demais requisitos de desempenho de um edifício. Já o multiobjetivo buscará um equilíbrio entre todos os objetivos, sofrendo conseqüentemente perdas de desempenho em alguns objetivos para o favorecimento conjunto dos objetivos para os quais se pretende avaliar o desempenho. Dessa forma, foi analisado o percentual de perda nos objetivos dos elementos de controle solar selecionados pelo *Pareto Front*, bem como seus ganhos comparados a célula de referência.

A pesquisa proporcionou grande quantidade de resultados, o que possibilitou verificar através de métodos estatísticos a correlação das variáveis de elementos de controle solar com os resultados de eficiência energética, conforto térmico e iluminação natural. Para análise de correlação entre duas variáveis, é utilizado o método de regressão linear simples, que analisa a intensidade, o grau de relacionamento e a direção linear entre as variáveis estudadas através do coeficiente de correlação. Quando se tem acima de duas variáveis para analisar a correlação, o método utilizado é o de correlação

linear múltipla, que analisa a intensidade, o grau de relacionamento e a direção linear através do coeficiente de correlação para múltiplas variáveis que foi utilizado no presente estudo.

Para os cálculos estatísticos foi utilizado o programa computacional IBM SPSS. Os resultados fornecidos pelo programa foram avaliados na seguinte sequência:

- **Teste F de significância global:** Se o valor for menor que 0,05 (*value-p* < 0,05), o modelo apresenta pelo menos uma variável dependente, esta está correlacionada as variáveis independentes; caso o valor for superior, o modelo estatístico de regressão linear múltipla deve ser descartado;
- **Teste de significância individual:** Se o valor for menor que 0,05 (*value-p* < 0,05) para todas as variáveis dependentes, estas estão correlacionadas às variáveis independentes; caso o valor for superior, o modelo estatístico de regressão linear múltipla deve ser descartado;
- **Grau de correlação ajustado representado pelo R²:** Se os valores do teste de significância global e significância individual validarem o modelo, é possível verificar no resultado do R², o percentual que as variáveis dependentes representam dos valores das variáveis independentes (valores da demanda energética, percentual de conforto térmico e percentual de iluminação natural).

Após as análises dos resultados que validam o modelo de regressão linear múltipla, o programa fornece os coeficientes angulares das variáveis que explicam o comportamento de correlação entre as variáveis independentes com as variáveis dependentes.

A equação da regressão linear múltipla é:

$$y = \alpha + \beta_1.X_1 + \beta_2.X_2 + \beta_3.X_3 + \{...\}$$

Onde:

Y: é a variável dependente (largura, quantidade e angula das aletas) ou regressando;

X: é a variável independente (Valores de demanda energética, % de conforto térmico e % de iluminação natural) ou regressor;

α : é o intercepto ou constante do modelo;

β : é o coeficiente angular do modelo.

5. RESULTADOS

5.1 PROJETOS RECENTES COM UTILIZAÇÃO DE ELEMENTOS DE CONTROLE SOLAR

5.1.1 Resultados da Pesquisa Bibliográfica

O Apêndice 02 apresenta os resultados da análise de 37 artigos, somente em idioma inglês, publicados na base de dados da *Science Direct*, sobre elementos de controle solar entre 2007 a 2018.

Observa-se que três dentre os 37 artigos fizeram uso de algoritmos generativos para o desenvolvimento e criação de elementos de controle solar, o que indica que a aplicação para essa finalidade ainda está se iniciando.

Com base nos dados coletados, foi possível realizar o levantamento dos elementos de controle solar em pesquisas (Figura 5-1), o número de publicações entre os anos 2007 e 2018 (Figura 5-2), os programas de simulações computacionais mais utilizados (Figura 5-3).

Observa-se na Figura 5-1, que os elementos de maior utilização nos artigos são as venezianas, *brise-soleil*, persianas e elementos perfurados. Por meio de uma análise qualitativa, observou-se que as escolhas dos elementos de controle solar definidos nas pesquisas foram limitadas pela cultura do usuário, viabilidade de implantação e modelagem da geometria pelo programa computacional de simulação.

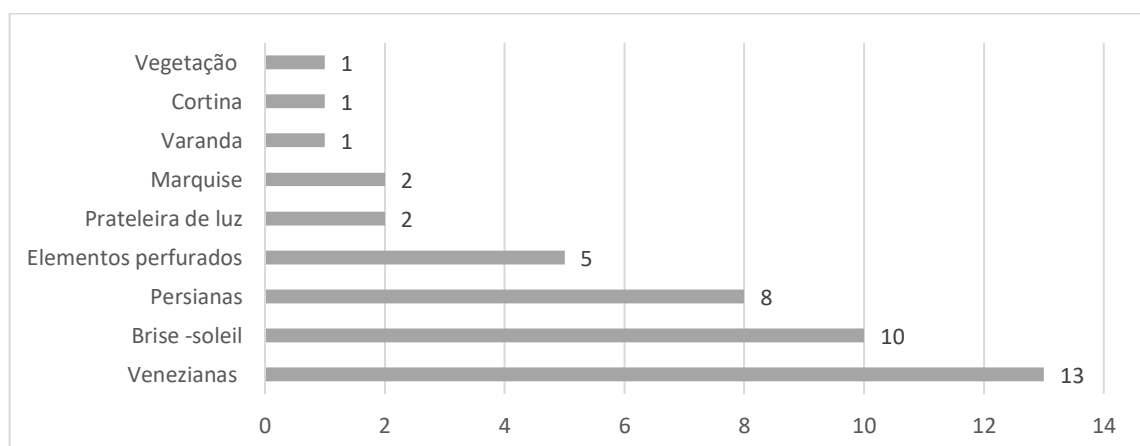


Figura 5-1: Elementos de controle solar utilizados nos artigos.

Na Figura 5-2 é possível analisar que houve um crescimento exponencial de publicações científicas de elementos de controle solar no ano de 2017, este item pode ser associado ao aumento de interesse do alcance de eficiência energética através do uso de estratégias passivas de projetos bioclimáticos.

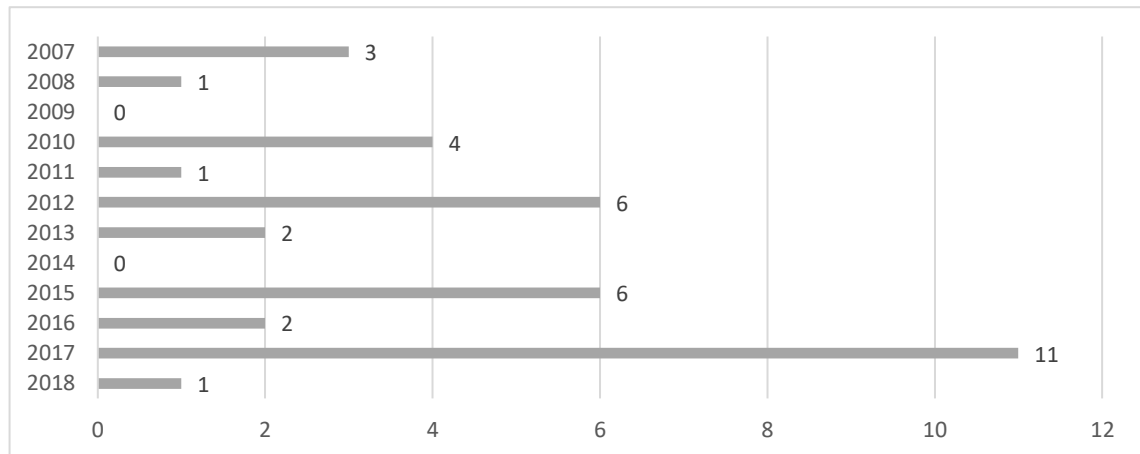


Figura 5-2: Numero de publicações de 2007 a 2018.

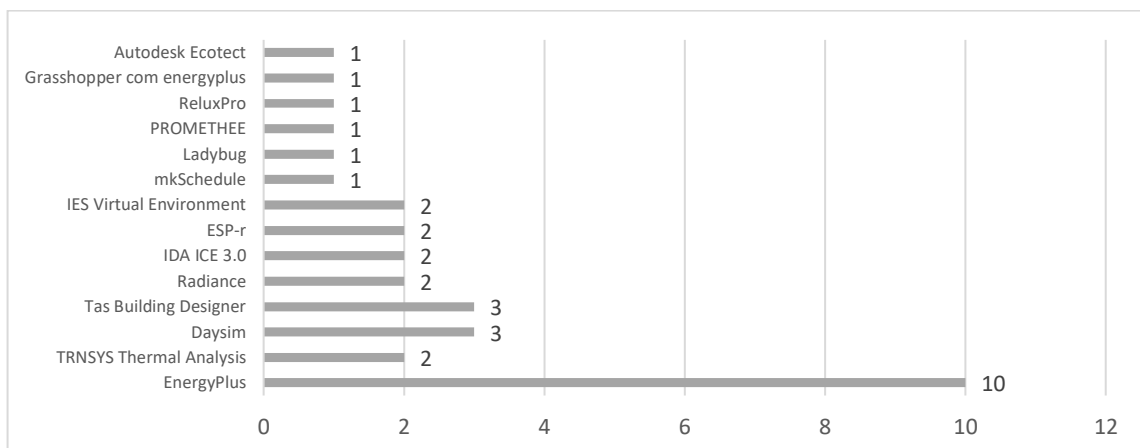


Figura 5-3: Programas utilizados para simulação computacional de conforto e eficiência energética.

O maior número de pesquisas sobre o tema é de países que apresentam climas quentes no verão, mas a pesquisa também demonstrou resultados quando elementos de controle solar são utilizados em climas frios. Tzempelikos, Bessoudo, et Al. (2010), afirmou que através do uso de elementos de controle solar em um edifício de escritórios em Montreal no Canadá, foi possível eliminar a necessidade de aquecimento mecânico durante o inverno sem gerar desconforto no verão, o mesmo afirma que independente do sistema de envidraçamento os elementos de controle solar demonstram eficácia na redução do consumo de energia e aumento do conforto ambiental.

5.1.2 Projetos Recentes que Fazem o Uso de Elementos de Controle Solar

De forma a verificar quais os elementos de controle solar mais utilizados atualmente em projetos de arquitetura para serem estudados, foi realizada uma pesquisa no site ArchDaily⁹. Para a pesquisa dos projetos foram utilizados filtros por tipologia, que incluíram os termos “Arquitetura Residencial” e “Brasil”, tendo como resultado 560 artigos do ano de 2010 até 2019. Foram analisadas todas as imagens, plantas e cortes dos projetos, com objetivo de identificar a presença e características dos elementos de controle solar presentes nas fachadas.

Após tabulação dos dados pode-se observar que dos 560 edifícios, 393 (70%) utilizaram elementos de controle solar (Figura 5-4), sendo que os elementos mais utilizados em fachadas foram as varandas (44%), pérgolas (33%), beirais (32%) e brises verticais (24%), e os mais utilizados em janelas foram as venezianas verticais, horizontais (37%) e treliças (13%).

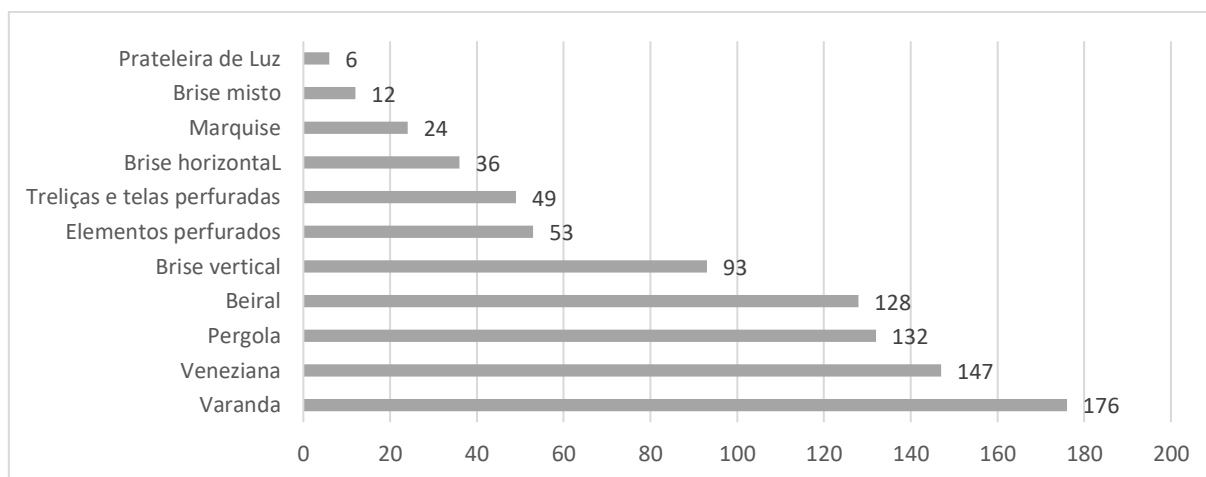


Figura 5-4: Elementos de controle solar utilizados nos edifícios analisados na revista eletrônica ArchDaily.

O site *ArchDaily* exerce um papel relevante na divulgação da arquitetura no Brasil e no mundo e foi observado que 70% dos projetos de residências brasileiras publicados se utilizam de elementos de controle solar, o que justifica a necessidade de estudo sobre a aplicação dos mesmos na arquitetura e a sua relação com o desempenho térmico e eficiência energética.

Para o estudo de desenvolvimento de elementos de controle solar através do *design* generativo optou-se pelas tipologias de veneziana vertical e horizontal e a treliça, devido ao seu uso representativo observado durante a pesquisa bibliográfica. Optou-se também pelo estudo de um

⁹ <https://www.archdaily.com.br/br>

elemento de geometria complexa ao se observar que a pesquisa bibliográfica demonstrou que os mesmos serão explorados com maior frequência na arquitetura, conforme o aumento do uso de novas tecnologias na construção civil. Esse elemento complexo foi estudado por meio do diagrama de Voronoi, que funciona por decomposição de um dado espaço e apresenta grande fluidez e capacidade de adaptabilidade das aletas.

5.2 DETERMINAÇÃO DO FATOR DE VISIBILIDADE

Após a definição dos elementos de controle solar a serem utilizados na pesquisa, a célula foi modelada no programa *Rhinceros* e os elementos de controle solar foram criados utilizando a ferramenta de programação visual *Grasshopper*. Dessa forma foi possível criar o *script* para análise do limite das aletas dos elementos de controle solar (Figura 5-5).

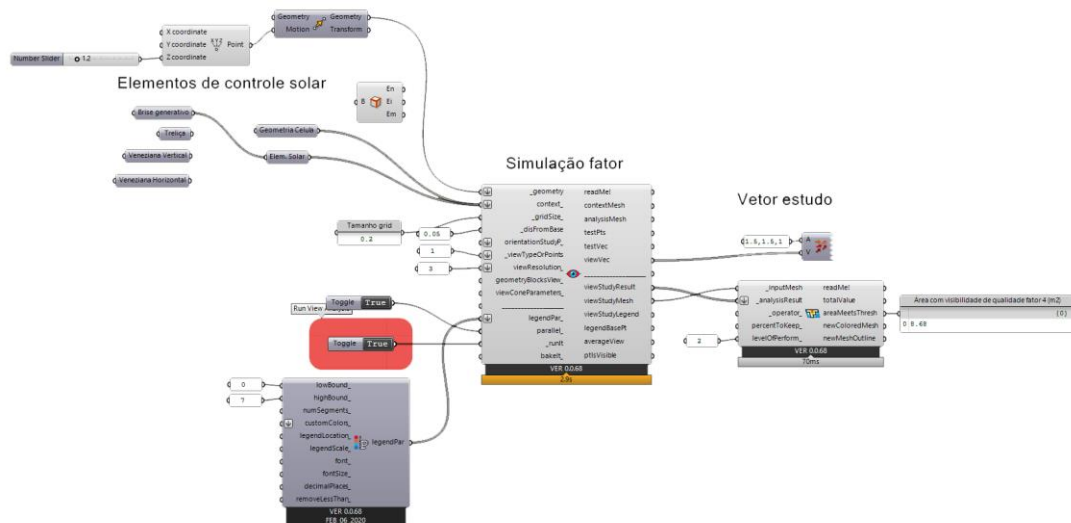


Figura 5-5: Script análise do fator de visibilidade.

As análises foram feitas buscando considerar o pior cenário do uso dos elementos, assim, houve a alteração da quantidade, número e ângulo de inclinação (intervalo de 15° a 45°) das aletas, até serem obtidas características que proporcionassem uma área do elemento que correspondesse a no mínimo 60% da área de piso, com visibilidade externa com fator 4, segundo método utilizado na certificação LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*) V4, que se

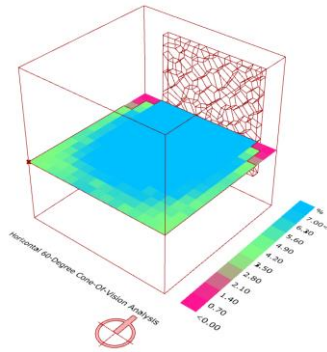
baseia no Relatório Técnico da *California Energy Commission* (HESCHONG e MAHONE, 2003). Observou-se que o ângulo das aletas afetava consideravelmente o nível de visibilidade, e foi estipulado que este não poderia ultrapassar 25° para se alcançar um intervalo adequado e viável de execução na prática, em termos de quantidade e largura de aletas.

Na Tabela 5-1 são apresentados os resultados dos limites dos elementos do pior cenário de visibilidade aceitado na pesquisa. Um fator regulador da visibilidade também poderá ocorrer, quando o algoritmo for acionado para otimizar a iluminação natural durante todas as horas do ano.

Tabela 5-1: Limites aletas elementos de controle solar.

	Imagem resultado limite do fator de visibilidade 4 (azul e verde)	Percentual mínimo de área da célula com fator de visibilidade 4	Limites das aletas
Veneziana Vertical		Veneziana com 45 aletas, 8 cm cada aleta, 25° de inclinação: 71% da área com fator de visibilidade 4.	Largura aletas: 3 a 8 cm Quantidade aletas: 10 a 45 Ângulo aletas: 0° a 25° para direita e esquerda.
Veneziana Horizontal		Veneziana com 45 aletas, 8cm cada aleta, 25° de inclinação: 76% da área com fator de visibilidade 4.	Largura aletas: 3 a 8 cm Quantidade aletas: 10 a 45 Ângulo aletas: 0° a 25° para baixo.
Treliça		Treliça com 60 aletas, 7cm cada aleta sem inclinação: 66% da área com fator de visibilidade 4.	Largura aletas: 2 a 7 cm Quantidade aletas: 30 a 60 na vertical e horizontal. Ângulo aletas: 0°

Elemento complexo Voronoi



Elemento complexo com 80 orifícios, 15 cm cada aleta sem inclinação: 96% da área com fator de visibilidade 4. Largura aletas: 5 a 15 cm. Quantidade orifícios: 40 a 80 Ângulo aletas: 0° Diversidade decomposição: 1 a 10.

5.3 CRIAÇÃO DO *SCRIPT* COM PLATAFORMA DE PROGRAMAÇÃO VISUAL *GRASSHOPPER*

O *script* foi estruturado de forma que todos os parâmetros dos elementos de controle solar, calibragem do modelo computacional de consumo de energia total e iluminação natural pudessem ser alterados no *Grasshopper* conforme Figura 5-6 e Apêndice 03.

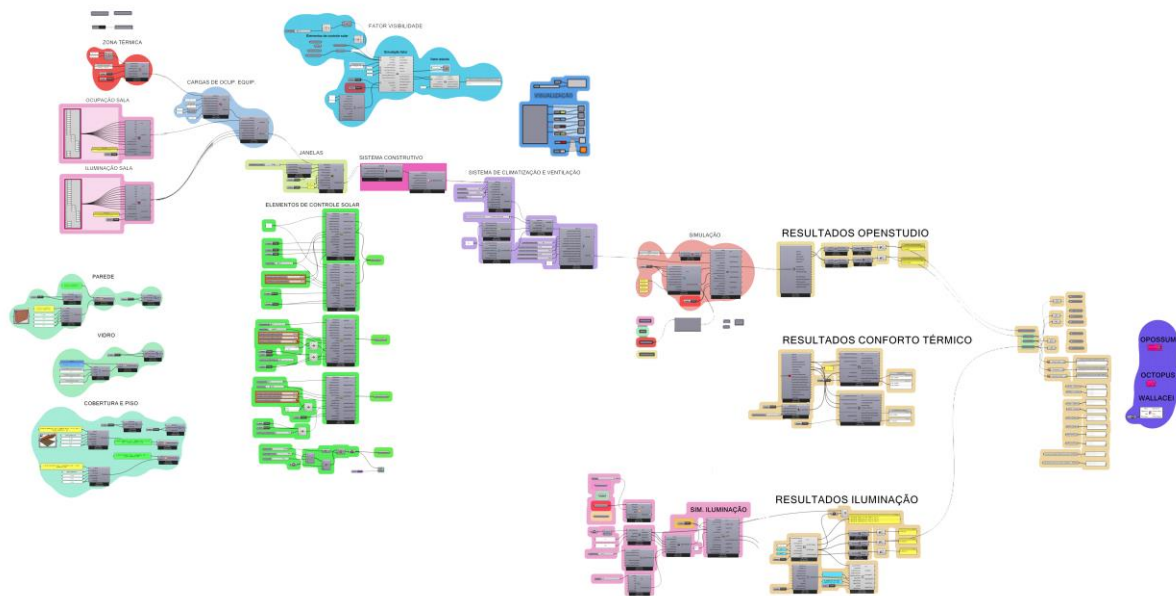


Figura 5-6: Itens considerados e complexidade das variáveis do *script* criado para desenvolvimento de elementos de controle solar através de projeto generativo.

O *script* foi organizado em criação da zona térmica, definição de carga e ocupação dos equipamentos, escalas de ocupação e iluminação dos ambientes, caracterização física dos materiais de vedação, geometrias dos elementos de controle solar, configuração do sistema de climatização e

ventilação, programas que conectam o modelo computacional com os motores de simulação e leitura dos resultados de consumo energético, conforto térmico adaptativo e iluminação natural.

Todos os parâmetros podem ser alterados no *script* embora, aqueles utilizados para a realização da pesquisa estejam relacionados à geometria dos elementos de controle solar.

5.4 ALGORITMOS DE OTIMIZAÇÃO E PROGRAMAS

Para determinar qual programas computacionais e algoritmo de otimização seria o mais indicado no uso de projeto generativo de elementos de controle solar, foi realizado um teste de desempenho para otimizar uma veneziana vertical orientada ao Norte, em prol do melhor desempenho energético e conforto térmico. No total foram feitas 4200 simulações, sendo 600 simulações por algoritmo de otimização multiobjetivo (SPEA-2, NSGA-II, HYPE, RBFMOpt, MACO, NSPSO e MOEA/D).

Os programas testados durante o trabalho apresentaram desempenho diferente nos aspectos de interface, análise de dados, estabilidade dentro do conjunto *Windows, Rhinoceros, Grasshopper, Honeybee, Openstudio, Energyplus*.

A interface do *Octopus* é versátil para configuração do usuário e visualização dos resultados, e possibilitou configurar as taxas de mutação e escolha de tipo de análise do algoritmo conforme Figura 5-7.

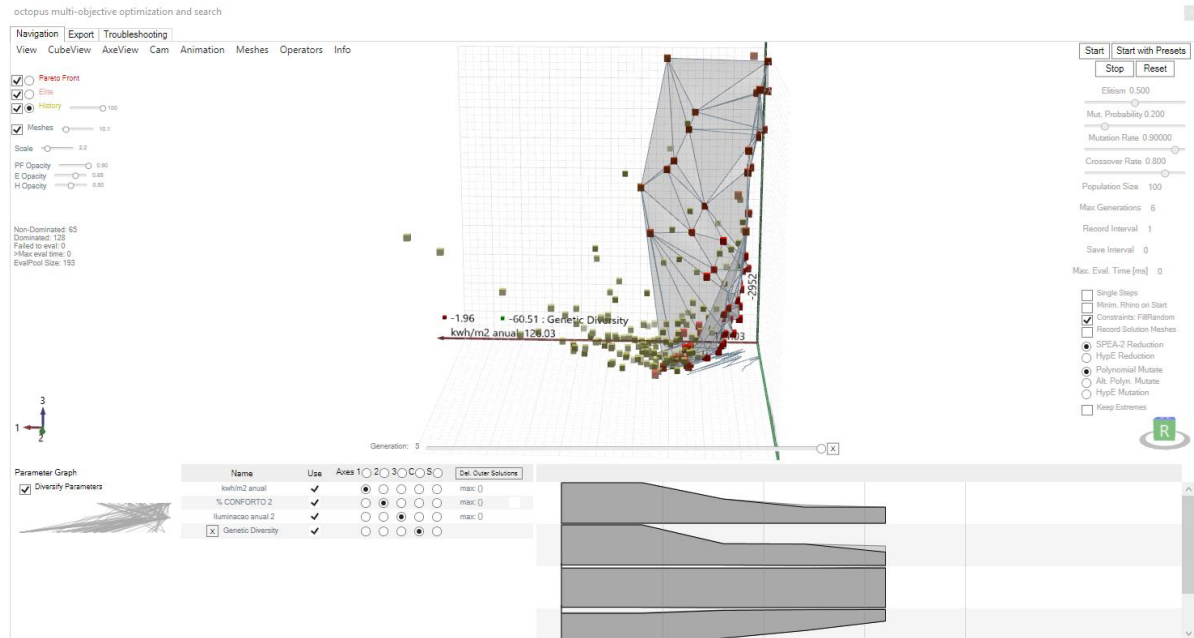


Figura 5-7: Interface Octopus.

Para análise dos resultados, o programa gerou um gráfico tridimensional com todas as simulações e possibilitou exportar os resultados para análise em outras plataformas. O *Octopus* apresentou uma vantagem em relação aos demais programas em termos de estabilidade, nas simulações computacionais de demanda energética. É normal que após uma quantidade excessiva de simulações, o *Windows* e os demais programas CAD apresentem instabilidade, resultando em travamento do sistema e necessidade de reiniciá-lo. Após a queda do sistema é necessário reiniciar o processo novamente em conjunto com os demais programas. Já o *Octopus* disponibilizou um salvamento automático da otimização feita pelo algoritmo multiobjetivo, possibilitado continuar a otimização a partir do último salvamento.

O *Walacei X*, apresentou uma interface interativa, mais amigável e visual que o *Octopus*. A vantagem dele frente aos demais está na análise dos resultados com uma gama de possibilidade maior, facilitando filtrar os resultados e analisá-los em formato de gráficos (Figura 5-8). Foi possível após a análise dos resultados, reproduzir o modelo tridimensional destes, e a exportação dos dados para análise em outras plataformas.



Figura 5-8: Interface de análise dos dados do programa *Wallacei X*.

O *Opossum* foi o programa testado de mais fácil utilização. Composto por apenas três abas, com as configurações dos algoritmos já prontas. Apresentou opções de maximizar e minimizar os objetivos, diferente dos demais que permitiram somente minimizar o objetivo como método padrão, e quando foi preciso maximizar houve a necessidade de converter os resultados para números negativos. O *Opossum* disponibilizou vários algoritmos de otimização multiobjetivos (NSGA-II, RBFMOpt, MACO, MOEA/D), que se mostraram eficientes para alcançar resultados ótimos, como o RBFMOpt, que obteve os melhores resultados de otimização no teste com 600 simulações comparado aos demais algoritmos (Figura 5-9 e Figura 5-10). Porém, o programa não permitiu a análise dos dados no próprio programa, disponibilizando somente a leitura dos resultados e possibilidade de exportação dos dados para análise em outra plataforma. O programa mostrou

estabilidade com o uso dos algoritmos RBFMOpt e instabilidade no uso dos demais, sendo o RBFMOpt o único que não apresentou problemas durante a execução das 600 simulações.

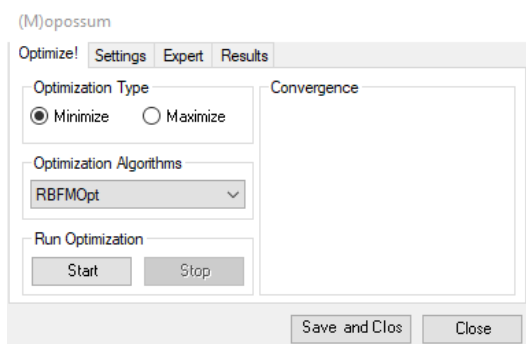


Figura 5-9: Interface Opossum.

Hypervolume	Objective 1	Objective 2	Parameters
0.936	121.087	-32.249	0.075553,44.92591,2.37421
0.936	121.087	-32.249	0.076729,44.835417,2.3821
0.936	121.087	-32.249	0.077852,44.560326,2.2831
0.936	121.087	-32.249	0.078412,44.744698,2.2124
0.936	121.087	-32.249	0.076821,44.83536,2.16022

Figura 5-10: Janela Resultados Opossum.

Como análise geral, cada programa tem suas vantagens e desvantagens para otimização de desempenho energético de edifícios, sendo o *Opossum* a melhor opção para quem não tem conhecimento sobre algoritmos genéticos e pretende ter acesso a bons algoritmos de otimização sem precisar configurá-los. Já o *Octopus* se apresentou como a melhor opção para quem pretende fazer estudos com maior variação de parâmetros e necessitem de estabilidade do sistema e segurança no salvamento automático dos dados, com conhecimento prévio de configuração de algoritmos genéticos, e, por fim o *Wallacei X*, se mostrou o melhor programa para estudos com menor número de simulações e análise dos dados na mesma plataforma, com conhecimento prévio de algoritmos genéticos.

O desempenho dos algoritmos de otimização foi classificado entre maior, intermediário e menor sendo, o maior aquele que alcançou resultados ótimos com a menor quantidade de simulações, o intermediário o que alcançou resultados ótimos com número médio de simulações e o menor, de resultados ótimos com a maior quantidade de simulações.

As **Figura 5-11** e **Figura 5-12** apresentam o desempenho dos algoritmos SPAE-2, NSGA-II, RBFMOpt, HypE, MACO e MOEA/D em 600 simulações, de forma a observar o processo de otimização do elemento de controle solar de forma a alcançar simultaneamente desempenho energético e conforto térmico na célula do estudo. Na **Figura 5-11** é possível analisar a quantidade de simulações, comparando os resultados de otimização de demanda energética para climatização e conforto térmico.

Os resultados demonstraram que o NSGA-II foi o algoritmo que alcançou os melhores desempenhos em 200 a 400 simulações para conforto térmico e demanda energética, além de alcançar resultados ótimos em apenas 100 simulações. Para otimizações com poucas simulações, o NSGA-II apresentou melhor eficácia.

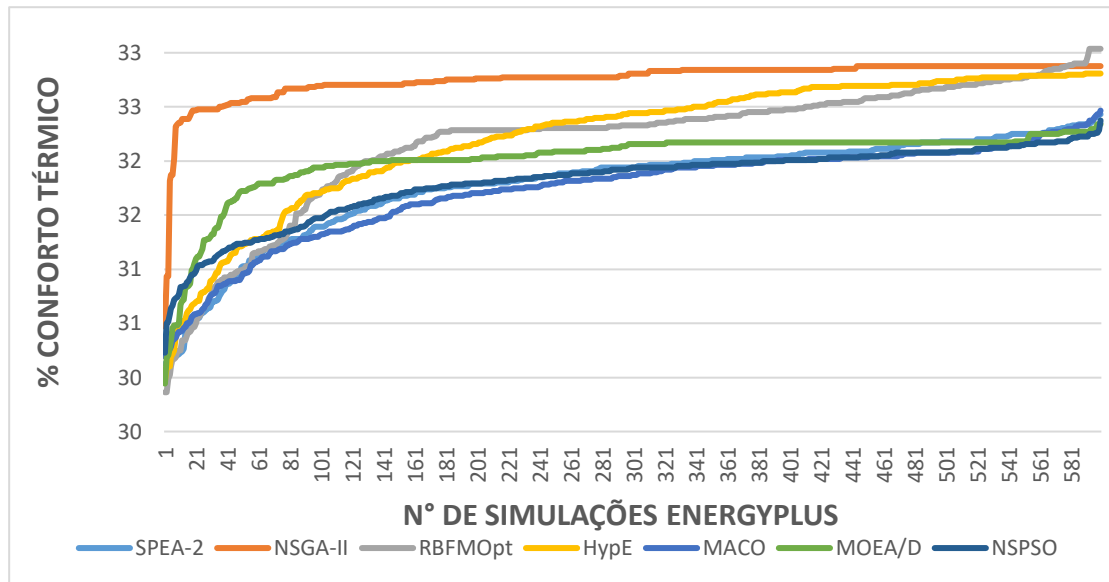


Figura 5-11: Gráfico do desempenho dos algoritmos de otimização para conforto térmico.

Os algoritmos HypE e RBFMOpt demonstraram que sua curva de simulações para otimização é maior quando comparada ao NSGA-II, porém, com 600 simulações apresentaram resultados similares e até superiores ao NSGA-II. O algoritmo que apresentou menor desempenho foi o MACO para otimização da demanda energética com resultados inferiores aos demais algoritmos.

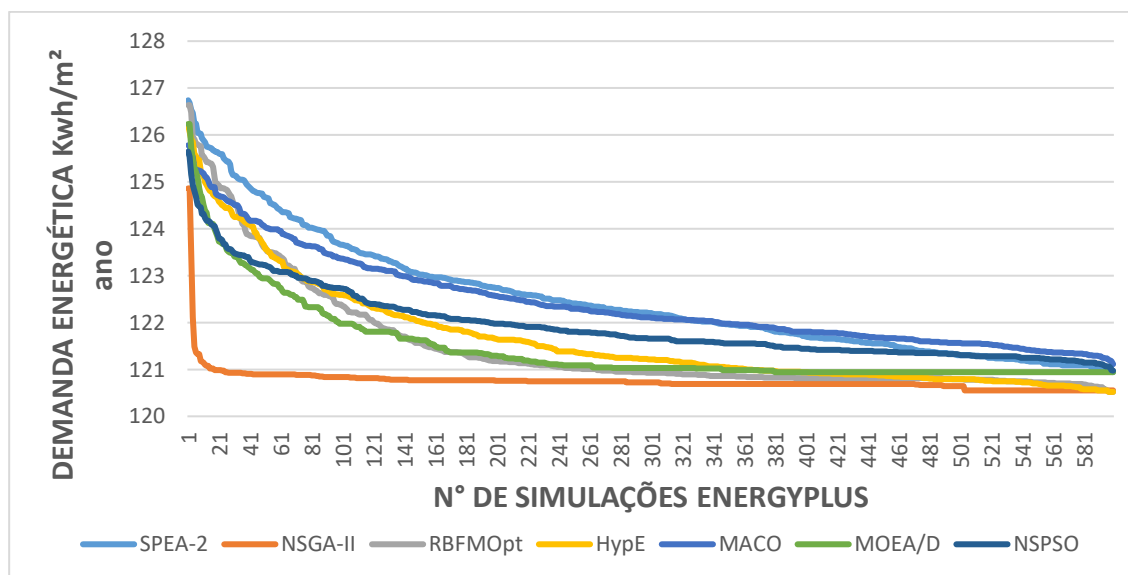


Figura 5-12: Gráfico do desempenho dos algoritmos de otimização para demanda energética.

O MOEA/D demonstrou desempenho intermediário até 150 simulações, e após 150 uma curva baixa de otimização. Já o SPEA-2 demonstrou um desempenho inferior ao NSGA-II, RBFMOpt e o HypE e melhor do que o MACO e MOEA/D para o total de 600 simulações.

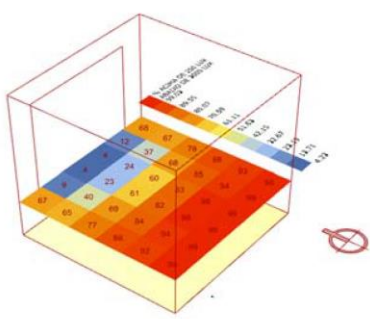
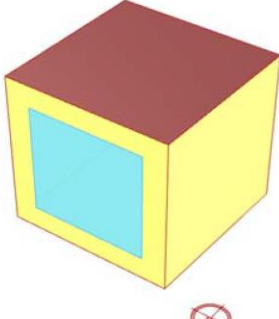
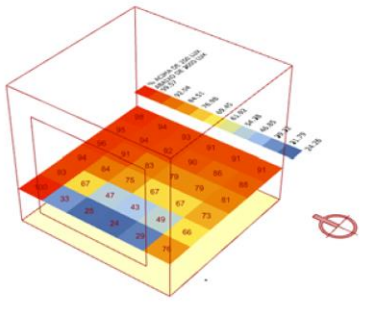
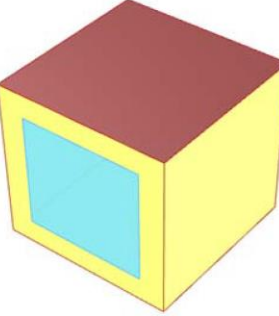
Levando em consideração todos os aspectos de desempenho dos programas e algoritmos de otimização analisados no estudo, o *Octopus* com uso do algoritmo SPEA-2 foi o que apresentou melhor estabilidade e segurança para um número maior de simulações.

5.5 OTIMIZAÇÕES

Foram feitas as simulações do consumo energético e conforto térmico da célula de referência orientada a norte e oeste, sem elementos de controle solar. Após a execução das simulações, o código permitiu filtrar e extrair os valores desejados (Tabela 5-2).

A célula de referência apresentou uma demanda energética para climatização de 127,78Kwh/m².ano com a janela orientada a norte e 132,76Kwh/m².a com a janela orientada a oeste. O percentual das horas do ano em conforto sem climatização artificial foi de 29,40% com abertura orientada ao Norte e de 28,50% com abertura orientada ao Oeste.

Tabela 5-2: Resultados das simulações da célula referência.

Edificação de Referência - Resultado simulação						
	Resultado simulação	Imagem Celula de Referência	Demanda energética Kwh/m²	% Conforto térmico	% 250 a 3000 lux	
Demanda energética	Norte			127,78	29,406	69,56
	Oeste			132,76	28,504	75,67

Após o estudo da célula, foram feitas as otimizações da veneziana vertical, veneziana horizontal, treliça e do elemento de controle solar complexo (voronoi), para orientação norte e oeste. Cada ciclo de otimização foi programado para simular até 600 opções. No total foram executadas 8 vezes de 600 simulações, totalizando 4800, uma para cada elemento com duas orientações diferentes.

5.5.1 Veneziana Vertical - Orientação Norte

Os melhores resultados da veneziana vertical orientada a norte indicaram uma diminuição de 5,33% na demanda energética, 10,29% de aumento nas horas de conforto e 17,32% nas condições de iluminação natural comparada a célula de referência, sem elemento de controle solar. Já a veneziana que melhor atendeu aos três objetivos, selecionada através do *Pareto Front* apresentou diminuição de 4,75% na demanda energética, 8,93% nas horas de conforto e 17,32% na iluminação natural quando comparada a célula de referência sem elemento de controle solar.

Na Tabela 5-3 e Figura 5-13, é possível analisar que os resultados da veneziana vertical selecionada através do *Pareto Front* se aproximam dos melhores resultados individuais de cada item (eficiência energética, conforto térmico e iluminação natural). Porém, observa-se que ocorre redução nos resultados, quando se compara os melhores resultados individuais com os resultados do *Pareto Front*.

Tabela 5-3: Resultados mais relevantes das simulações venezianas verticais norte.

Veneziana vertical norte									
Nº gráfico	Resultado simulação	Imagem elemento de controle solar	Largura aletas veneziana	Quantidade aletas	Angulo oeste/leste	Demanda energética Kwh/m².a	% Conforto térmico	% 250 a 3000 lux	
Eficiência energética	1			3cm	12	25°Oeste	126,739	29,932	71,50
	2			8cm	41	25°Leste	120,974	32,100	66,39
Conforto térmico	3			8cm	43	15°Oeste	121,97	32,432	74,47
	4			3cm	12	25°oeste	126,74	29,932	71,50
Iluminação natural	5			8cm	32	5°Oeste	122,11	32,021	82,31
	6			8cm	38	25°leste	121,28	31,918	66,22
Pareto front	7			7cm	40	0°	121,72	32,032	81,61

Desempenho superior
Desempenho inferior
Desempenho superior global

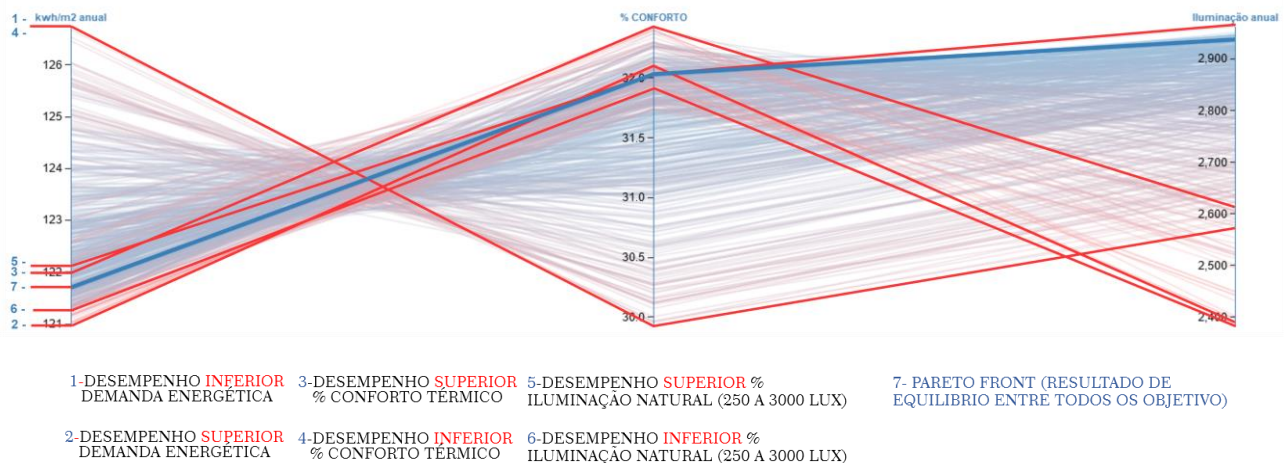


Figura 5-13: Gráfico de todas as simulações (azul) versus melhores resultados e o Pareto Front (vermelho) da veneziana vertical norte.

A análise estatística através do método de regressão linear múltipla apresentou os seguintes resultados:

- O modelo é útil para prever a demanda energética, conforto térmico e iluminação, pois o Valor-P do teste F é menor que 0,05;
- Há evidências estatísticas de que a largura, quantidade e ângulo das aletas estão relacionadas com a demanda energética e conforto térmico pois possuem valor-P menor que 0,05 no teste de significância individual. Já a variável largura para iluminação natural apresentou valor-P maior que 0,05, sendo rejeitada para criar um modelo a partir da regressão linear múltipla;
- A largura e quantidade de aletas são os fatores que influenciam em 95% da demanda energética e conforto térmico da célula, através do resultado do grau de correlação ajustado (R^2);
- Com base numa curva definida pelos resultados da demanda energética e com o apoio do programa IBM SPSS foi possível obter a equação de regressão linear múltipla que melhor representa a demanda energética das venezianas verticais.

$$y = 128,41 - 0,4183.X_1 - 0,0917.X_2 + 0,0369.X_3 \text{ (Equação 1)}$$

- Com base numa curva definida pelos resultados da demanda energética e com o apoio do programa IBM SPSS foi possível obter a equação de regressão linear múltipla que representa tal porcentagem de otimização, proporcionada pela veneziana vertical.

$$y = 28,721 + 0,2134.X_1 + 0,0459.X_2 + 0,0025.X_3 \text{ (Equação 2)}$$

Onde:

y: Demanda Energética em KWh/m² ano;

X₁: Largura das aletas (cm);

X₂: Quantidade de aletas;

X₃: Ângulo de aletas de -25° a +25° (Oeste= n° positivo, Leste= n° negativo).

OBS: Para utilizar a equação é necessário respeitar os limites de largura, quantidade e ângulo das aletas estipulados na pesquisa.

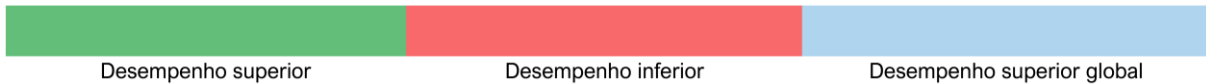
5.5.2 Veneziana horizontal - Orientação Norte

Os melhores resultados da veneziana horizontal orientada a norte apresentaram diminuição de 5,27% na demanda energética, 12,00% de incremento nas horas de conforto anual e 35,45% nas condições de iluminação natural comparada a célula de referência sem elemento de controle solar. Já a veneziana que melhor atendeu aos três objetivos selecionados através do *Pareto Front* apresentou diminuição de 4,78% na demanda energética, 11,22% de incremento nas horas de conforto anual e 23,16% de melhoria nas condições de iluminação natural comparada a célula de referência sem elemento de controle solar.

Através dos resultados na Tabela 5-4 e Figura 5-14, é possível analisar que os resultados da veneziana horizontal selecionada através do *Pareto Front* apresenta um ótimo equilíbrio entre todos os objetivos e seus resultados se aproximam dos melhores resultados individuais, e, perdas de eficiência não ultrapassam 15% em todos os objetivos. Comparada as de melhor desempenho analisadas individualmente, as perdas são de 14,69% na demanda energética, 9,35% no conforto térmico e 9,64% na iluminação natural.

Tabela 5-4: Resultados mais relevantes das simulações venezianas horizontais norte.

Veneziana horizontal norte										
Nº gráfico	Resultado simulação	Imagem elemento de controle solar	Largura aletas veneziana	Quantidade aletas	Ângulo 0° a 25°	Demanda Energética Kwh/m².a	% Conforto térmico	% 250 a 3000 lux		
Eficiência energética	1	Inferior			3cm	21	5°	125,32	30,491	77,50
	2	Superior			8cm	43	25°	121,04	32,934	5,94
Conforto térmico	3	Superior			8cm	41	25°	121,08	32,934	7,08
	4	Inferior			3cm	21	5°	125,32	30,491	77,50
Iluminação natural	5	Superior			5cm	33	10°	122,55	31,655	94,22
	6	Inferior			8cm	42	5°	121,05	32,911	5,50
Pareto front	7	Global			8cm	41	0°	121,67	32,705	85,67



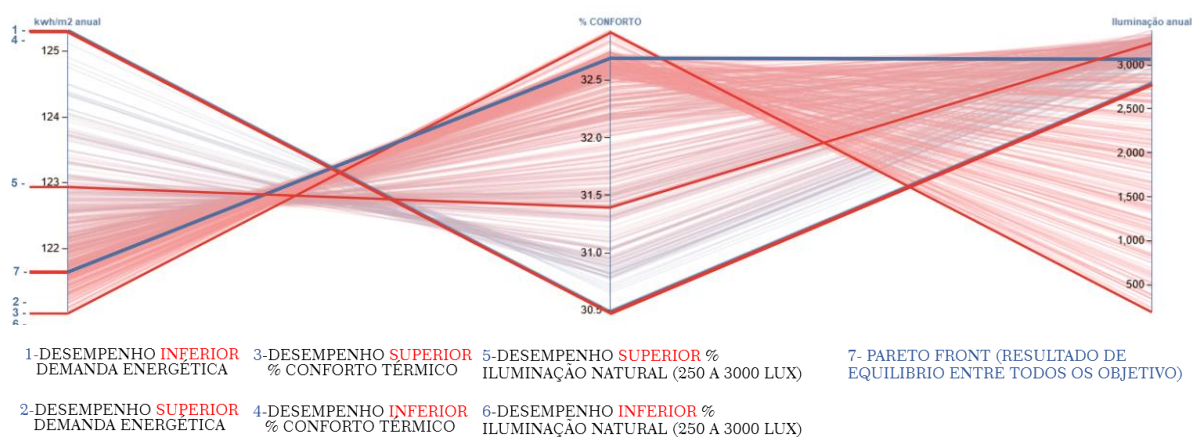


Figura 5-14: Gráfico de todas as simulações (vermelho) versus os melhores resultados e o *Pareto Front* (azul) da veneziana horizontal norte.

A análise estatística realizada através do método de regressão linear múltipla apresentou os seguintes resultados:

- O modelo é útil para prever a demanda energética, pois o Valor-P do teste F é menor que 0,05;
- Há evidências de que a largura, quantidade e ângulo das aletas estão relacionadas com a demanda energética, pois todas possuem valor-P menor que 0,05 no teste de significância individual;
- A largura, quantidade e ângulo das aletas explicam 92% da demanda energética, 92% do conforto térmico e 69% da iluminação natural da célula, através do resultado do grau de correlação ajustado (R^2);
- A equação de regressão linear múltipla que representa a demanda energética da veneziana horizontal é:

$$y = 127,10 - 0,3850.X_1 - 0,0629.X_2 + 0,0309.X_3 \text{ (Equação 3)}$$

- A equação de regressão linear múltipla que representa a porcentagem de conforto térmico da veneziana horizontal é:

$$y = 28,290 + 0,3050.X_1 + 0,0507.X_2 + 0,0175.X_3 \text{ (Equação 4)}$$

- A equação de regressão linear múltipla que representa a porcentagem (%) de iluminação natural de 250 a 3000 lux com veneziana horizontal é:

$$y = 190,728 - 7,2890.X_1 - 1,4650.X_2 - 1,9390.X_3 \text{ (Equação 5)}$$

Onde:

y: Demanda Energética em KWh/m² ano, ou, % de conforto, ou, % de iluminação natural de 250 a 3000 lux;

X₁: Largura das aletas (cm);

X₂: Quantidade de aletas;

X₃: Ângulo de aletas (0 a 25).

OBS: Para utilizar a equação é necessário respeitar os limites de largura, quantidade e ângulo das aletas estipulados na pesquisa.

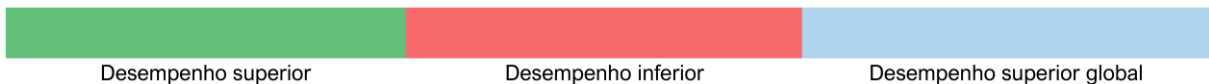
5.5.3 Treliça - Orientação Norte

Os melhores resultados da treliça orientada a norte apresentaram diminuição de 6,36% na demanda energética, aumento de 16,03% nas horas de conforto anual e melhoria de 28,15% nas condições de iluminação natural, quando comparadas a célula de referência sem elemento de controle solar. Já a treliça que melhor atendeu aos três objetivos, selecionada por meio do *Pareto Front* apresentou diminuição de 5,89% na demanda energética, aumento de 13,82% nas horas de conforto anual e melhoria de 25,83% nas condições de iluminação natural, quando comparada a célula de referência sem elemento de controle solar.

Através dos resultados da Tabela 5-5 e Figura 5-15, é possível analisar que a treliça selecionada através do *Pareto Front* apresenta um ótimo equilíbrio entre todos os objetivos e seus resultados se aproximam dos melhores resultados individuais, e, as perdas de eficiência não ultrapassam 21% em todos os objetivos. Comparada as de melhor desempenho, as perdas são de 15,03% na demanda energética, 20,50% no conforto térmico e 2,00% em termos de iluminação natural.

Tabela 5-5: Resultados mais relevantes das simulações das treliças norte.

		Treliza norte							
Nº gráfico		Resultado simulação	Imagem elemento de controle solar	Largura aletas	Quantidade aletas	Ângulo 0° a 25°	Demanda energética Kwh/m².a	% Conforto térmico	% 250 a 3000 lux
Eficiência energética	1 Inferior			2cm	35	n/a	123,70	30,947	82,86
	2 Superior			7cm	56	n/a	119,65	34,110	8,39
Conforto térmico	3 Superior			6cm	60	n/a	119,67	34,121	13,14
	4 Inferior			2cm	35	n/a	123,70	30,947	82,86
Iluminação natural	5 Superior			3cm	41	n/a	120,81	33,094	89,14
	6 Inferior			7cm	56	n/a	119,65	34,110	8,39
Pareto front	7 Global			2cm	60	n/a	120,26	33,470	87,53



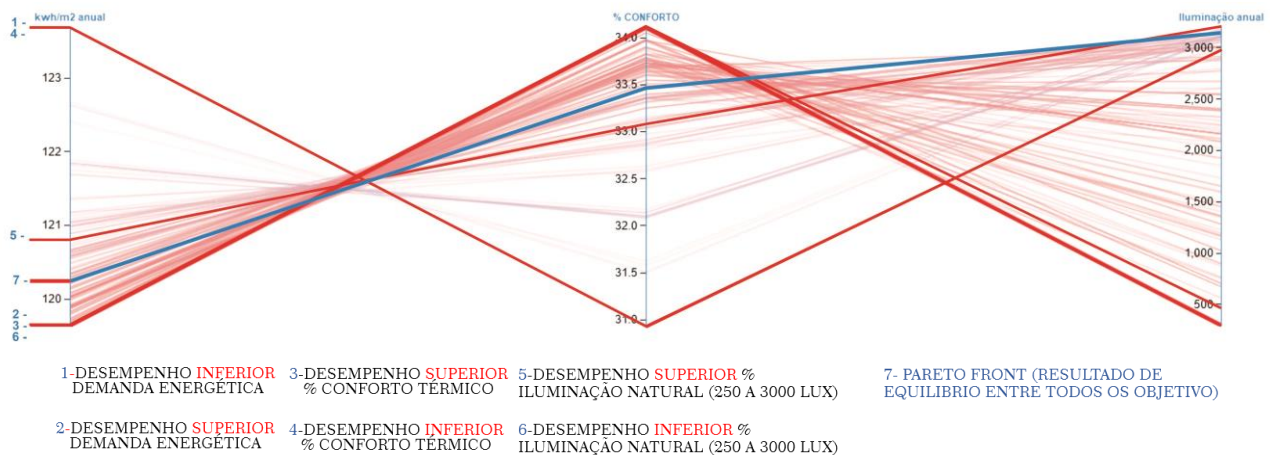


Figura 5-15: Gráfico de todas as simulações (vermelho) versus os melhores resultados e o *Pareto Front* (azul) da treliça norte.

A análise estatística através do método de regressão linear múltipla apresenta os seguintes resultados:

- O modelo é útil para prever a demanda energética, pois o Valor-P do teste F é menor que 0,05;
- Há evidências de que a largura e quantidade de aletas estão relacionadas à demanda energética, pois todas possuem valor-P menor que 0,05 no teste de significância individual;
- A largura e quantidade de aletas explicam 80% da demanda energética, 77% do conforto térmico e 87% da iluminação natural da célula, através do resultado grau de correlação ajustado (R^2).
- A equação de regressão linear múltipla que representa a demanda energética da treliça norte é:

$$y = 124,764 - 0,2637 \cdot X_1 - 0,0652 \cdot X_2 \text{ (Equação 6)}$$

- A equação de regressão linear múltipla que representa a porcentagem (%) de conforto da treliça norte é:

$$y = 29,792 + 0,2303 \cdot X_1 + 0,0539 \cdot X_2 \text{ (Equação 7)}$$

- A equação de regressão linear múltipla que representa a porcentagem (%) de iluminação natural de 250 a 3000 lux com treliça norte é:

$$y = 189,305 - 14,2433 \cdot X_1 - 1,3183 \cdot X_2 \text{ (Equação 8)}$$

Onde:

y: Demanda Energética em KWh/m² ano, ou, % de conforto, ou, % de iluminação natural de 250 a 3000 lux;

X₁: Largura das aletas;

X₂: Quantidade de aletas.

OBS: Para utilizar a equação é necessário respeitar os limites de largura, quantidade e ângulo das aletas estipulados na pesquisa.

5.5.4 Elemento Complexo Voronoi – Orientação Norte

Os melhores resultados do elemento complexo Voronoi orientado a norte indicaram redução de 6,01% na demanda energética, um aumento de 14,52% nas horas de conforto anual e melhoria de 29,58% nas condições de iluminação natural, quando comparada a célula de referência sem elemento de controle solar. Já o elemento complexo Voronoi que melhor atendeu aos três objetivos simultaneamente, selecionada por meio do *Pareto Front*, apresentou redução de 5,96% na demanda energética, 14,48% de aumento nas horas de conforto anual e 28,95% de melhoria nas condições de iluminação natural, quando comparada à célula de referência sem elemento de controle solar.

A Tabela 5-6 e Figura 5-16, indicam que o elemento complexo Voronoi selecionado através do *Pareto Front*, permitiu um equilíbrio entre todos os objetivos e seus resultados se aproximam dos melhores resultados individuais, uma vez que as perdas de eficiência não ultrapassam 3% em todos os objetivos. Comparada as de melhor desempenho para cada objetivo individual (Demanda energética, conforto térmico e Iluminação natural), as perdas são de 1,23% na demanda energética, 0,36% no conforto térmico e 2,95% na iluminação natural

Tabela 5-6: Resultados mais relevantes dos elementos complexos voronoi norte.

Elemento complexo voronoi norte									
N° gráfico		Resultado simulação	Imagem elemento de controle solar	Largura aleta	Quantidade orifícios	Diversidade	Demanda energética Kwh/m².a	% Conforto térmico	% 250 a 3000 lux
Eficiência energética	1			5cm	40	4	125,29	30,537	75,06
	2			15cm	78	8	120,10	33,573	88,83
Conforto térmico	3			14cm	75	8	120,22	33,676	89,00
	4			5cm	40	4	125,29	30,537	75,06
Iluminação natural	5			14cm	62	7	120,64	33,116	90,14
	6			5cm	40	4	125,29	30,537	75,06
Pareto front	7			14cm	80	6	120,17	33,664	89,69

Desempenho superior

Desempenho inferior

Desempenho superior global

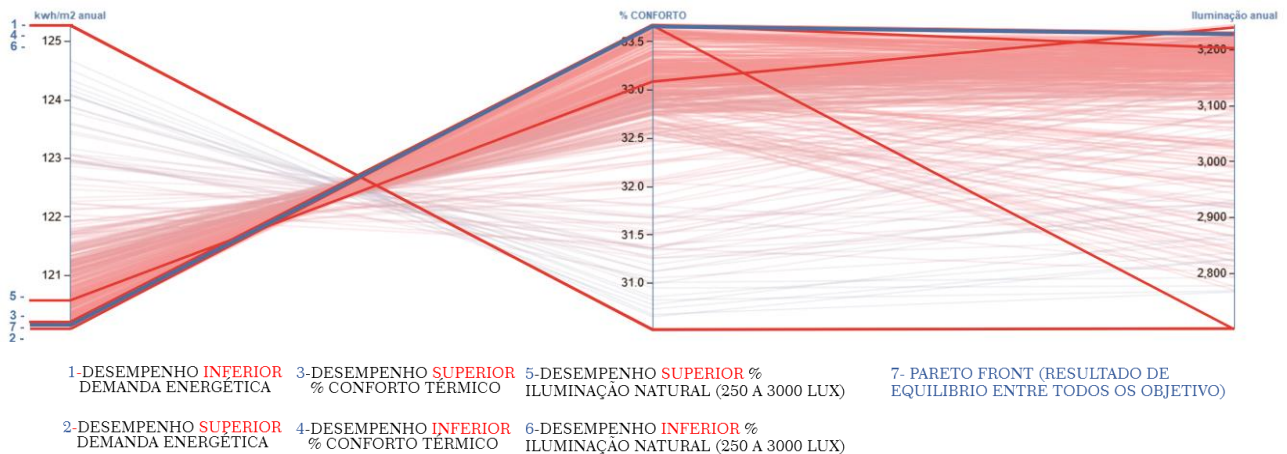


Figura 5-16: Gráfico de todas as simulações (vermelho) versus os melhores resultados e o *Pareto Front* (azul) do elemento complexo voronoi norte.

A análise estatística através do método de regressão linear múltipla apresentou os seguintes resultados:

- O modelo é útil para prever a demanda energética, pois o Valor-P do teste F é menor que 0,05;
- Há evidências de que a largura das aletas, quantidade de orifício e diversidade do voronoi estão relacionadas com a demanda energética, pois todas possuem valor-P menor que 0,05 no teste de significância individual;
- A largura das aletas, quantidade de orifícios e as particularidades do voronoi explicam 75% da demanda energética, 78% do conforto térmico e 59% da iluminação natural da célula, através do resultado grau de correlação ajustado (R^2);
- A equação de regressão linear múltipla que representa a demanda energética com elemento complexo voronoi é:

$$y = 125,6948 - 0,0906.X_1 - 0,0585.X_2 + 0,0157.X_3 \text{ (Equação 9)}$$

- A equação de regressão linear múltipla que representa a porcentagem (%) de conforto térmico com elemento complexo voronoi é:

$$y = 29,531 + 0,0711.X_1 + 0,0414.X_2 - 0,0104.X_3 \text{ (Equação 10)}$$

- A equação de regressão linear múltipla que representa a porcentagem (%) de iluminação natural de 250 a 3000 lux com elemento complexo voronoi é:

$$y = 75,630 + 0,6284.X_1 + 0,0585.X_2 + 0,0237.X_3 \text{ (Equação 11)}$$

Onde:

y: Demanda Energética em KWh/m² ano, ou, % de conforto, ou, % de iluminação natural de 250 a 3000 lux;

X₁: Largura das aletas;

X₂: Quantidade de orifícios;

X₃: Coeficiente de diversidade voronoi (1 a 10).

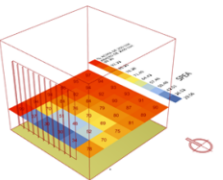
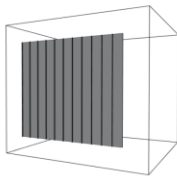
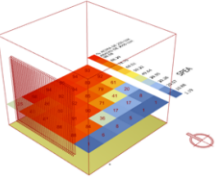
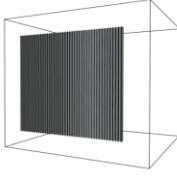
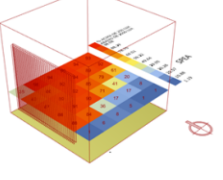
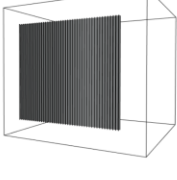
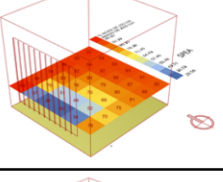
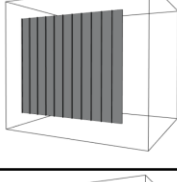
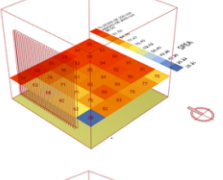
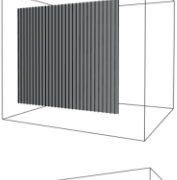
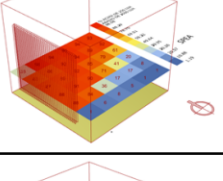
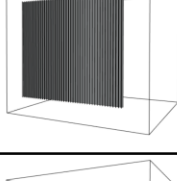
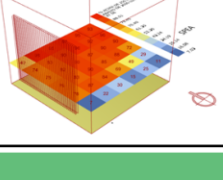
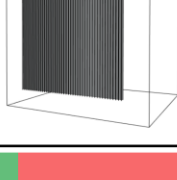
OBS: Para utilizar a equação é necessário respeitar os limites de largura, quantidade e ângulo das aletas estipulados na pesquisa.

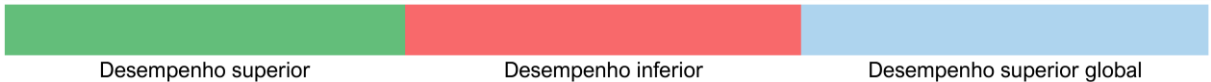
5.5.5 Veneziana Vertical - Orientação Oeste

Os resultados da veneziana vertical orientada a oeste indicaram uma redução de 7,84% na demanda energética, aumento de 13,50% nas horas de conforto anual e melhoria de 8,22% nas condições de iluminação natural, quando comparada a célula de referência sem elemento de controle solar. Já a veneziana que melhor atendeu aos três objetivos simultaneamente, selecionada através do *Pareto Front*, apresentou redução de 6,22% na demanda energética, aumento de 9,17% nas horas de conforto anual e melhoria de 5,51% na iluminação natural, quando comparada a célula de referência sem elemento de controle solar.

Através dos resultados na Tabela 5-7 e Figura 5-17, é possível analisar que os a veneziana vertical, selecionada através do *Pareto Front* indica um equilíbrio entre todos os objetivos e seus resultados não estão próximos aos dos melhores resultados individuais, uma vez que as perdas de eficiência ultrapassam 50% em todos os objetivos. Comparada as de melhor desempenho as perdas da solução que inclui todos os objetivos foram de 23,84% na demanda energética, 33,42% no conforto térmico e 50,82% na iluminação natural.

Tabela 5-7: Resultados mais relevantes das venezianas verticais oeste.

Veneziana vertical oeste										
Nº gráfico	Resultado simulação	Imagem elemento de controle solar	Largura aletas veneziana	Quantidade aletas	Ângulo aletas sul/norte	Demanda energético Kwh/m².a	% Conforto térmico	% 250 a 3000 lux		
Eficiência energética	1	Inferior			3cm	11	10°Sul	131,396	28,660	77,19
	2	Superior			8cm	44	25°Sul	122,351	32,158	61,44
Conforto térmico	3	Superior			8cm	44	10°Sul	122,35	32,3509	61,44
	4	Inferior			3cm	11	10°Sul	131,396	28,6643	77,19
Iluminação natural	5	Superior			5cm	29	20°Sul	127,355	29,737	81,8889
	6	Inferior			8cm	44	25°Sul	122,351	32,158	61,4444
Pareto front	7	Global			6cm	43	20°Sul	124,508	31,119	71,50



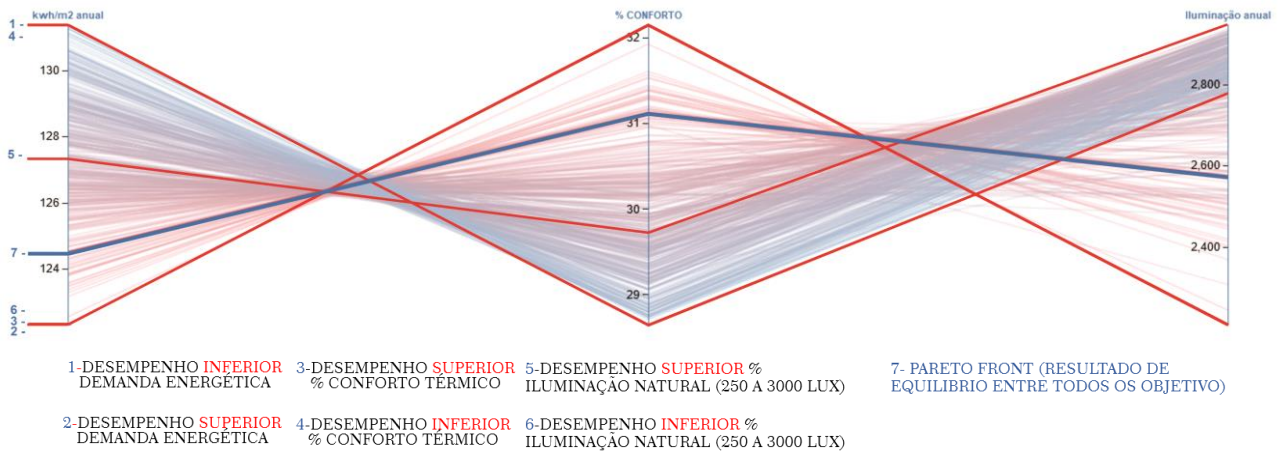


Figura 5-17: Gráfico de todas as simulações (vermelho) versus os melhores resultados e o Pareto Front (azul) da veneziana vertical oeste.

A análise estatística realizada por meio do método de regressão linear múltipla apresenta os seguintes resultados:

- O modelo é útil para prever a demanda energética, pois o Valor-P do teste F é menor que 0,05;
- Há evidências de que a largura, quantidade e angulo das aletas estão relacionadas com a demanda energética, pois todas possuem valor-P menor que 0,05 no teste de significância individual;
- A largura e quantidade explicam 93% da demanda energética, 86% do conforto térmico e 42% da iluminação natural da célula, através do resultado do grau de correlação ajustado (R^2);
- A equação de regressão linear múltipla que representa a demanda energética venezianas verticais é:

$$y = 135,413 - 0,6462.X_1 - 0,1284.X_2 - 0,0491.X_3 \text{ (Equação 12)}$$

- Equação de regressão linear múltipla que representa a porcentagem (%) de conforto térmico com veneziana vertical é:

$$y = 26,783 + 0,2601.X_1 + 0,0508.X_2 + 0,0115.X_3 \text{ (Equação 13)}$$

- Equação de regressão linear múltipla que representa a porcentagem (%) de iluminação natural de 250 a 3000 lux com veneziana vertical é:

$$y = 89,202 - 1,0646.X_1 - 0,2022.X_2 + 0,0374.X_3 \text{ (Equação 14)}$$

Onde:

y: Demanda Energética em KWh/m² ano;
 X₁: Largura das aletas;

X_2 : Quantidade de aletas;

X_3 : Ângulo de aletas (Sul= n° positivo, Norte= n° negativo de 25 a -25).

OBS: Para utilizar a equação é necessário respeitar os limites de largura, quantidade e ângulo das aletas estipulados na pesquisa.

5.5.6 Veneziana Horizontal - Orientação Oeste

Os melhores resultados da veneziana horizontal orientada a oeste indicaram diminuição de 9,89% na demanda energética, aumento de 17,02% nas horas de conforto anual e melhoria de 16,07% nas condições de iluminação natural, quando comparadas a célula de referência sem elemento de controle solar. Já a veneziana que melhor atendeu aos três objetivos, selecionada através do *Pareto Front* apresentou diminuição de 7,23% na demanda energética, aumento de 11,30% nas horas de conforto anual e diminuição de 20,82% nas condições de iluminação natural, quando comparada a célula de referência sem elemento de controle solar.

A Tabela 5-8 e Figura 5-18, permitem observar que os resultados da veneziana horizontal, selecionada através do *Pareto Front*, indica um equilíbrio médio entre todos os objetivos. Comparada as de melhor desempenho de cada objetivo, as perdas são de 34,14% na demanda energética, 37,24% no conforto térmico e 34% na iluminação natural.

Tabela 5-8: Resultados mais relevantes das venezianas horizontais oeste

Veneziana horizontal oeste									
Nº gráfico	Resultado simulação	Imagem elemento de controle solar	Largura aletas veneziana	Quantidade aletas	Ângulo 0° a 25°	Demanda energética Kwh/m².a	% Conforto térmico	% 250 a 3000 lux	
Eficiência energética	1			3cm	20	10°	129,687	28,973	82,00
	2			8cm	45	20°	119,633	33,356	7,67
Conforto térmico	3			8cm	45	20°	119,633	33,356	7,67
	4			3cm	20	10°	129,687	28,973	82,00
Iluminação natural	5			4cm	41	5°	125,8	30,057	87,83
	6			8cm	42	25°	119,692	33,162	5,72
Pareto front	7			7cm	41	5°	123,167	31,724	59,92

Desempenho superior
Desempenho inferior
Desempenho superior global

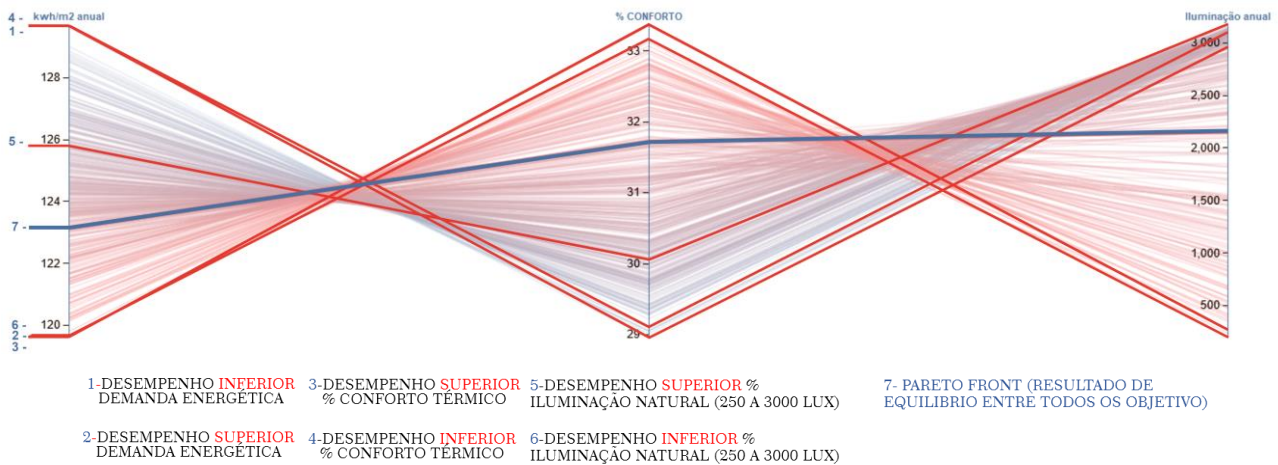


Figura 5-18: Gráfico de todas as simulações (vermelho) versus os melhores resultados e o *Pareto Front* (azul) da veneziana vertical oeste.

A análise estatística através do método de regressão linear múltipla apresentou os seguintes resultados:

- O modelo é útil para prever a demanda energética, pois o Valor-P do teste F é menor que 0,05;
- Há evidências de que a largura, a quantidade e ângulo das aletas dos elementos de controle solar estão relacionadas com a demanda energética, pois todas possuem valor-P menor que 0,05 no teste de significância individual;
- A largura, quantidade e ângulo das aletas explicam 98% da demanda energética, 96% do conforto térmico e 54% da iluminação natural da célula, através do resultado do grau de correlação ajustado (R^2);
- A equação de regressão linear múltipla, que representa a demanda energética com veneziana horizontal é:

$$y = 136,834 - 0,9699.X_1 - 0,1569.X_2 - 0,1240.X_3 \text{ (Equação 15)}$$

- A equação de regressão linear múltipla que representa a porcentagem (%) de conforto térmico com veneziana horizontal é:

$$y = 24,736 + 0,4825.X_1 + 0,0785.X_2 + 0,0604.X_3 \text{ (Equação 16)}$$

- A equação de regressão linear múltipla que representa a porcentagem (%) de iluminação natural de 250 a 3000 lux com veneziana horizontal é:

$$y = -32,879 + 8,7760.X_1 + 1,1867.X_2 + 0,7737.X_3 \text{ (Equação 17)}$$

Onde:

y: Demanda Energética em KWh/m² ano, ou, % de conforto, ou, % de iluminação natural de 250 a 3000 lux;

X₁: Largura das aletas;

X₂: Quantidade de aletas;

X₃: Ângulo de aletas (0 a 25).

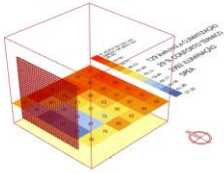
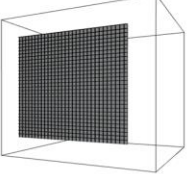
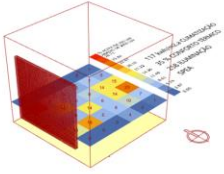
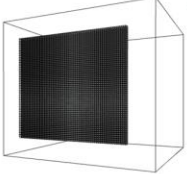
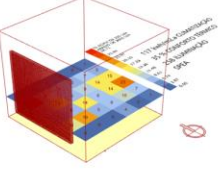
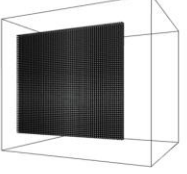
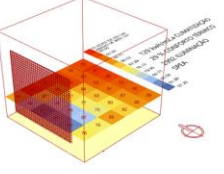
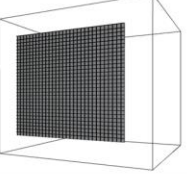
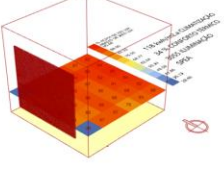
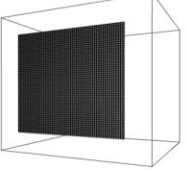
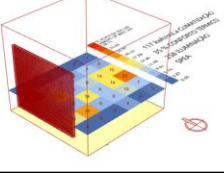
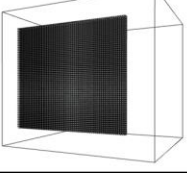
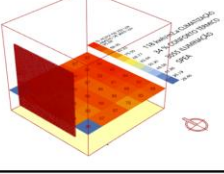
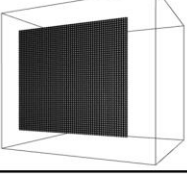
OBS: Para utilizar a equação é necessário respeitar os limites de largura, quantidade e ângulo das aletas estipulados na pesquisa.

5.5.7 Treliça - Orientação Oeste

Os melhores resultados da treliça orientada a oeste indicaram diminuição de 12,19% na demanda energética, aumento de 21,79% nas horas de conforto anual e melhoria de 12,15% nas condições de iluminação natural, quando comparada a célula de referência sem elemento de controle solar. Já a treliça que melhor atendeu aos três objetivos selecionada através do *Pareto Front* apresentou diminuição de 11,47% na demanda energética, incremento de 19,47% nas horas de conforto anual e melhoria de 12,15% nas condições de iluminação natural, quando comparada a célula de referência sem elemento de controle solar.

A Tabela 5-9 e Figura 5-19, indicam que os resultados da treliça selecionados através do *Pareto Front* mostram um equilíbrio entre todos os objetivos e seus resultados se aproximam dos melhores resultados individuais, sendo que as perdas de eficiência não ultrapassam 13% em todos os objetivos. Comparada as de melhor desempenho em cada objetivo individualmente, as perdas são de 7,78% na demanda energética, 12,03% no conforto térmico e 0,00% nas condições de iluminação natural.

Tabela 5-9: Resultados mais relevantes das treliças oeste obtidos por Pareto Front

Treliza oeste										
Nº gráfico	Resultado simulação	Imagem elemento de controle solar	Largura aleta	Quantidade aletas	Ângulo 0° a 25°	Demanda energética Kwh/m².a	% Conforto térmico	% 250 a 3000 lux		
Eficiência energética	1	Inferior			2cm	30	n/a	128,838	29,212	83,11
	2	Superior			7cm	60	n/a	116,573	34,716	7,17
Conforto térmico	3	Superior			7cm	60	n/a	116,573	34,7146	7,17
	4	Inferior			2cm	30	n/a	128,838	29,2123	83,11
Iluminação natural	5	Superior			2cm	56	n/a	117,527	34,053	84,86
	6	Inferior			7cm	60	n/a	116,578	34,715	7,17
Pareto front	7	Global			2cm	56	n/a	117,527	34,053	84,86

Desempenho superior
Desempenho inferior
Desempenho superior global

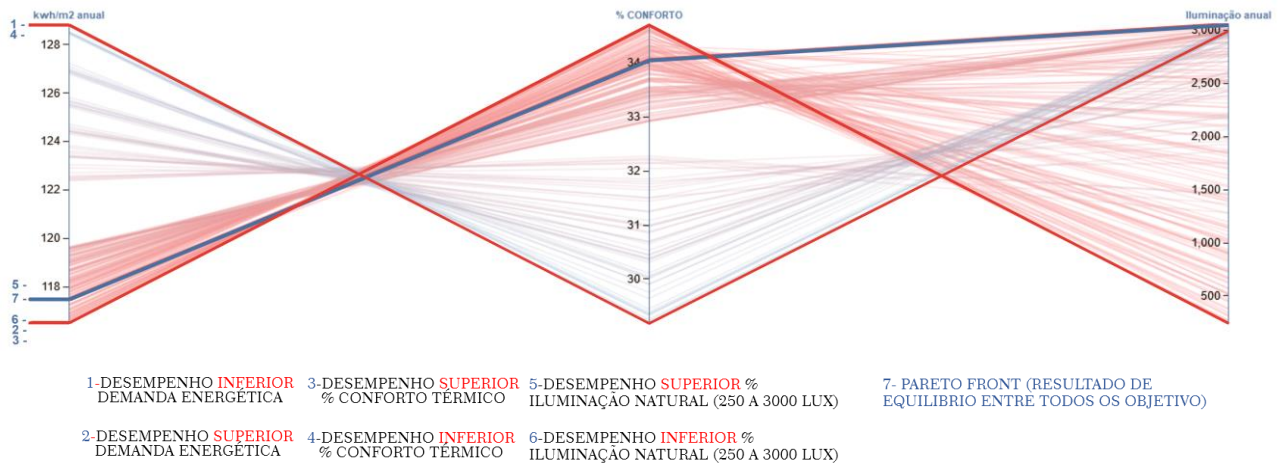


Figura 5-19: Gráfico de todas as simulações (vermelho) versus os melhores resultados e o *Pareto Front* (azul) da treliça oeste.

A análise estatística através do método de regressão linear múltipla apresenta os seguintes resultados:

- O modelo é útil para prever a demanda energética, pois o Valor-P do teste F é menor que 0,05;
- Há Evidências de que a largura e quantidade estão relacionadas com a demanda energética, pois todas possuem valor-P menor que 0,05 no teste de significância individual;
- A largura e quantidade explicam 73% da demanda energética, 74% do conforto térmico e 90% da iluminação natural da célula, através do resultado do grau de correlação ajustado (R^2);
- Equação de regressão linear múltipla que representa a demanda energética da treliça é:

$$y = 136,022 - 0,5288.X_1 - 0,3009.X_2 \text{ (Equação 18)}$$

- Equação de regressão linear múltipla que representa a porcentagem (%) de conforto térmico com treliça é:

$$y = 25,647 + 0,2901.X_1 + 0,1354.X_2 \text{ (Equação 19)}$$

- Equação de regressão linear múltipla que representa a porcentagem (%) de iluminação natural de 250 a 3000 lux com treliça é:

$$y = 168,012 - 12,4429.X_1 - 1,2301.X_2 \text{ (Equação 20)}$$

Onde:

y: Demanda Energética em KWh/m² ano, ou, % de conforto, ou, % de iluminação natural de 250 a 3000 lux;

X₁: Largura das aletas;

X₂: Quantidade de aletas.

OBS: Para utilizar a equação é necessário respeitar os limites de largura, quantidade e ângulo das aletas estipulados na pesquisa.

5.5.8 Elemento Complexo Voronoi - Orientação Oeste

Os resultados do elemento complexo voronoi orientado a oeste indicaram diminuição de 10,89% na demanda energética, aumento de 18,66% nas horas de conforto anual e melhoria de 13,32% nas condições de iluminação natural, se comparada a célula de referência sem elemento de controle solar. Já o elemento complexo voronoi que melhor atendeu aos três objetivos simultaneamente, selecionada através do *Pareto Front* apresentou Diminuição de 10,65% na demanda energética, aumento de 17,78% nas horas de conforto anual e melhoria de 13,03% nas condições de iluminação natural, quando comparada a célula de referência sem elemento de controle solar.

A Tabela 5-10 e Figura 5-20, indicam que o elemento complexo voronoi, selecionado através do *Pareto Front* apresenta um equilíbrio ao verificar todos os objetivos simultaneamente e suas soluções se aproximam dos melhores resultados individuais (demanda energética, conforto térmico e iluminação natural), sendo que as perdas de eficiência não ultrapassam 12% em todos os objetivos. Comparada as soluções de melhor desempenho em cada objetivo, as perdas são de 3,53% na demanda energética, 6,01% no conforto térmico e 11,27% na iluminação natural.

Tabela 5-10: Resultados mais relevantes dos elementos complexos Voronoi oeste.

Elemento complexo voronoi oeste										
Nº gráfico	Resultado simulação	Imagem elemento de controle solar	Largura aletas	Quantidade orifícios	Diversidade	Demanda energética Kwh/m².a	% Conforto térmico	% 250 a 3000 lux		
Eficiência energética	1	Inferior			5cm	45	5	127,142	29,863	83,83
	2	Superior			9cm	80	8	118,308	33,824	84,69
Conforto térmico	3	Superior			9cm	80	8	118,31	33,824	84,69
	4	Inferior			7cm	40	1	127,04	29,646	84,39
Iluminação natural	5	Superior			7cm	66	1	123,59	31,119	85,75
	6	Inferior			14cm	49	9	124,82	30,514	83,78
Pareto front	7	Global			6cm	76	5	118,62	33,573	85,53

Desempenho superior
Desempenho inferior
Desempenho superior global

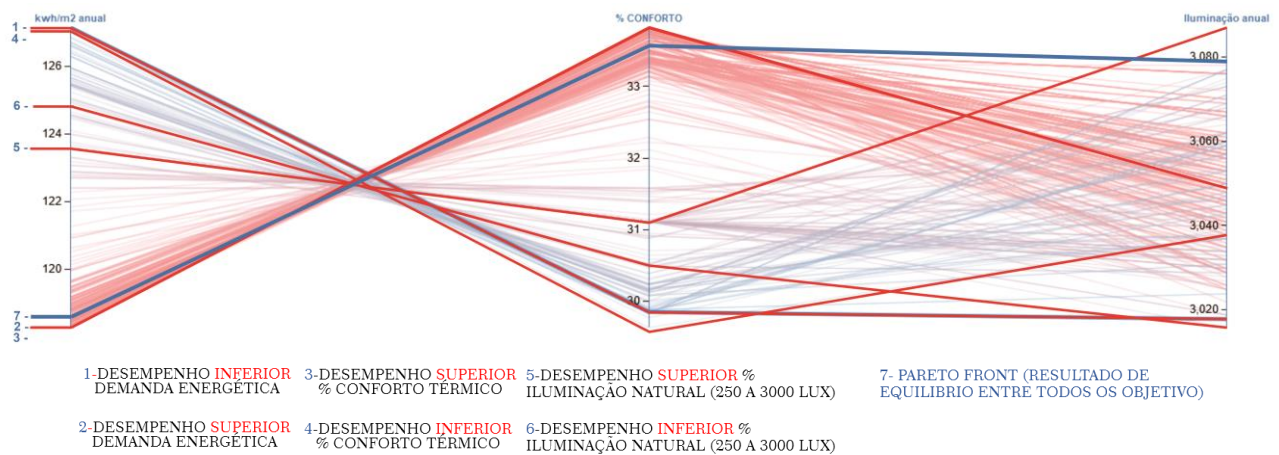


Figura 5-20: Gráfico de todas as simulações (vermelho) versus os melhores resultados e o *Pareto Front* (azul) do elemento complexo voronoi oeste.

A análise estatística através do método de regressão linear múltipla apresentou os seguintes resultados:

- O modelo é útil para prever a demanda energética, pois o Valor-P do teste F é menor que 0,05;
- Não há evidências de que a largura das aletas, quantidade de orifício e diversidade do voronoi estão relacionadas com a demanda energética, pois todas possuem valor-P maior que 0,05 no teste de significância individual;
- O modelo de regressão linear foi rejeitado devido ao valor P no teste de significância individual ser superior a 0,05, demonstrando que o modelo estatístico não é confiável para fazer previsão de correlação das variáveis dependentes com as variáveis independentes do elemento de controle solar complexo voronoi oeste.

5.5.9 Todas as Opções Analisadas em Comparação aos Casos Otimizados

Para análise da viabilidade do uso do *design* generativo para estudo de elementos de controle solar otimizados por *Pareto Front* foram executadas 2310 simulações, que incluíram todas as opções possíveis de venezianas verticais. Esses resultados foram comparados aos resultados de outras 600 simulações realizadas com auxílio do algoritmo de otimização SPEA-2 (Tabela 5-11).

Tabela 5-11: Resultados: Demanda Energética com Uso de Venezianas Verticais Otimizadas versus todas as possibilidades.

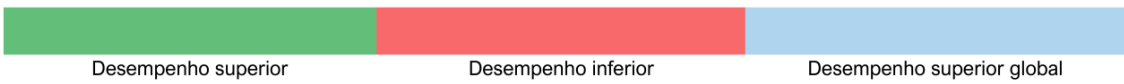
Veneziana vertical norte - resultados das otimizações vs todas as possibilidades										
		N° gráfico	Resultado simulação	Imagem elemento de controle solar	Largura aletas veneziana	Quantidade aletas	Ângulo oeste/leste	Demanda energética Kwh/m ² .a	% Conforto térmico	% 250 a 3000 lux
Eficiência energética	SPEA-2	Inferior			3cm	12	25°Oeste	126,74	29,932	71,50
		Superior			8cm	41	25°Leste	120,97	32,100	66,39
	Todas as opções	1 Inferior			3cm	10	25°Oeste	126,97	29,829	71,17
		2 Superior			8cm	44	25°Leste	120,94	32,169	64,56
Veneziana vertical norte - resultados das otimizações vs todas as possibilidades										
		N° gráfico	Resultado simulação	Imagem elemento de controle solar	Largura aletas veneziana	Quantidade aletas	Ângulo oeste/leste	Demanda energética Kwh/m ² .a	% Conforto térmico	% 250 a 3000 lux
Conforto térmico	SPEA-2	Superior			8cm	43	15°Oeste	121,97	32,432	74,47
		Inferior			3cm	12	25°oeste	126,74	29,932	71,50
	Todas as opções	3 Superior			8cm	45	25°Leste	121,81	32,477	72,00
		4 Inferior			3cm	10	25°Oeste	126,97	29,829	71,17

Veneziana vertical norte - resultados das otimizações vs todas as possibilidades

		N° gráfico	Resultado simulação	Imagem elemento de controle solar	Largura aletas veneziana	Quantidade aletas	Ângulo oeste/leste	Demanda energética Kwh/m².a	% Conforto térmico	% 250 a 3000 lux
Iluminação natural	SPEA-2	Superior			8cm	32	5°Oeste	122,107	32,021	82,31
		Inferior			8cm	38	25°leste	121,280	31,918	66,22
Iluminação natural	Todas as opções	5 Superior			8cm	25	10°Oeste	123,127	31,678	82,50
		6 Inferior			8cm	45	25°Oeste	122,474	32,386	64,06

Veneziana vertical norte - resultado pareto front

		N° gráfico	Resultado simulação	Imagem elemento de controle solar	Largura aletas veneziana	Quantidade aletas	Ângulo oeste/leste	Demanda energética Kwh/m².a	% Conforto térmico	% 250 a 3000 lux
Pareto front	7			7cm	40	0°	121,72	32,032	81,61	



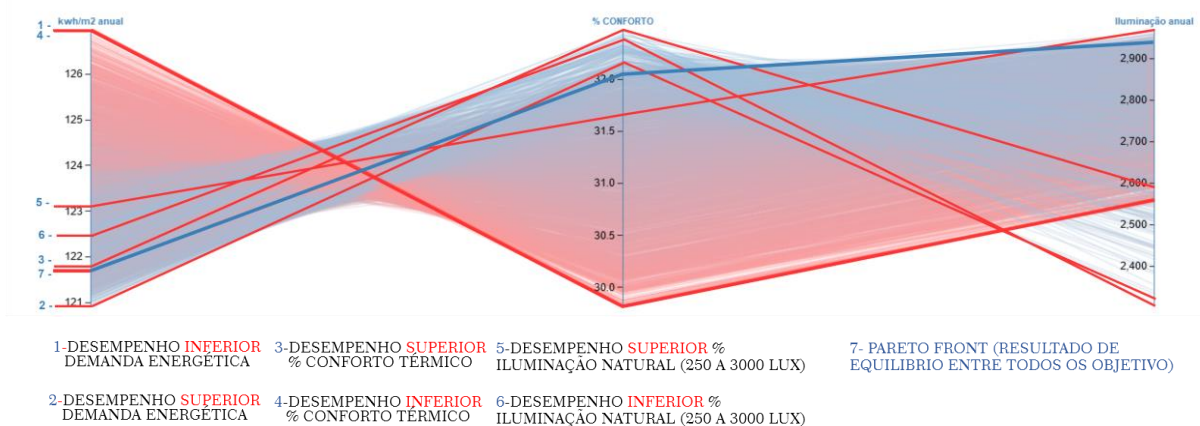


Figura 5-21: Gráfico de todas as simulações (azul) versus os melhores resultados e o Pareto Front (vermelho) da veneziana vertical norte.

Na análise dos resultados, a diferença entre a solução de Pareto front (Tabela 5-12) e todas as possibilidades chega a 1%, demonstrando a eficiência da otimização multiobjetivo do algoritmo.

Tabela 5-12: Diferença entre o Pareto Front da otimização e todas as possibilidades.

Objetivos de Análise	Diferença entre os melhores resultados e o Pareto Front.	Diferença em percentual entre os melhores resultados e o Pareto Front.
Demanda energética	0,78 Kwh/m ² . ano	0,64%
Conforto térmico	0,44 %	0,99%
Iluminação natural	0,89 %	1,08 %

É possível observar na Tabela 5-13 que a diferença entre os resultados de desempenho superior com otimizações utilizando o SPEA-2 comparado a todas as possibilidades analisadas é mínima, uma vez que não ultrapassou 1% em relação aos melhores resultados.

Tabela 5-13: Diferença entre os melhores resultados da otimização e todas as possibilidades.

Objetivos de Análise	Diferença entre os melhores resultados	Diferença em percentual entre os melhores resultados
Demanda energética	0,02 Kwh/m ² .ano	0,02%
Conforto térmico	0,14 %	0,04%
Iluminação natural	0,23 %	0,18%

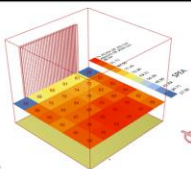
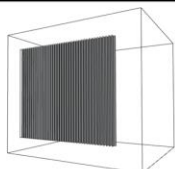
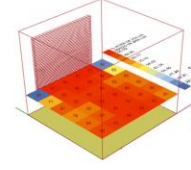
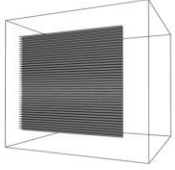
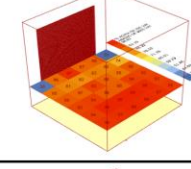
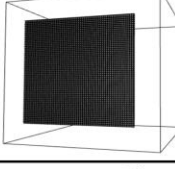
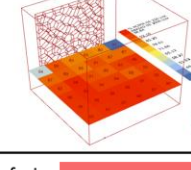
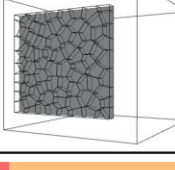
Desta forma, observou-se que o uso de algoritmo de otimização permitiu alcançar resultados ótimos com apenas 25% de todas as simulações necessárias, economizando no cenário da veneziana vertical cerca de 21 horas de simulação computacional, considerando que cada simulação tem duração média 45 segundos.

5.6 DISCUSSÃO

Com base nas análises dos resultados anteriormente apresentados foi definido quais elementos são os mais indicados para cada orientação solar, considerando a demanda energética para climatização, condições de conforto térmico oferecidas e melhores condições de iluminação natural proporcionadas. O impacto computacional do uso de algoritmo otimizador para criação de elementos de controle solar e as vantagens e desvantagens de se trabalhar com *design* generativo também foram constatadas.

Para a orientação solar norte, os resultados demonstraram (Tabela 5-14) que o elemento complexo voronoi foi o que apresentou desempenho mais elevado, seguido da treliça e veneziana horizontal. A diferença em termos de desempenho entre eles é pequena sendo 1,55Kwh/m²ano de demanda energética, 1,63% em relação as condições de conforto térmico e 8,08% de melhorias da iluminação natural.

Tabela 5-14: Resultados *Pareto Front* dos elementos de controle solar na orientação norte.

Elementos de controle solar norte									
		Resultado simulação	Imagem elemento de controle solar	Largura aleta	Quantidade orifícios	Diversidade	Demanda energética Kwh/m ² .a	% Conforto térmico	% 250 a 3000 lux
Pareto front	Veneziana vertical			7cm	40	0°	121,72	32,032	81,61
Pareto front	Veneziana horizontal			8cm	41	0°	121,67	32,705	85,67
Pareto front	Treliça			2cm	60	n/a	120,26	33,470	87,53
Pareto front	Elemento voronoi			14cm	80	6	120,17	33,664	89,69

Desempenho inferior Desempenho superior

Com o uso do algoritmo foi possível resolver os problemas das tipologias, por meio da manipulação dos parâmetros das aletas, por exemplo, diminuindo o intervalo de eficiência, como no caso da veneziana vertical, que pela literatura é indicada para as orientações solares leste e oeste e apresentou um bom desempenho para a orientação solar norte, embora com desempenho inferior a horizontal.

Já para a orientação solar oeste, a treliça foi o elemento com melhor desempenho, seguido do elemento complexo voronoi e veneziana horizontal (Tabela 5-15). No caso das diferenças, estas são significativas quando comparadas a orientação solar norte, que apresentou demanda energética de 5,89Kwh/m², incremento de conforto térmico 2,45% e melhoria das condições de iluminação natural de 12,97%, demonstrando que a tipologia indicada pela literatura do elemento de controle solar deve ser valorizada para estudos nesta orientação.

Tabela 5-15: Resultados *Pareto Front* dos elementos de controle solar na orientação oeste.

Elementos de controle solar oeste									
		Resultado simulação	Imagem elemento de controle solar	Largura aletas veneziana	Quantidade aletas	Ângulo aletas sul/norte	Demanda energético Kwh/m ² .a	% Conforto térmico	% 250 a 3000 lux
Pareto front	Veneziana vertical			6cm	43	20°Sul	124,508	31,119	71,50
Pareto front	Veneziana horizontal			7cm	41	5°	123,167	31,724	59,92
Pareto front	Treliça			2cm	56	n/a	117,527	34,053	84,86
Pareto front	Elemento voronoi			6cm	76	5	118,62	33,573	85,53

Desempenho inferior Desempenho superior

5.7 PANORAMA SOBRE AS DIFICULDADES ENCONTRADAS NA EXECUÇÃO DAS SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

Cada resultado das simulações de demanda energética e iluminação natural da célula teve médias diferentes de acordo com a tipologia de elemento de controle solar, sendo que as apresentaram maior complexidade geométrica de superfície foram as que consumiram maior tempo de execução da simulação (Tabela 5-16). Comparando a média das 600 simulações pela média estimada em todas as simulações possíveis dentro dos parâmetros, o uso do algoritmo generativo para as duas orientações economizou 616 horas de simulação para alcançar as melhores alternativas, sendo, 42 horas da veneziana vertical; 16 horas e meia da veneziana horizontal; 7 horas e meia da treliça e 549 horas do elemento complexo voronoi. Dessa forma, pode-se afirmar que o uso de algoritmos generativos na criação de elementos de controle solar permite aumentar a eficiência em termos de escolha e economizar tempo de execução da simulação e análise de dados.

Tabela 5-16: Tempo médio de simulação de cada célula com elementos de controle solar.

Elemento de controle solar	Tempo médio por simulação em segundos	Tempo médio das 600 simulações em horas	Tempo estimado de todas as alternativas de simulação em horas
Veneziana vertical	00:00:45	07:30:00	28:52:00
Veneziana horizontal	00:00:45	07:30:00	15:45:00
Treliça	00:01:10	11:40:00	15:33:00
Elemento voronoi	00:04:20	43:20:00	317:46:00

Observou-se que a viabilidade do uso de algoritmos de otimização para projetos generativos de elementos de controle solar se torna viável, de acordo com a quantidade de parâmetros envolvidos no estudo, ou seja, quanto maior o número de parâmetros e objetivos envolvidos no projeto, mais viável se torna o uso. O elemento complexo voronoi, tendo em vista o número de parâmetros necessários para o estudo, mostrou-se e com maior custo computacional na pesquisa. Ainda assim, considerando o tempo de execução das simulações computacionais, o uso do algoritmo de otimização economizou 22 dias de simulação, o que na prática sem o mesmo seria inviável para estudo de elementos de sombreamento.

Na pesquisa, ao comparar os objetivos analisados nas simulações, cerca de 1/3 do tempo foi consumido pelo uso do programa *Energyplus* e 2/3 com o *Radiance*, mostrando que estudos de demanda energética são mais rápidos no quesito tempo do que as relacionadas à iluminação natural.

Embora o *scrip* permitisse alcançar bons resultados, vale a pena ressaltar que durante a pesquisa foi possível verificar itens importantes para serem considerados durante o estudo com ferramentas computacionais para projetos generativos, dentre eles:

- O computador deve ser capaz de permanecer 48 horas executando as simulações, sem a necessidade de desligamento para refrigeração, uma vez que, durante a pesquisa houve momentos em que o ciclo de otimização ultrapassou 48 horas e a temperatura do processador chegou a 80°C;
- Evitar ciclos de otimização que possam durar mais do que 24 horas: observou-se que após 24 horas de simulação no programa *Energyplus* e *Radiance*, o sistema operacional (*Windows 10*) pode apresentar instabilidade e interromper o ciclo de simulação, necessitando reiniciar o processo de otimização. Neste estudo foram observados 10 episódios desse tipo, acarretando perda da otimização;
- Conhecer a fundamentação teórica e os parâmetros básicos de algoritmos genéticos, pois assim torna-se possível definir o tamanho da população, a taxa de mutação, o *crossover*, entre outros parâmetros, de forma a evitar que o algoritmo não consiga explorar de modo eficiente as variáveis do projeto e consequentemente apresente resultados medianos de otimização.

6. CONCLUSÃO

Na presente pesquisa foi estudado o uso do *design* generativo para criação de elementos de controle solar responsivos ao desempenho energético, e lumínico para um modelo, considerando a cidade de Foz do Iguaçu-PR. Para isso foi utilizado programas de modelagem 3D, simulação de consumo energético e de iluminação natural de edifícios através da programação visual.

O uso do *design* generativo como método de criação de elementos de controle solar se mostrou eficiente e viável em computador *desktop* para usuário doméstico, com a possibilidade de construção de *scripts* em programas gratuitos e/ou de baixo custo, com interface adaptada a usuários de pouco ou nenhum conhecimento em programação textual, além da capacidade de solucionar problemas complexos relacionados ao desempenho de elementos de controle solar inviáveis sem o uso de algoritmos de otimização.

Para os arquitetos e engenheiros fazerem uso do *design* generativo como método de criação de elementos de controle solar, foi possível verificar que se faz necessário que os mesmos tenham ou adquiram conhecimento sobre programação, de forma que possibilite a integração de programa de modelagem computacional com programa de simulação computacional, conhecimento em simulação computacional de consumo energético e iluminação natural e ainda, conhecimento do funcionamento e parâmetros relacionados a algoritmos de otimização.

Com base na pesquisa foi possível identificar que existem vários algoritmos de otimização multiobjetivo disponíveis em programas de fácil usabilidade para profissionais de projeto, e estes demonstraram desempenho diferentes de acordo a quantidade de simulações computacionais definidas no estudo.

O programa *Wallacei X* utilizado juntamente com o algoritmo NSGA-II demonstrou ser indicado para estudos com número de simulações reduzidos. O programa *Octopus* utilizado juntamente com o algoritmo SPEA-2 e Hype demonstrou ser indicado para estudos com quantidade de simulações mais elevadas; e utilizando o SPEA-2, quando se busca maior estabilidade dos programas. O programa *Opossum* foi o mais acessível em termos de configuração, e, utilizado em conjunto com o algoritmo RBFMOpt demonstrou ser o que apresenta melhores taxas de otimização em estudos com

grande quantidade de simulações, embora precise ser melhorado no quesito estabilidade quando utilizado com programas de simulação computacional de eficiência energética, por exemplo.

Os resultados dos elementos de controle solar criados especificamente para orientação norte em Foz do Iguaçu, por meio de *design* generativo demonstraram que em média é possível diminuir a demanda energética para climatização em até 6,36%, aumentar o percentual de conforto térmico em até 16,03% e aumentar a disponibilidade de iluminação natural considerada confortável e eficiente em até 35,45% das horas do ano.

Os resultados dos elementos de controle solar criados especificamente para orientação oeste em Foz do Iguaçu, por meio de *design* generativo demonstraram que é possível diminuir a demanda energética para climatização em até 12,19%, aumentar o percentual de conforto térmico em todas as horas do ano em até 21,79% e aumentar a disponibilidade de iluminação natural confortável e eficiente em até 16,07% das horas do ano.

Embora tenha sido utilizado método para estudo da iluminação natural considerada adequada (sDA), nem sempre com o uso do programas de simulação é possível definir exatamente o ofuscamento, sendo este um aspecto que pode ser mais estudado em outras pesquisas.

Os resultados demonstraram que o elemento do controle solar complexo voronoi é o mais indicado para atender os objetivos de desempenho energético, térmico e lumínico, quando utilizado para controlar a incidência de radiação solar na orientação norte e a treliça, quando utilizada na orientação oeste.

O voronoi e a treliça são elementos que derivam de muxarabis, e em teoria, ambos apresentariam resultados semelhantes, por hipótese, o melhor desempenho do voronoi frente à treliça se deu devido aos diferentes parâmetros de dimensões das aletas.

O estudo demonstrou também que o uso do *design* generativo responsivo ao desempenho, pode gerar dados suficientes para obter equações estatísticas que descrevem o comportamento dos elementos estudados conforme se alteram os parâmetros: quantidade e dimensão (altura, largura, comprimento e ângulos das aletas). Essas equações podem servir de base para usos futuros do mesmo elemento criado, sem a necessidade de execução de novas simulações computacionais, e de acordo com a quantidade, se for substancial, pode ser utilizado para aprendizado de máquinas (*machine learning*).

O presente trabalho comprovou a possibilidade e a eficiência do uso do *design* generativo para criação de elementos de controle solar na cidade de Foz do Iguaçu-PR, Brasil. Mostrou-se ainda, possível de ser utilizado por projetistas em escritórios de arquitetura e engenharia, visando a melhoria da eficiência energética, das condições de conforto térmico e de iluminação natural na arquitetura.

6.1 SUGESTÃO PARA PESQUISAS FUTURAS

Baseado na experiência do desenvolvimento do presente trabalho e análise dos resultados, como continuidade e aprimoramento do estudo, sugere-se para trabalhos futuros:

- Adicionar ao algoritmo a opção de otimização do fator de visibilidade com base no *Wide Window Ratio*, o que implica em aumento do tempo de execução da simulação, porém uma maior gama de possibilidades;
- Realizar estudo do uso de elementos de controle solar considerando o ofuscamento de forma mais abrangente com algoritmo generativo;
- Analisar o impacto na eficiência energética do uso de venezianas criadas através de *design* generativo em edifícios comerciais;
- Avaliar os ganhos em termos de tempo de simulação, com uso de computador com maior capacidade de processamento;
- Uso do *design* generativo para otimizar outros tipos de elementos construtivos, tais como: paredes, janelas, coberturas, componentes de fachadas, entre outros, inclusive analisando para diferentes tipologias construtivas e climas;
- Testar o uso do algoritmo NSGA-II em estudos futuros, entre outras sugestões.
- Vincular o estudo do *design* generativo de elementos arquitetônicos com o tempo de retorno do investimento.

REFERÊNCIAS

ABERGEL, et al. 2018 *Global Status Report: Towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector*. Internatl Energy Agency and UN Environment. [S.l.], p. 73. 2018. (978-92-807-3729-5).

ABERGEL, T. et al. 2018 *Global Status Report: Towards a zero-emission, efficient and. Global Alliance for Buildings and Construction (GABC)*. [S.l.], p. 73. 2018. (ISBN 978-92-807-3729-5).

ABNT. NBR 15220 - Desempenho térmico de edificações Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, p. 1-23. 2005.

ABNT. NBR 15575:2013 - Edificações habitacionais — Desempenho Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, p. 71. 2013a.

ABNT. NBR 15575:2013 - Edificações habitacionais — Desempenho Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas — SVVIE. Rio de Janeiro, p. 63. 2013b.

ALCALÁ, B. J. *Aspectos bioclimáticos de la arquitectura hispanomusulmana*. [S.l.]: [s.n.], 1999.

AOUAD, G. et al. *Computer Aided Design: Guide for Architecture, Engineering and Construction*. Routledge: Spon Press, 2013.

ARCHITECTURE 2030. Intermediate light shelves. *Architecture 2030*, 2020. Disponível em: <<http://www.2030palette.org/intermediate-light-shelves/>>. Acesso em: 28 jun 2020.

ARCHITECTURE 2030. Side daylighting controls. *2030 palette*, 2020. Disponível em: <<http://www.2030palette.org/side-daylighting-controls/>>. Acesso em: 28 jun 2020.

ARCHITECTURE, A. The MaoHaus / AntiStatics Architecture. *ArchDaily*, 2019. ISSN 0719-8884. Disponível em: <<https://www.archdaily.com/886282/the-maohaus-antistatics-architecture/>>. Acesso em: 26 jun 2020.

ARCHITEXTIT- EINAT EREZ-KOBILER. Casa Kobiler / Architextit- Einat Erez-Kobiler. *ArchDaily_b*, 2018. ISSN 0719-8906. Disponível em: <<https://www.archdaily.com.br/br/898294/casa-kobiler-architextit-einat-erez-kobiler>>. Acesso em: 28 jun 2020.

ASHRAE. *ASHRAE Handbook - Fundamentals* American Soceity of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Atlanta 2005.

AURENHAMMER, F. (1991). *Voronoi Diagrams - A Survey of a Fundamental Geometric Data Structure*. ACM Computing Surveys, 23(3):345-405, 1991.

BARBOSA, S.; IP, K.; SOUTHALL, R. Thermal comfort in naturally ventilated buildings with double skin façade under tropical climate conditions: The influence of key design parameters. *Energy and Buildings*, v. 109, p. 397-406, dec 2015.

BAVARESCO, M. et al. *Classificação de climas brasileiros empregada na atualização dos Regulamentos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações*. UFSC. Florianópolis, p. 1-8. 2017.

BIAO, L.; Rong, L. Teaching of Generative Design and Its Profound Influence. *Architecture in Computro. Conference Proceedings*, Bélgica: 2008. Disponível em: <<http://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/Search?search=Teaching+generative+design.&x=40&y=8>> Acesso em: 28 mar 2021.

BIARDEAU, L. T. et al. Heat exposure and global air conditioning. *Nature Sustainability*, California, n. 3, p. 25-28, dez 2019.

BITTENCOURT, L. *Uso das cartas solares: diretrizes para arquitetos*. 4ª. ed. Maceió: edUFL, 2004.

BRASIL. Ministério de Minas de Energia. *Balanço Energético Nacional 2017*. Empresa de Pesquisa Energética - EPE. Rio de Janeiro. 2017.

BRE, F.; FACHINOTTI, V. D. A computational multi-objective optimization method to improve energy efficiency and thermal comfort in dwellings. *Energy and Buildings*, v. 154, p. 2083-294, Nov 2017.

BROW, G. Z.; DEKAY, M. *Sol, vento e luz: estratégias para o projeto de arquitetura*. 2ª. ed. Porto Alegre: Bookman, 2004.

BRUAG. Shading Screens - Perforated Facade Panels. *Archdaily*, 2019. ISSN 0719-8884. Disponível em: <<https://www.archdaily.com/catalog/us/products/8504/shading-screens-perforated-facade-panels-bruag>>. Acesso em: 26 Jun 2020.

BUSTAMANTE, W.; VERA, S.; URETA, F. Thermal and Lighting Performance of 5 Complex Fenestration Systems in a Semiarid Climate of Chile. *Energy Procedia*, v. 78, p. 2494-2499, nov 2015.

CALDAS, L. G.; NORFORD, L. K. A design optimization tool based on a genetic algorithm. *Automation in Construction*, Salt Lake City, v. 11, n. 2ª, p. 173-184, Fev 2002.

CB3E. Lista das 5.564 cidades do território brasileiro e seus respectivos grupos climáticos. CBE - Centro Brasileiro de Eficiência Eenergética em Edificações, 2017. Disponível em:

<http://cb3e.ufsc.br/sites/default/files/all5564_with_subgroups_interface_2018.csv>. Acesso em: 30 abr 2019.

CB3E, C. B. D. E. E. E. E.-. INSTRUÇÃO NORMATIVA INMETRO PARA A CLASSE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS. Florianópolis: [s.n.], 2018.

CELANI, G. CAAD (computer-aided architectural design). In: BRAIDA, F., et al. 101 *Conceitos de Arquitetura e Urbanismo na Era Digital*. 1ª. ed. São Paulo: ProBooks, 2016. Cap. 101, p. 40-41.

CHING, F. D. K. *Dicionário visual de arquitetura*. 1ª. ed. São Paulo: Martins Fontes, 2000.

CONQUISTA muçulmana do Magrebe. *Wikipedia*, 2019. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Conquista_mu%C3%A7ulmana_do_Magrebe>. Acesso em: 17 Mar 2019.

CORBUSIER, F. L. Armée du Salut, Cité de Refuge, Paris, France, 1929. *FONDATION LE CORBUSIER*, 2019. Disponível em: <http://www.fondationlecorbusier.fr/corbuweb/morpheus.aspx?sysId=13&IrisObjectId=4593&sysLanguage=en-en&itemPos=4&itemSort=en-en_sort_string1%20&itemCount=78&sysParentName=&sysParentId=64>. Acesso em: 10 ago 2019.

DEAN, B. et al. *Towards zero-emission efficient and resilient buildings*. Global Alliance for Buildings and Construction (GABC). [S.l.], p. 33. 2016.

DELAQUA, V. Casa Branca / Studio MK27 - Marcio Kogan + Eduardo Chalabi. *ArchDaily Brasil*, 2015. ISSN 0719-8906. Disponível em: < <https://www.archdaily.com.br/br/779132/casa-branca-studio-mk27-marcio-kogan-plus-eduardo-chalabi> >. Acesso em: 10 abr 2019.

DELGADO, J. S. C.; SACTH, H. M.; VETTORAZZI, E. Estratégias bioclimáticas para projetos urbanos em Foz do Iguaçu: estudo de caso do Marco das Três Fronteiras, Maceio, outubro 2016. 1-12.

DELGARM, N. et al. Multi-objective optimization of the building energy performance: A simulation-based approach by means of particle swarm optimization (PSO). *Applied Energy*, v. 303, n. 170, p. 293, May 2016a.

DELGARM, N. et al. A novel approach for the simulation-based optimization of the buildings energy consumption using NSGA-II: Case study in Iran. *Energy and Buildings*, v. 127, p. 552-560, Sep 2016b.

DENZER, A. *The Solar House*. 1ª. ed. New York: Rizzoli, 2013.

DOE. Energyplus, 2019. Disponível em: <<https://energyplus.net/>>. Acesso em: 01 mai 2019.

DOE. Radiance. *Office of Energy Efficiency*, 2019. Disponível em: <<https://www.energy.gov/eere/buildings/downloads/radiance>>. Acesso em: 01 mai 2019.

DOUGLAS, H. Toldos Hunter Douglas. *ArchDaily*, 2019. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/catalog/br/products/6395/toldos-hunterdouglas-luxaflex-hunter-douglas-brasil?ad_source=search&ad_medium=search_result_all>. Acesso em: 10 ago 2019.

EISSA, M. A. *Ecological Aspects of the Courtyard House As a Passive Cooling System*. Conference: International Seminar: the Mediterranean medina. Francavilla: [s.n.]. 2004. p. 1-12.

EKICI, B. et al. Performative computational architecture using swarm and evolutionary optimisation: A review. *Building and Environment*, v. 147, p. 356-371, Jan 2019.

EPE. *Balanco Energético Nacional 2018: Ano base 2017*. EPE. Rio de Janeiro. 2018.

EPE. *Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2019: Ano base 2018*. EPE. Rio de Janeiro, p. 254. 2019.

FEENEY, J. The Magic of The Mashrabiya. *Saudi Aramco World*, n. 25, p. 32-36, Ago 1974.

FOZ DO IGUAÇU. *Código de Obras e Edificações do Município*. Leis complementar nº 3 data 16 de julho de 1991. Disponível em: [HYPERLINK "http://www.pmfi.pr.gov.br/Portal/VisualizaObj.aspx?IDObj=1218"](http://www.pmfi.pr.gov.br/Portal/VisualizaObj.aspx?IDObj=1218)
<http://www.pmfi.pr.gov.br/Portal/VisualizaObj.aspx?IDObj=1218> Acesso em: 08 Jul. 2020.

GARCÍA-PULIDO, J. L. *Bioclimatic Devices of Nasrid Domestic Buildings*. Studies In Architecture, History and Culture. Cambridge: [s.n.]. 2012. p. 1-87.

GERBER, D. J.; PANTAZIS, E.; WANG, A. A multi-agent approach for performance based architecture: Design exploring geometry, user, and environmental agencies in façades. *Automation in Construction*, v. 76, p. 45-58, Apr 2017.

GOU, S. et al. Passive design optimization of newly-built residential buildings in Shanghai for improving indoor thermal comfort while reducing building energy demand. *Energy and Buildings*, v. 169, p. 584-506, Jun 2018.

GRANADEIRO, V. et al. Building envelope shape design in early stages of the design process: Integrating architectural design systems and energy simulation. *Automation in Construction*, v. 32, p. 196-209, Jul 2013.

GURGEL, M. *Design Passivo - baixo consumo energético: guia para conhecer, entender e aplicar os princípios do design passivo em residências*. 1ª. ed. São Paulo: Senac, 2012.

HESCHONG, ; MAHONE,. *Windows and Offices: A Study of Office Worker Performance and the Indoor Environment*. California Energy Commission. Sacramento, p. 159. 2003.

KAMATH, L. G.; DAKETI, S. Jaalis: A study on aesthetics and functional aspects in built environment. *International Journal of Scientific Engineering and Applied Science*, v. II, n. 2, p. 98-104, Feb 2016. ISSN 2395-3470.

KHEMLANI, L. GENWIN: A generative computer tool for window design in energy-conscious architecture. *Building and Environment*, v. 30, p. 73-81, Jan 1995.

KIRIMTAT, A. et al. Review of simulation modeling for shading devices in buildings, 20 maio 2015. 23-49.

KOGAN, M. Studio R. *ArchDaily Brasil*. 2013. Disponível em: <<https://www.archdaily.com.br/br/01-90358/studio-r-slash-studio-mk27-marcio-kogan>>. Acesso em: 28 mar 2021.

KÓS, J. R. CAD (computer-aided design). In: BRAIDA, F., et al. *101 conceitos de Arquitetura e Urbanismo na Era Digital*. 1ª. ed. São Paulo: ProBooks, 2016. Cap. 101, p. 42-43.

KOWALTOWSKI, D. C. C. K. et al. *O processo de projeto em arquitetura*. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

KRUGER, A.; SEVILLE, C. *Construção verde: princípios e práticas em construção residencial*. 1ª. ed. São Paulo: Cengage, 2016.

KWOK, A. G.; GRONDZIK, W. T. *Manual de arquitetura ecológica*. 2ª. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

LABEEE. *Elaboração de uma biblioteca de componentes construtivos brasileiros para o uso no programa EnergyPlus*. Florianópolis, p. 52. 2017.

LADYBUG. Ladybug Tools. Ladybug Tools, 14 Fevereiro 2019. Disponível em: <<https://www.food4rhino.com/app/ladybug-tools>>.

LAMBERTS, R. Desempenho térmico e eficiência energética de edificações. *Youtube*, 2018. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=tXgeyQJi3q0&t=311s>>. Acesso em: 30 abr. 2019.

LAMBERTS, R. 1 Vídeo (3:27:03) ANÁLISE ENERGÉTICA DE EDIFICAÇÕES - 2º Diálogo sobre Eficiência Energética. Publicado pelo canal EEDUS, 2020. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=qFe6rgSKvx4>>. Acesso em: 21 jun 2020.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. *Eficiência energética na arquitetura*. 2ª. ed. São Paulo: Procel, 2014.

LANGNER, M. *Levantamento fotográfico*. Rio de Janeiro, Brasil. Mar, 2014.

LANGNER, M. *Levantamento fotográfico*. Buenos Aires, Argentina. jun, 2016.

LANGNER, M. *Levantamento fotográfico*. São Paulo, Brasil. fev, 2017.

- LARA, A.. Desenho paramétrico. In: BRAIDA, F., et al. **101 conceitos de Arquitetura e Urbanismo na Era Digital**. 1ª. ed. São Paulo: Probooks, 2016. Cap. 101, p. 78-79.
- LAVIN, C.; FIORITO, F. Optimization of an External Perforated Screen for Improved Daylighting and Thermal Performance of an Office Space. *Procedia Engineering*, v. 180, p. 571-581, 2017.
- LAVIN, C.; FIORITO, F. Optimization of an External Perforated Screen for Improved Daylighting and Thermal Performance of an Office Space. *Procedia Engineering*, v. 180, p. 571-581, 2017.
- LECHNER, N. **Heating, Cooling, Lighting**. New Jersey: Wiley , 2015. ISBN 978-1-118-82172-5.
- LEHRER,. How the city hurts your brain. **Boston Globe**, Seattle, v. II, Jan 2009.
- LINDEN, R. **Algoritmos Genéticos: Uma importante ferramenta da Inteligência Computacional**. 2ed. Rio de Janeiro: Brasport, 2008.
- LINK, L. Rising from the Ashes: The rebirth of the Fry Building. **Epigram**, 2019. Disponível em: <<https://epigram.org.uk/author/layla/>>. Acesso em: 27 jun 2020.
- LITTLEFIELD, D. **Manual do Arquiteto**. Porto Alegre: Bookman, 2011.
- LITTLEFIELD, D. **Manual do arquiteto: planejamento, dimensionamento e projeto**. 3ª. ed. Porto Alegre: Bookman, 2011.
- LM, IES. **Approved method: IES spatial Daylight autonomy (sDA) and annual sunlight exposure (ASE)**. *Illuminating Engineering Society*. 2013. Disponível em: <<https://www.ies.org/product/ies-spatial-daylight-autonomy-sda-and-annual-sunlight-exposure-ase>>. Acesso em: 28 mar 2021.
- MADEIGUINCHO. Estúdio de Yoga no Jardim. 23 Nov 2020. **ArchDaily Brasil**. Disponível em: <<https://www.archdaily.com.br/br/951815/estudio-de-yoga-no-jardim-madeiguincho>>. Acesso em: 28 Mar 2021.
- MANDALAKI, M. et al. Assessment of fixed shading devices with integrated PV for efficient energy use. *Solar Energy*, v. 86, p. 2561-2575, set 2012.
- MANDEL, G. **Como reconhecer a arte Islâmica**. São Paulo: Martins Fontes, 1985.
- MARAGNO, G. V.; ROURA, H. C. **Integrated environmental response of shaded transitional spaces in hot climates: the design of the Brazilian veranda**. PALENC 2010. Ilha de Rodes: [s.n.]. 2010. p. 1-18.
- MARINO, C.; NUCARA, A.; PIETRAFESA, M. Does window-to-wall ratio have a significant effect on the energy consumption of buildings? A parametric analysis in Italian climate conditions. *Journal of Building Engineering*, v. 13, p. 169-183, set 2017.

MCNEEL,. Rhinoceros, 2019. Disponível em: <<https://www.rhino3d.com/6/new>>. Acesso em: 01 mai 2019.

MELLO, E. K. **A herança mourisca da arquitetura no Brasil**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura)-USP. São Paulo. 1975.

MIGUEL, J. M. C. M. Casa e Lar: a essência da arquitetura. *Vitruvius*, São Paulo, out 2002. ISSN 1809-6298.

MOLINARO, L.; PAGANI, L. Human evolutionary history of Eastern Africa. *Current Opinion in Genetics & Development*, v. 53, p. 134-139, Dez 2018. ISSN <https://doi.org/10.1016/j.gde.2018.10.002>.

MURRAY, K. Sharon Colonial. *keri Murray Architecture*, 2020. Disponível em: <<http://www.kerimurrayarchitecture.com/sharon-colonial>>. Acesso em: 28 jun 2020.

OUAHRANI, D.; TOUMA, A. A. Selection of slat separation-to-width ratio of brise-soleil shading considering energy savings, CO2 emissions and visual comfort – a case study in Qatar. *Energy and Buildings*, v. 165, p. 440-450, abril 2018.

OXMAN, R. Pensamento Paramétrico. *Design Studies*, v. 52, p. 1-3, Set 2017a.

OXMAN, R. Thinking difference: Theories and models of parametric design thinking. *Design Studies*, v. 52, p. 4-39, Sep 2017b.

PAULERT, R. **Uso de elementos vazados na arquitetura: estudo de três obras educacionais contemporâneas**. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - UFPR. Curitiba, p. 134. 2012.

PROJETEEE. Componentes Construtivos. *Projeteee*, 2019. Disponível em: <<http://projeteee.mma.gov.br/componentes-construtivos/#>>. Acesso em: 14 maio 2019.

PRUITT, L. N. D.; KRAMER, S. W. How Historical Solutions to Thermal Comfort Influenced Modern Construction Efforts. *Procedia Engineering* 196, Primosten, v. I, n. 1, p. 880 - 887, Junho 2017. ISSN doi: 10.1016/j.proeng.2017.08.020.

RAPONE, G.; SARO, O. Optimisation of curtain wall façades for office buildings by means of PSO algorithm. *Energy and Buildings*, v. 45, p. 189-196, Fev 2012.

RODRICKS, R.; HEUMANN, A. Grasshopper Components. *Grasshopper*, 2018. Disponível em: <<http://rhino.github.io/>>. Acesso em: 12 ago. 2019.

RORIZ, M. **Segunda proposta de revisão do zoneamento bioclimático do Brasil**. ANTAC. São Carlos: [s.n.]. 2012. p. 1-12.

- RORIZ, M. Uma proposta de revisão do zoneamento bioclimático brasileiro. ANTAC. São Carlos: [s.n.]. 2012a. p. 1-22.
- RORIZ, M. Classificação de climas do Brasil. ANTAC. São Carlos: [s.n.]. 2014. p. 1-5.
- RUTHVEN, M.; NANJI, A. HISTORICAL ATLAS OF THE ISLAMIC WORLD. 1ª. ed. [S.l.]: Harvard University, 2004.
- SANTOS, L.; SCHLEICHER, S.; CALDAS, L. Automation of CAD models to BEM models for performance based goal-oriented design methods. *Building and Environment*, v. 112, p. 144-158, Feb 2017.
- SARANTI, A.; TSOUTSOS, T.; MANDALAKI, S. Sustainable Energy Planning. Design Shading Devices with Integrated Photovoltaic Systems for Residential Housing Units. *Procedia Engineering*, n. 123, p. 479-487, 2015.
- SINGH, V.; GU, N. Towards an integrated generative design. *Design Studies*, v. 33, n. 2ª, p. 185-207, Mar 2012.
- SINGH, V.; GU, N. Towards an integrated generative design framework. *Design Studies*, v. 33, n. 2, p. 185-207, Mar 2012.
- SNODGRASS, A. M. The Early Iron Age of Greece. In: SNODGRASS, A. M. *An Archaeology of Greece*. 1ª. ed. Los Angeles: University of California PRESS, v. 1, 1987. Cap. 6, p. 171-211.
- SONG, H.; GHABOUSSI, J.; KWON, T.-H. Architectural design of apartment buildings using the Implicit Redundant Representation Genetic Algorithm. *Automation in Construction*, v. 72, p. 166-173, Dec 2016.
- SOUZA, E. 10 Soluções de Fachadas Adaptativas para uma Arquitetura Resiliente. *ArchDaily*, 2019. ISSN 0719-8906. Disponível em: <<https://www.archdaily.com.br/br/920838/10-solucoes-de-fachadas-adaptativas-para-uma-arquitetura-resiliente>>. Acesso em: 26 jun 2020.
- SOUZA, H. M. P. O conforto ambiental na arquitetura colonial brasileira: heranças muçulmanas. *ARCHITECTON*, v. II, n. 2, p. 41-54, 2012. ISSN 2236-6849.
- SPACE, K. The Three-Dimensional Form of the Amarna House. *The Journal of Egyptian Archaeology*, v. 90, p. 123-152, 2004.
- STAMATAKIS, A.; MANDALAKI, M.; TSOUTSOS, T. Multi-criteria analysis for PV integrated in shading devices for Mediterranean region. *Energy and Buildings*, v. 117, p. 128-137, abr 2016.

- TURRIN, M.; BUELOW, ; STOUFFS, R. Design explorations of performance driven geometry in architectural design using parametric modeling and genetic algorithms. *Advanced Engineering Informatics*, v. 25, n. 4, p. 656-675, Oct 2011.
- TZEMPELIKOS, A. et al. Indoor thermal environmental conditions near glazed facades with shading devices – Part II: Thermal comfort simulation and impact of glazing and shading properties. *Building and Environment*, v. 45, p. 2517-2525, nov 2010.
- ULRICH, R. S. View through a window may influence recovery from surgery. *Science*, v. 224, p. 420-421, Abr 1984.
- VARZANEH, E. H.; AMINI, M.; BEMANIAN, M. R. Impact of Hot and Arid Climate on Architecture (Case Study: Varzaneh Jame Mosque). *Procedia Engineering*, Singapore, v. 94, p. 25-32, 2014.
- VIEIRA, A.; BORBA, C.; RODRIGUES, J. COBOGÓ DE PERNAMBUCO. 1ª. ed. Recife: Josivan Rodrigues, 2012.
- GROAT, L.; WANG, D. *Architectural Research Methods*. 2 ed. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2013.
- WASSOUF, M. *Da Casa Passiva à Norma Passivhaus: a arquitetura passiva em climas quentes*. 1º. ed. Barcelona: Gustavo Gili, 2014.
- WEISZFLOG, W. *Michaelis: moderno dicionário da língua portuguesa*. São Paulo: Melhoramentos, 1998.
- WORTMANN,. OPOSSUM: Introducing and Evaluating a Model-based Optimization Tool for. *Proceedings of the CAADRIA 2017*, Hong Kong, p. 283-293, Abril 2017.
- WORTMANN, T.; TUNÇER,. Differentiating parametric design: Digital workflows in contemporary architecture and construction. *Design Studies*, v. 52, p. 173-197, Sep 2017.
- YI, ; KIM,. Agent-based geometry optimization with Genetic Algorithm (GA). *Solar Energy*, v. 113, p. 236-250, mar 2015.
- ZANI, A. et al. Computational Design and Parametric Optimization Approach with Genetic Algorithms of an Innovative Concrete Shading Device System. *Procedia Engineering*, v. 180, p. 1473-1483, 2017.
- ZHANG, A. et al. Optimization of thermal and daylight performance of school buildings based on a multi-objective genetic algorithm in the cold climate of China. *Energy and Buildings*, v. 139, p. 371-384, Mar 2017.

APÊNDICE 1 - Aspectos chave para o desenvolvimento CAD

Ano	Desenvolvimento
1950	Primeiro sistema gráfico lançado pelo sistema de defesa aérea SAGE (<i>Semi Automatic Ground Environment</i>) da Força Aérea dos EUA - desenvolvido no Laboratório Lincoln do Massachusetts <i>Institute of Technology</i> .
1957	O Dr. Patrick J. Hanratty, conhecido como "o pai do CADD / CAM", desenvolveu o PRONTO, o primeiro sistema comercial de programação de controle numérico.
1962	Os primeiros programas CAD usavam algoritmos simples para exibir padrões de linhas inicialmente em duas dimensões e, depois, em 3D. Trabalho adiantado produzido pelo professor Charles Eastman na Carnegie-Mellon University; o <i>Building Description System</i> , uma biblioteca de várias centenas de milhares de elementos arquitetônicos que podem ser montados e desenhados na tela para formar um conceito de design completo, foi estabelecido.
1971	MCS foi fundada e desfrutou de uma reputação invejável de liderança tecnológica em programa mecânico CADD/CAM. Além de vender produtos em seu próprio nome, em seus primeiros anos a MCS também forneceu o programa CADD/CAM usado por empresas como McDonnell Douglas (Unigraphics), <i>Computervision</i> (CADDs), AUTOTROL (AD380) e Control Data (CD-2000) como o núcleo de seus próprios produtos. Estima-se que 70% de todos os sistemas CADD / CAM mecânicos 3D disponíveis atualmente tenham suas origens no código original do MCS.
1972	O mais antigo terminal da <i>Intergraph</i> (M & S Computing) foi projetado para criar e exibir informações gráficas. Compostos de partes de estoque inalteradas de vários fornecedores, os terminais consistiam em um terminal de tela Tektronix 4014 de tela única com um teclado conectado e uma mesa de 11 "x 11" que fornecia ao operador uma seleção de comandos de desenho.
1974	Primeira venda comercial de um sistema M & S; Baseado em um processador central PDP da Digital Equipment Corporation, ele executou a primeira versão do programa gráfico original da Intergraph, o <i>Interactive Graphics Design System</i> (IGDS), e foi usado para mapeamento de aplicativos.
1975	A <i>Avions Marcel Dassault</i> (AMD) adquiriu as licenças de equipamentos de programa CADAM (<i>Computer-Augmented Drafting and Manufacturing</i>) da <i>Lockheed</i> , tornando-se assim um dos primeiros clientes CADAM.
1977	<i>Avions Marcel Dassault</i> atribuiu à sua equipe de engenharia o objetivo de criar um programa interativo tridimensional, o precursor do CATIA (Programa Interativo Tridimensional Assistido por Computador). Seu maior avanço sobre o CADAM foi a terceira dimensão mais importante. Enquanto a CADAM automatizava o mundo existente da engenharia bidimensional, essencialmente a elaboração e o cálculo com raízes na geometria descritiva do plano, o CATIA elevou os engenheiros da Dassault ao mundo da modelagem 3D, eliminando a possibilidade de interpretar mal dados bidimensionais e gerar uma série de benefícios imediatos .
1981	A <i>Dassault Systems</i> é criada.
1982	O CATIA Versão 1 é anunciado como um produto adicional para design 3D e modelagem de superfície.
1982	Autodesk fundada por 16 pessoas na Califórnia, sob a iniciativa de John Walker, cuja idéia era criar um programa CAD por um preço de US \$ 1.000, que poderia ser executado em um PC. A primeira versão do AutoCAD foi baseada em um programa CAD chamado MicroCAD, escrito em 1981 por Mike Riddle.
1984	O físico húngaro Gabor Bajor contrabandeava dois Macs para o seu país. Na época, a posse de computadores pessoais era ilegal sob o regime comunista. Usando Pascal, ele e um adolescente chamado Tamas Hajas trabalharam para escrever um programa de CAD 3D para o Mac, que foi o começo da <i>Graphsoft Company</i> .
1985	Keith Bentley funda a <i>Bentley Systems Inc.</i> Originalmente chamada de <i>PseudoStation</i> , o programa desenvolvido pela <i>Bentley Systems</i> permitia que os usuários visualizassem arquivos de desenho IGDS sem precisar do programa da <i>Intergraph</i> . A próxima versão do <i>PseudoStation</i> foi renomeada <i>MicroStation</i> e adicionada a capacidade de editar arquivos IGDS. Depois que a <i>Intergraph</i> comprou 50% da <i>Bentley Systems</i> , uma nova versão do <i>MicroStation</i> adicionou extensões proprietárias ao IGDS e renomeou DNG.
1985	A <i>Diehl Graphsoft, Inc.</i> é fundada e a primeira versão do MiniCAD é enviada no mesmo ano. O MiniCAD tornou-se o programa CAD mais vendido no <i>Macintosh</i> .
1986	O AutoCAD recebeu o prêmio "O Melhor Produto CAD" da revista <i>PC World</i> , e a cada ano subsequentemente pelos próximos 10 anos.
1988	CATIA Versão 3 lançado com funcionalidade AEC. CATIA é portado para as estações de trabalho <i>RISC System / 6000</i> baseadas em UNIX da IBM e se torna líder de programas computacionais na indústria automotiva.
1989	A <i>Autodesk</i> compra o programa <i>Generic Software</i> e <i>Generic CADD</i> , criando mais de 600 aplicativos <i>addon</i> para o AutoCAD.
1990	<i>Visio Corporation</i> fundada, produzindo gráficos e desenhos de aplicativos.
1991	A <i>Microsoft</i> desenvolve o <i>Open GL</i> para uso com o <i>Windows NT</i> . <i>Open GL</i> é uma interface de programa procedural da API para produzir gráficos 3D e inclui aproximadamente 120 comandos para desenhar várias primitivas, como pontos, linhas e polígonos. O <i>Open GL</i> , desenvolvido pela <i>Silicon Graphics</i> , é um padrão para programação e renderização de gráficos em cores 3D.
1991	Primeiro programa AutoCAD para plataformas SUN.
1992	A <i>Dassault Systems</i> decide em conjunto com a IBM transferir a responsabilidade da CADAM para a <i>Dassault Systems of America</i> , uma empresa criada em 1992 como uma subsidiária integral da <i>Dassault Systems</i> . A IBM concorda em

	adquirir uma participação minoritária na <i>Dassault Systems</i> . Desde então, o CATIA e o CADAM se tornaram progressivamente unificados ao combinar os melhores recursos tecnológicos de ambos os sistemas.
1993	John Hirschtick da <i>Computervision</i> funda uma nova empresa de CAD chamada <i>SolidWorks, Inc.</i>
1993	Primeiro AutoCAD (Release 12) para plataformas <i>Windows</i> . Foram necessários 8 MB de RAM e 34 MB de espaço em disco rígido para a instalação completa. A versão para <i>Windows</i> do AutoCAD incluía uma caixa de ferramentas de 36 ícones, permitia várias sessões do AutoCAD, janela renderizada separada, suporte para GUI do <i>Windows</i> , DDE e OLE, além de recursos de visualização de arrastar e soltar e Bird's Eye. O AutoCAD 12 for <i>Windows</i> foi um dos programas CAD de maior sucesso de todos os tempos.
1995	<i>Unigraphics</i> no <i>Microsoft Windows NT</i> foi lançado.
1995	CATIA-CADAM AEC <i>Plant Solutions</i> anunciou. Este sistema de modelagem de planta orientado a objeto e de próxima geração permite poderosos recursos de engenharia baseados em conhecimento que podem simplificar drasticamente o processo de projeto, construção e operação da planta. Ele traz o poder dos programas "inteligentes" para a área de trabalho com a modelagem orientada a objetos da próxima geração.
1995	A <i>Autodesk</i> envia a primeira versão do 3D Studio para a plataforma NT, chamada 3D Studio MAX.
1995	A Tecnologia Paramétrica acompanha a versão 15 do Pro/E, o primeiro programa CAD / CAM de modelagem paramétrica e o primeiro pacote de modelagem sólida 3D de ponta disponível nas plataformas NT.
1995	A <i>Dassault Systems</i> envia o ProCADAM, uma versão mais curta do CATIA para uso em sistemas NT.
1996	A <i>General Motors</i> assina o maior contrato CAD / CAM da história, selecionando a <i>Unigraphics</i> como plataforma de programas de desenvolvimento de veículo único. O <i>Parasolid</i> obtém rapidamente a penetração generalizada no mercado como o padrão de fato para o desenvolvimento de programas CAD / CAM / CAE de gama alta, média e comercial.
1996	O CATIA-CADAM <i>Solutions Version 4</i> é disponibilizado nas plataformas <i>Silicon Graphics, Hewlett Packard</i> e <i>Sun</i> .
1997	A <i>Autodesk</i> envia o 3D Studio MAX versão 2 e uma versão reduzida chamada 3D Studio Viz.
1997	ISO 13567 - Padrão para Estruturar Camadas no CABD - um esforço internacional para estruturar a nomenclatura de camadas para tradução entre vários idiomas e fornecedores.
1997	A <i>Revit Technology Corporation</i> revoluciona o projeto de edifícios com o Revit, o primeiro modelador de edifícios paramétrico do mundo desenvolvido para a indústria de AEC.
1998	A <i>Dassault Systems</i> e a IBM anunciam uma nova Aliança Estratégica para abordar o mercado de Gerenciamento de Desenvolvimento de Produto II (PDM II). A <i>Dassault Systems</i> adquire a <i>Matra Datavision</i> e é indicada como Parceira de Negócios Internacionais da IBM para comercializar, vender e dar suporte a CATIA, CATweb e ENOVIA, bem como às soluções de e-business da IBM.
1998	A <i>Unigraphics Solutions</i> torna-se a primeira organização CAD / CAM / CAE / PDM a receber a certificação ISO 9001 / TickIT.
1998	O AutoCAD <i>Mechanical</i> , que integra uma ferramenta mecânica no AutoCAD 14, é lançado.
1998	O <i>Autodesk Architectural Desktop</i> , uma solução de arquitetura integrada baseada no AutoCAD 14, é lançado.
1998	O <i>Viso Enterprise</i> , um programa de documentação e desenhos técnicos, é lançado.
1999	Norma Nacional CAD (NCS) 1.0 lançado - o primeiro compêndio e coordenação de esforços.
1999	<i>VectorWorks</i> é lançado como um substituto para o MiniCAD.
2000	O <i>Graphisoft</i> oferece um conjunto de ferramentas baseadas na Web para ajudar a incentivar a comunidade AEC CAD a adotar sua GDL (<i>Geometric Description Language</i>) como um formato de arquivo. O <i>plug-in GDL Object Web</i> para usuários do ArchiCAD fornece objetos GDL pela Internet.
2000	A IBM e a <i>Dassault Systems</i> iniciam a Versão 5 Release 5 do CATIA, disponível para <i>Windows</i> e UNIX.
2008	A <i>Autodesk</i> lançou o <i>Revit Series 2007</i> , um dos mais populares programas CAD baseados em BIM.
2010	O GoBIM lança o primeiro programa computacional BIM para <i>Apple iPhone</i> e <i>iPad</i> .

Fonte: (AOUAD, WU, et al., 2013)

APÊNDICE 2 –Dados coletados dos artigos pesquisados

ANO	TÍTULO ARTIGO	AUTORES	ELEMENTOS DE CONTROLE SOLAR	SOFTWARE DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL UTILIZADO	CLIMA	USO DE ALGORÍTMO GENERATIVO	PAIS DA PESQUISADO
2018	Selection of slat separation-to-width ratio of brise-soleil shading considering energy savings, CO2 emissions and visual comfort – a case study in Qatar	Djamel Ouahrani, Albert Al Touma	Brise -soleil	EnergyPlus	quentes e úmidos	Não utilizou	Catar
2017	Shading and day-lighting controls energy savings in offices with fully-Glazed facades in hot climates	Albert Al Touma, Djamel Ouahrani	Brise soleil e venezianas	EnergyPlus	Tropical Árido	Não utilizou	Catar
2017	Evaluation of a solar thermal glass facade with adjustable transparency in cold and hot climates	Laura Baumgärtner, Rodrigo Alba Krasovsky, Jochen Stopper, Jörn von Grabe	Vidro especial	TRNSYS Thermal Analysis	temperado	Não utilizou	Suíça
2017	An integrated thermal and lighting simulation tool to support the design process of complex fenestration systems for office buildings	Waldo Bustamante, Daniel Uribe, Sergio Vera, Germán Molina	Persianas, Venezianas	mkSchedulecom energy plus	Continental úmido e Tropical úmido	Não utilizou	Canadá e Estados Unidos
2017	Metal Mesh as Shading Devices and Thermal Response of an Office Building: Parametric Analysis	Andrea Giovanni Mainini, Tiziana Poli, Michele Zinzi, Alberto Speroni	Grade metálica	EnergyPlus	subtropical úmido	Não utilizou	Itália
2017	Optimization of an External Perforated Screen for Improved Daylighting and Thermal Performance of an Office Space	Cristian Lavin, Francesco Fiorito	Tela perfura	Daysim and EnergyPlus and Ladybug plug-in for Grasshopper	quente	Utilizou	Austrália
2017	Does window-to-wall ratio have a significant effect on the energy consumption of buildings? A parametric analysis in Italian climate conditions	C. Marino, A. Nucara, M. Pietrafesa	Não especificado	Energy Plus	todas as zonas climáticas da Italia, 12 zonas	Não utilizou	Itália
2017	The glazing area in residential buildings in temperate climate: The thermal-energetic performance of housing units in Lisbon	Márcia Cristina Pereira Tavares, Hélder José Perdigão Gonçalves, Jorge Novais Telles de Faria Corrêa Bastos	Brise soleil	Energyplus	quente e seco	Não utilizou	Portugal
2017	A Holistic Approach for Improving Visual Environment in Private Offices	Iason Konstantzos, Athanasios Tzempelikos	não especificou	Não utilizou		Não utilizou	Estados Unidos
2017	Effects of louvers shading devices on visual comfort and energy demand of an office building. A case of study	Francisco Fernández Hernández, José Manuel Cejudo López, José Miguel Peña Suárez, M Carmen González Muriano, Simón Carrillo Rueda	Venezinas	Daysim, TRNSYS Thermal Analysis		Não utilizou	Espanha
2017	Computational Design and Parametric Optimization Approach with Genetic Algorithms of an Innovative Concrete Shading Device System	Andrea Zani, Michele Andaloro, Luca Deblasio, Pierpaolo Ruttico, Andrea G. Mainini	Elementos perfurados	Rhinoceros e Grasshopper		Utilizou	Itália
2017	Optimized facade design - Energy efficiency, comfort and daylight in early design phase	Matthias Haase, Steinar Grynning	Tela perfurada	IDA ICE 3.0		Não utilizou	Noroéga
2016	Multi-criteria analysis for PV integrated in shading devices for Mediterranean region	A. Stamatakis, M. Mandalaki, T. Tsoutsos	Venezianas, marquise, brise de soleil	PROMETHEE	quente e seco	Não utilizou	Grécia
2016	Daylight Illuminance in urban environments for visual comfort and energy performance	Nazanin Nasrollahi, Elham Shokri	Não utilizou	não utilizou	não utilizou	Não utilizou	não utilizou
2015	Daylighting and Energy Analysis of Multi-sectional Facades	Ying-Chieh Chan, Athanasios Tzempelikos	Venezianas e Prateleira de luz	EnergyPlus and Radiance/DAYSIM	quente e umido	Não utilizou	Estados Unidos
2015	Sustainable Energy Planning, Design Shading Devices with Integrated Photovoltaic Systems for Residential Housing Units	Alexandra Saranti, Theocharis Tsoutsos, Maria Mandalaki	Painéis horizontais	site hell Systems	quente e seco	Não utilizou	Grécia
2015	Thermal and Lighting Performance of 5 Complex Fenestration Systems in a Semiarid Climate of Chile	Waldo Bustamante, Sergio Vera, Francisca Ureta	Venezianas	Não utilizou	semi árido	Não utilizou	Chili
2015	18: The impact of electrochromic windows on the energy performance of buildings in Mediterranean climates: a case study	P. F. Tavares, A. R. Gaspar, A. G. Martins, F. Frontini	Persianas	ESP-r		Não utilizou	Portugal
2015	Thermal comfort in naturally ventilated buildings with double skin facade under tropical climate conditions: The influence of key design parameters	Sabrina Barbosa, Kenneth Ip, Ryan Southall	Persianas	IES Virtual Environment	Tropical	Não utilizou	Brasil
2015	Retrofit Strategies for the Improvement of Visual Comfort and Energy Performance of Classrooms with Large Windows Exposed to East	Simone Secchi, Fabio Sciurpi, Leone Pierangioli, Matteo Randazzo	Brise de soleil	Energyplus, ReluxPro		Não utilizou	Itália
2013	Evaluating daylighting effectiveness and occupant visual comfort in a side-lit open-plan office building in San Francisco, California	Kyle Konis	Brises de soleil, painéis metálicos perfurados.	Não utilizou		Não utilizou	Estados Unidos
2013	Manually-operated window shade patterns in office buildings: A critical review	William O'Brien, Konstantinos Kapsis, Andreas K. Athienitis	Não utilizou	Não utilizou		Não utilizou	
2012	Influence of shading control patterns on the energy assessment of office spaces	Pedro Correia da Silva, Vitor Leal, Marilynne Andersen	Venezinas	Daysim e Energyplus	quente úmido	Não utilizou	Portugal
2012	Optimisation of curtain wall facades for office buildings by means of PSO algorithm	Gianluca Rapone, Onorio Saro	Brise soleil	Energyplus e GenOpt	frio e úmido	Utilizou	Inglaterra
2012	Future energy demand for public buildings in the context of climate change for Burkina Faso	B. I. Ouedraogo, G. J. Levermore, J. B. Parkinson	Persianas , varandas, cortinas	IES Virtual Environment	morna e seca, quente e seca, quente e úmida	Não utilizou	França
2012	Assessment of fixed shading devices with integrated PV for efficient energy use	M. Mandalaki, K. Zervas, T. Tsoutsos, A. Vazakas	Venezianas, marquise, brise de soleil	Autodesk Ecotect, Radiance		Não utilizou	Grécia

2012	<u>Building façade design for daylighting quality in typical government office building</u>	Yaik-Wah Lim, Mohd Zin Kandar, Mohd Hamdan Ahmad, Dishan Remaz Ossen, Aminatuzuhariah Megat Abdullah	Prateleira de luz, venezianas	Não especificado	ru, Malásia	Não utilizou	Malásia
2012	<u>The influence of various internal blinds on thermal comfort: A new method for calculating the mean radiant temperature in office spaces</u>	Francesco Frontini, Tilmann E. Kuhn	Venezianas	ESP-r,		Não utilizou	França
2011	<u>Thermal Performance of Biofacade with Natural Ventilation in the Tropical Climate</u>	Pasinee Sunakorn, Chanikarn Yimprayoon	Vegetação trepadeira	Não utilizou		Não utilizou	Tailândia
2010	<u>Experimental evaluation of a climate facade: Energy efficiency and thermalcomfort performance</u>	Valentina Serra, Fabio Zanghirella, Marco Perino	Venezianas	Não utilizou	quente úmido	Não utilizou	Itália
2010	<u>A review on applying ventilated double-skin facade to buildings in hot-summer and cold-winter zone in China</u>	Juan Zhou, Youming Chen	Persianas	Não utilizou	quente	Não utilizou	China
2010	<u>Indoor thermal environmental conditions near glazed facades with shading devices – Part II: Thermal comfort simulation and impact of glazing and shading properties</u>	A. Tzempelikos, M. Bessoudo, A. K. Athienitis, R. Zmeureanu	Persianas, venezianas	Não utilizou	, Canada	Não utilizou	Canadá
2010	<u>Indoor thermal environmental conditions near glazed facades with shading devices – Part I: Experiments and building thermal model</u>	A. Tzempelikos, M. Bessoudo, A. K. Athienitis, R. Zmeureanu	Persianas, venezianas	Não utilizou	, Canada	Não utilizou	Canadá
2008	<u>Energy simulations for glazed office buildings in Sweden</u>	Harris Poirazis, Åke Blomsterberg, Maria Wall	Venezianas	IDA ICE 3.0	frio e úmido	Não utilizou	Suécia
2007	<u>Facade design optimization for naturally ventilated residential buildings in Singapore</u>	Liping Wang, Hien Wong Nyuk, Shuo Li	Brise soleil	Tas Building Designer	equatorial, temperatura uniforme e umida	Não utilizou	Singapura
2007	<u>A study of the effectiveness of passive climate control in naturally ventilated residential buildings in Singapore</u>	N. H. Wong, S. Li	Brise de soleil	Tas Building Designer	quente e úmido	Não utilizou	Singapura
2007	<u>The most efficient position of shading devices in a double-skin facade</u>	Elisabeth Gratia, André De Herde	Persianas	Tas Building Designer	frio e úmido	Não utilizou	Bélgica

APÊNDICE 3 –Script Criado para Geração de Elementos de Controle Solar

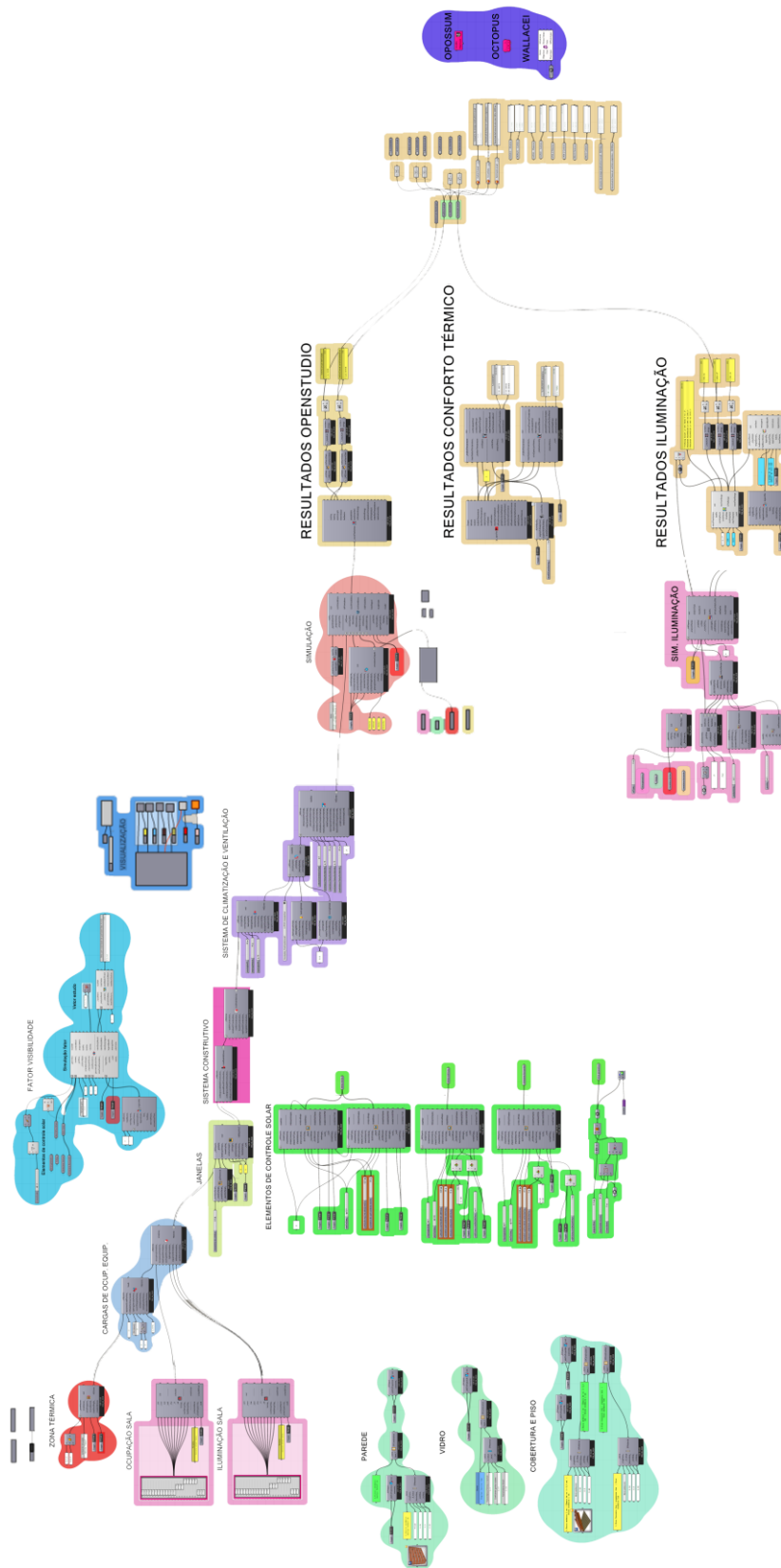


Figura A-1: Script completo

ELEMENTOS DE CONTROLE SOLAR

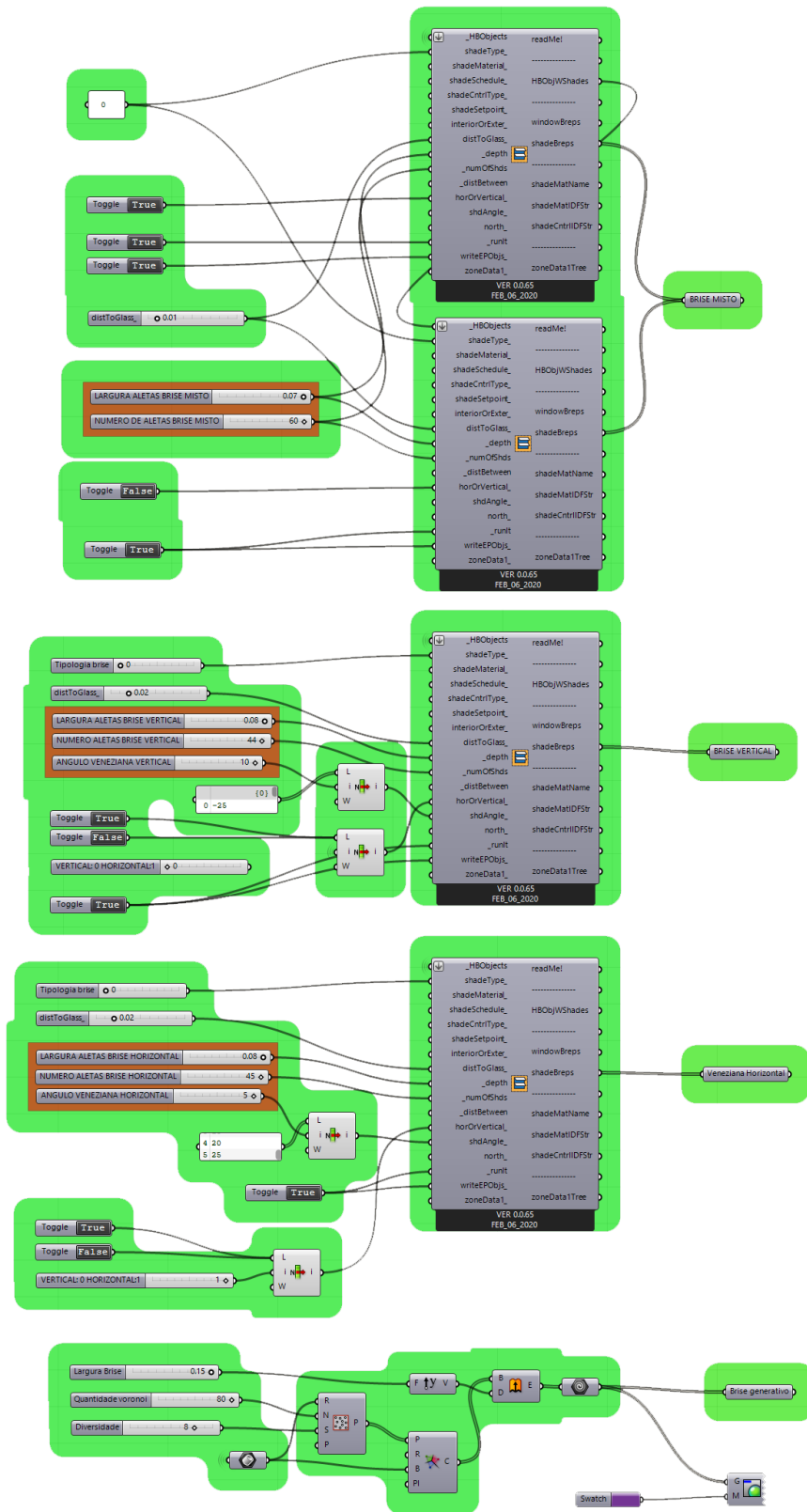


Figura A-2: Script elementos de controle solar.

ZONA TÉRMICA

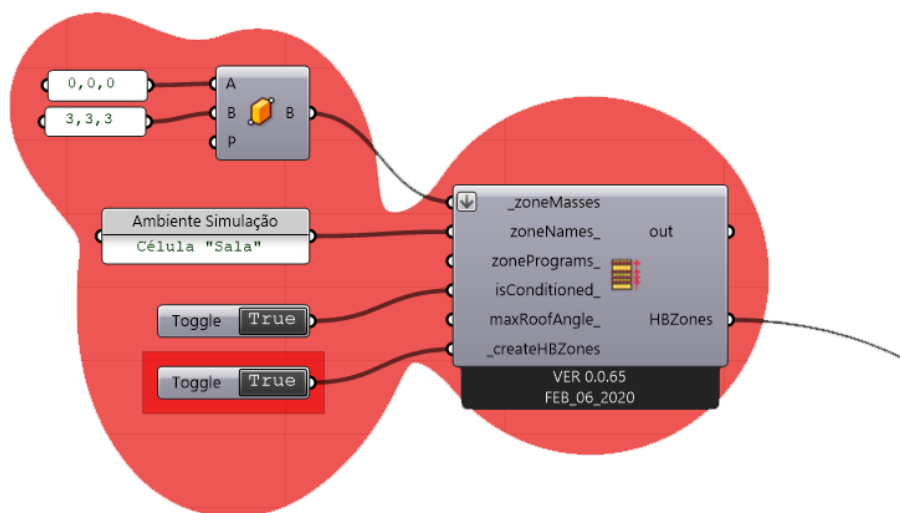


Figura A-3: Scrit Zona térmica.

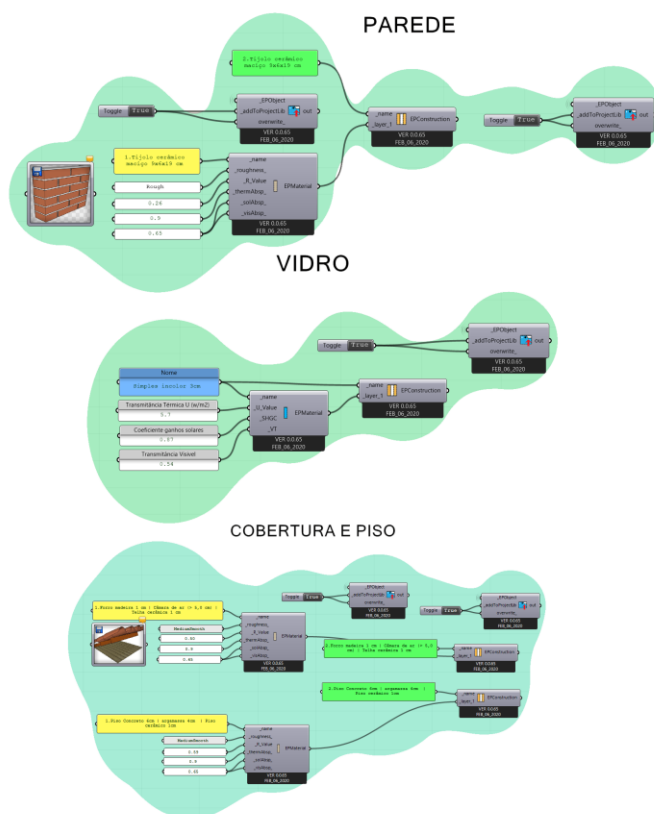


Figura A-4: Scrit materiais.

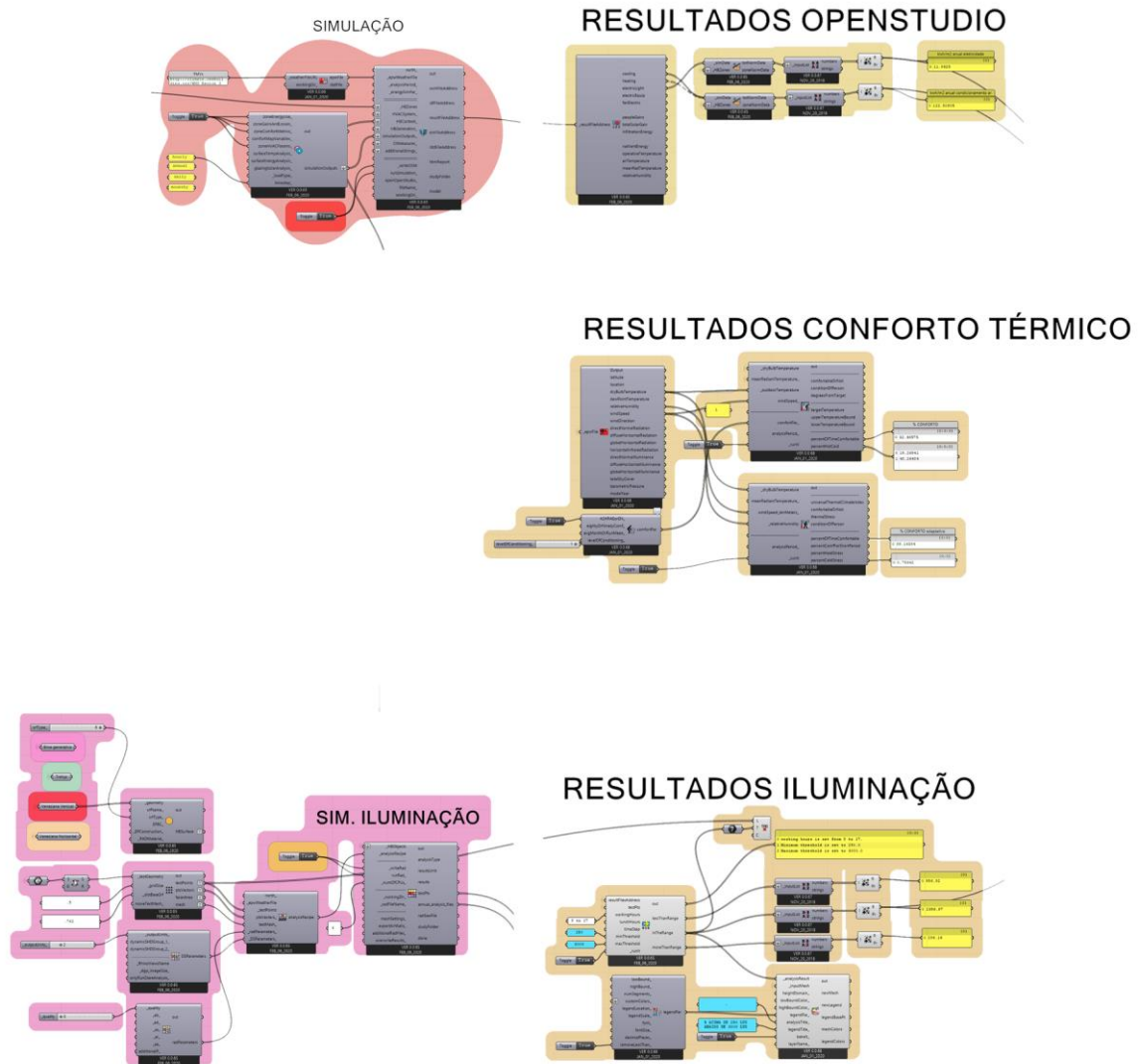


Figura A-5: Script Resultados.

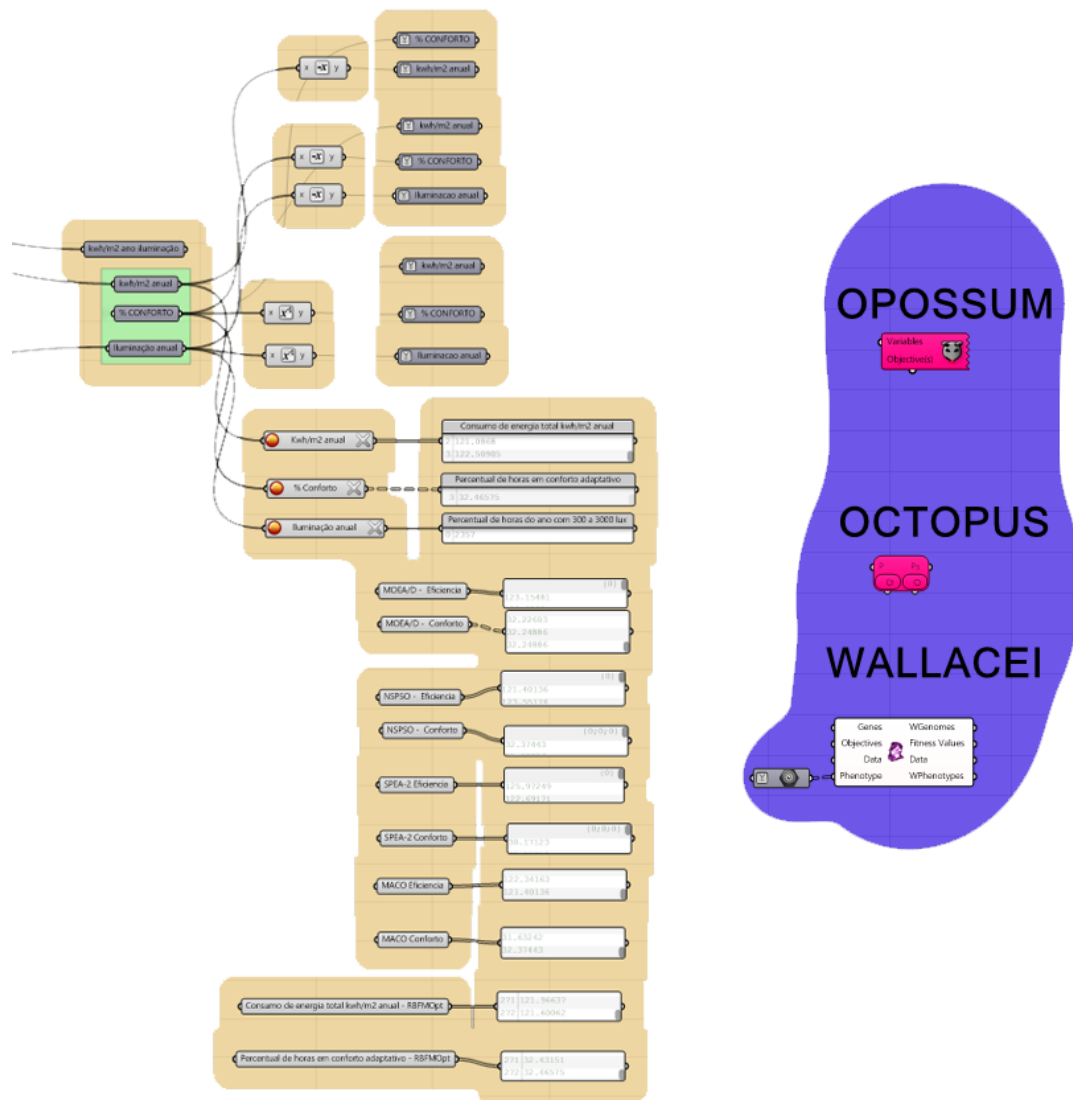


Figura A-6: Script coleta de dados e programas de otimizadores multiobjetivos.