

# SIMULAÇÃO TERMO-ENERGÉTICA DE UMA BIBLIOTECA VISANDO AUMENTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA - ESTUDO DE CASO

Melanie Gissel Urdangarín Gamarra<sup>a</sup>, Fabyo Luiz Pereira<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Estudante de graduação, Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil

<sup>b</sup>Professor orientador, Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil

## Resumo

No Brasil, metade do consumo de eletricidade corresponde às edificações, e por sua vez, para prédios públicos, o consumo em ar condicionado representa 48% do total. Estima-se um potencial para redução do gasto em eletricidade de 30% no caso de *retrofits* e até 50% para prédios em fase de construção. Em vista da grande participação que possui o condicionamento de ar no consumo do prédio em estudo, o presente trabalho tem por objetivo quantificar a economia de energia obtida através das seguintes propostas: troca dos atuais aparelhos de condicionamento de ar *splits* por um sistema de vazão de refrigerante variável (VRV), aplicação de películas de controle solar nos vidros, e ambas as opções juntas. Para tal, foi utilizado como ferramenta de simulação computacional o programa *EnergyPlus*. A primeira etapa do trabalho consiste em simular o consumo atual e validar os resultados através de medidas de consumo real; a segunda etapa, consiste em dimensionar e simular as propostas para aumento da eficiência e quantificar a economia obtida, e por último é realizada uma análise econômica para determinar a viabilidade das melhorias. O sistema VRV obteve uma economia de energia anual em ar condicionado de 42,08% com relação aos *splits*. A poupança de eletricidade total anual, corresponde a 32,01; 2,14 e 32,80% para o novo sistema de ar condicionado, películas de controle solar e ambas as opções juntas, respectivamente. A análise econômica do sistema VRV, considerando financiamento e para um cenário condizente com a média histórica do crescimento do preço da energia e da inflação, apresentou como resultado que a utilização de um sistema VRV em lugar do sistema *split* recupera o investimento inicial em 15 anos, tendo um custo anual uniformizado (CAU) de R\$14.695 ao ano. A aplicação de películas de controle solar resultou ser economicamente inviável por conta da pouca área envidraçada das fachadas norte e oeste.

## Palavras-chaves:

Simulação termo-energética, *EnergyPlus*, Economia de Energia, *Split*, VRV, Películas de controle solar.

## 1. Introdução

No Brasil, metade do consumo de eletricidade equivale às edificações, sejam de caráter residencial, comercial ou público [1, 2]. Estima-se um potencial de redução de consumo de 30% para edifícios existentes e 50% para os que se encontram em fase de construção [1]. Além disso, 12,6% do consumo de energia elétrica brasileiro corresponde aos sistemas de condicionamento de ar [3]. Em prédios públicos, o consumo em ar condicionado representa 48% do total, seguido pela iluminação com 23% e equipamentos de escritório com 15% [4]. Portanto, reduzir o gasto em condicionamento de ar é uma das chaves para reduzir significativamente o consumo de eletricidade em edificações.

No prédio em estudo, o consumo elétrico de ar condicionado contribui com 76,1% do total, seguido pela iluminação, com 16,2% e equipamentos de escritório, com 7,7%. Dada a grande participação do condicionamento de ar, o alvo do presente trabalho será propor um outro sistema de ar condicionado mais eficiente, assim como, o uso de películas de controle solar para diminuição da carga térmica e consequente redução do consumo em ar condicionado. Para avaliar a economia proporcionada

pelas propostas, serão realizadas simulações computacionais no programa *EnergyPlus*.

Quanto ao fluido utilizado para remoção da carga térmica, os condicionadores de ar classificam-se como sistemas de expansão direta, quando o ar é diretamente resfriado pelo fluido refrigerante; e expansão indireta, quando o fluido refrigerante é expandido por um meio que não aquele ao qual se deseja resfriar [5, 6]. Instalações com carga térmica de até aproximadamente 100 TR classificam-se como sendo de pequeno porte; acima desse valor, são ditas de médio/grande porte. Tipicamente, instalações de pequeno porte utilizam sistemas de expansão direta, enquanto que, as de médio/grande porte, utilizam sistemas de expansão indireta [6].

A carga térmica da biblioteca é igual a 87 TR, portanto, enquadra-se na categoria de pequena instalação, para a qual, recomenda-se o uso de um sistema de condicionamento de ar do tipo expansão direta. Além disso, a arquitetura do prédio não possui o espaço necessário para os dutos e salas de máquinas requeridas na instalação de um sistema de expansão indireta [7]. Dentro dos sistemas de expansão direta situam-se os aparelhos de janela, *splits*, *self contained* e vazão de refrigerante variável

(VRV) [6]. Atualmente, encontram-se instalados no prédio 43 equipamentos de ar condicionado de tipo *split*, esses aparelhos são indicados para aplicações residenciais [7]; quando utilizadas múltiplas unidades, tornam-se uma opção pouco eficiente, pois não possibilitam modular a capacidade [8]. Quanto aos sistemas *self contained*, tipicamente servem em supermercados, locais comerciais e bancos, no entanto, seria necessário o uso de dutos e mais uma vez, a arquitetura do prédio não foi desenhada para esse propósito. Em alternativa, um sistema VRV adequa-se às características do estabelecimento.

A NBR 16401-1 define esse tipo de equipamento como um sistema central em que um conjunto de unidades de tratamento de ar de expansão direta (designadas unidades internas), cada uma operada e controlada independentemente das demais, é suprido com fluido refrigerante líquido em vazão variável por uma unidade condensadora central, instalada externamente (designada unidade externa) [9]. Basicamente, um sistema VRV *multi-split* é um sistema que varia a vazão de refrigerante com a ajuda de um compressor de velocidade variável e válvulas de expansão eletrônicas localizadas em cada unidade interna, para igualar a carga de refrigeração ou aquecimento e, assim, conseguir manter a temperatura do ar da zona no *setpoint* [10]. A principal vantagem com relação aos sistemas tradicionais é a alta resposta às variações de carga e a flexibilidade de proporcionar aquecimento e arrefecimento para múltiplas zonas que exigem controles individuais de conforto térmico [10]. Na atualidade, este tipo de sistema vem causando cada vez mais atenção, devido a sua operação eficiente e melhora do conforto térmico dos ambientes [11]. A economia proporcionada provém maiormente dos seguintes fatores: (i) uso de compressores refrigerados a ar de velocidade variável; (ii) eliminação ou redução das perdas nos dutos e (iii) uso de refrigerante em lugar de água, requerendo menos energia para transferir o calor entre os fluidos [10]. Por outro lado, a maior desvantagem é o alto custo inicial e a incapacidade de renovar o ar interior [10].

Com referência às películas de controle solar, geralmente são produtos flexíveis feitos de múltiplas camadas de poliéster revestido ou tratado quimicamente, em ocasiões com uma leve camada metalizada [12]. Embora existam muitos tipos de película, as mais utilizadas são para controle da radiação solar; um dos benefícios decorrentes do seu uso é a habilidade de regular a penetração da luz e do calor, reduzindo o brilho e a radiação UV [13].

## 2. Revisão bibliográfica

A seguir são mencionados trabalhos brasileiros que utilizam simulação computacional para comparar sistemas VRV com outros tipos de ar condicionado.

Pasquali et. al. [14] analisaram diferentes estratégias para melhorar o desempenho energético de uma edificação de escritórios em São Paulo, através de simulação no *EnergyPlus*. Uma das propostas avalia a substituição do atual sistema de climatização *split* por um sistema VRV; obtendo por resultado uma economia em climatização de 48%. Do mesmo modo, Grass [15] compara o consumo de energia de um sistema de ar condicionado tipo *split* com um sistema VRV aplicados em um

prédio residencial. Para a operação em refrigeração, o sistema VRV apresentou consumo 30% menor ao *split*, enquanto que, no modo aquecimento a economia do VRV resultou em 10,5%. Da análise econômica foi concluído que durante os primeiros 30 anos não foi possível recuperar o investimento com o sistema VRV.

Souza [16] avalia o consumo energético de um sistema VRV e um sistema a Água Gelada a serem aplicados a um prédio histórico da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), utilizando o *EnergyPlus*. Como resultado, foi obtido um consumo elétrico 22,4% menor para o sistema VRV. Da mesma forma, Baggio [17] compara a diferença de consumo de energia de um prédio do foro central de Porto Alegre inicialmente atendido por dois grupos de água gelada, com um novo sistema formado por equipamentos do tipo VRV. Através da análise, foi concluído que o consumo energético do sistema VRV é 25% menor que o consumo do sistema de água gelada. Da mesma forma, Zanata e Dutra [18] fazem uma comparação entre o sistema VRV e o sistema de Água Gelada, utilizando o *software Trace*. Chegando à conclusão de que os sistemas VRV são mais adequados para aplicações de pequeno porte, sendo que o limiar para escolha está em torno de 200 a 300 TR.

Passando aos trabalhos estrangeiros, Aynur et. al. [19], comparam mediante simulações no *EnergyPlus* o sistema de condicionamento de ar central de Volume de Ar Variável (VAV) com um sistema VRV para um prédio em Maryland (EUA), durante o verão; verificou-se que o sistema VRV prometeu potenciais de poupança de energia entre 27,1 e 57,9%, dependendo da configuração e das condições interior e exterior. Zhou et al. [20] simularam um edifício de escritórios em Shangai, China, obtendo como resultado que o sistema VRV economiza 22,2% e 11,7%, quando comparado com um sistema (VAV) e um sistema com *fan coils*, respetivamente.

Com relação à aplicação de películas de controle solar, foram constatados os trabalhos que seguem. Pereira [21] estuda a influência que alguns parâmetros físicos têm no desempenho termoenergético de uma edificação, através de simulação no *EnergyPlus*. Entre os parâmetros avaliados, encontra-se a aplicação de diferentes tipos de películas nos vidros, quando, por sua vez, são variadas a área envidraçada nas proporções 1/3, 2/3 e 3/3, localização geográfica e orientação. Das cidades simuladas, Porto Alegre possui o perfil de temperatura anual mais parecido com Foz do Iguaçu. Para um prédio localizado em Porto Alegre, com azimute de 45°, a simulação que apresentou maior redução no consumo de ar condicionado, foi a da película de controle solar cinza escuro (transmitância visível = 0,0855) aplicada sobre vidro simples, resultando em, 12,4%, 20,5% e 26,0% para os prédios 1/3, 2/3 e 3/3, respetivamente. De forma análoga, o consumo elétrico total foi reduzido em 4,9, 8,6 e 11,5%.

Yin et. al. [22] simularam um prédio comercial com uma grade fachada de parede de cortina no eQUEST, com o objetivo de quantificar a economia de energia obtida através da aplicação de películas de controle solar. Os resultados indicaram que os fatores que amplamente influenciam no efeito das películas foram a posição da janela e a configuração das áreas envidraçadas. Para um sistema de vidraçaria utilizando vidro duplo low-E (So-

lar Heat Gain Coefficient - SHGC = 0,548), a carga térmica através das janelas foi reduzida em 2,2% e 27,5%, e o consumo de energia elétrica em 2% e 8%, para películas aplicadas dentro (SHGC = 0,473) e fora (SHGC = 0,352), respectivamente.

Jahromi et. al. [13] simularam o impacto da aplicação de películas de controle solar em um hotel do Reino Unido. As películas simuladas são a *Prestige 40* e *Prestige 70* da 3M. O estudo resultou em uma redução do consumo anual de 2%, no entanto, o consumo em refrigeração foi reduzido 35%. Do mesmo modo, Li et. al. [23] desenvolveram e validaram experimentalmente um modelo no *EnergyPlus* para avaliar o potencial de redução no consumo de eletricidade da aplicação de películas de controle solar em Hong Kong. No geral, a melhor combinação foi a que utilizou vidro claro e película de controle solar com transmitância solar total igual a 34%, aplicada na face interna. Esse arranjo deu por resultado uma redução no consumo em ar condicionado de 13,1%.

Li et. al. [24] estudaram o comportamento da iluminação e carga térmica de um escritório aberto para avaliar o efeito das películas de controle solar junto com controle da iluminação. O conjunto dessas alternativas trouxe uma economia de 21,2% em iluminação e 6,9% em refrigeração.

Wang et. al. [25] avaliaram o consumo energético de um Instituto de Arte em Chicago, propondo sugestões para otimizar o desempenho energético. Entre as propostas, foi simulado o uso de películas de controle solar. O modelo base utilizou vidros com SHGC igual a 0,40, quando aplicadas películas solares Low-E com SHGC da janela igual a 0,15; foi obtida uma economia de energia igual a 3,7%.

### 3. Metodologia

A primeira etapa do trabalho consistiu em criar um modelo do edifício no *EnergyPlus*, que simule o comportamento do consumo de energia elétrica ao longo do ano. A fidelidade da simulação será validada mediante comparação com o consumo real. A segunda etapa, objetivou dimensionar o novo sistema de ar condicionado e escolher as películas de controle solar, para finalmente, quantificar a economia de energia obtida através das simulações. Também foi realizada uma análise econômica para determinar se a aplicação deste tipo de soluções no Brasil, ainda sofisticadas, são realmente viáveis.

#### 3.1. Desenvolvimento do modelo

A biblioteca possui uma área construída de 2.263 m<sup>2</sup>, está orientada ao norte com azimute zero, na cidade de Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil. Segundo a classificação de Köppen-Geiger, o clima de Foz é subtropical sem estação seca - Cfa. Segundo a NBR 15220 parte 3, a cidade se encontra na zona bioclimática 3 [26]. O funcionamento do acervo bibliográfico é de segunda a sexta-feira das 8:00 às 21:30 h, e sábados das 8:00 às 12:00 h; o horário das salas administrativas é de segunda a sexta-feira das 8:00 às 12:00 h e das 13:00 às 17:00 h. O auditório utiliza-se uma vez por semana, das 8:00 às 14:00 h.

#### 3.1.1. Arquivo climático

Os dados do arquivo climático utilizado provém da estação meteorológica localizada no aeroporto de Foz do Iguaçu, código 86925, e foram registrados pelo INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), no período 2001-2010 [27]. O método utilizado para a geração do arquivo climático é o Ano Meteorológico Típico (*Typical Meteorological Year - TMY*), onde são selecionados os meses mais expressivos que ocorreram no período medido, resultando assim em um ano formado por meses de anos diferentes.

#### 3.1.2. Zonas térmicas

A planta do prédio foi dividida em 41 zonas térmicas, de acordo com a disposição dos condicionadores de ar atualmente instalados (Fig. 1). Adicionalmente, cada espaço entre o forro e a cobertura foi definido como uma outra zona térmica. Assim sendo, o edifício ficou conformado por 66 zonas térmicas. As zonas habitadas podem ser classificadas como segue:

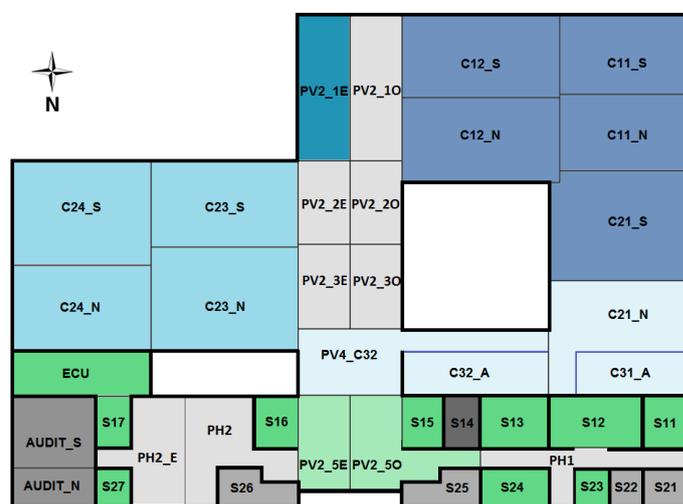


Figura 1: Divisão do prédio em zonas térmicas. (Traço grosso - parede divisória, traço fino - limite imaginário, cor azul - piso superior).

- **Acervo bibliográfico:**

C11\_S, C11\_N, C12\_S, C12\_N, C21\_S;

- **Permanência de alunos:**

Cúpulas maiores: C23\_S, C23\_N, C24\_S, C24\_N;

Cúpulas menores: C21\_N, C31\_A, PV4\_C32, C32\_A;

Coredor: PV2\_1E;

- **Recepção:**

PV2\_5E, PV2\_5O;

- **Salas administrativas:**

S11, S12, S13, S15, S16, S17, S23, S24, S27, ECU;

- **Auditório:**

AUDIT\_S, AUDIT\_N;

- **Corredores:**  
PV2\_10, PV2\_2E, PV2\_2O, PV2\_3E, PV2\_3O, PH1, PH2, PH2\_E;
- **Banheiros:**  
S21, S22, S25, S26;
- **Datacenter:**  
S14.

### 3.1.3. Modelo geométrico

O modelo geométrico da figura 2, foi criado no *EnergyPlus*, ingressando as coordenadas dos vértices de cada superfície. Para construí-lo foram utilizadas diversas plantas e cortes do projeto arquitetônico, e considerados os elementos de sombreamento (cor roxo).

### 3.1.4. Características construtivas: envoltória, cobertura e piso

Na tabela 1 são descritos os materiais de construção, conforme especificações técnicas do projeto arquitetônico. Na tabela, as camadas de material encontram-se descritas em ordem crescente de fora para dentro. As principais propriedades termofísicas, comprimento -  $L$ , condutividade -  $k$ , densidade -  $\rho$ , calor específico -  $cp$  e resistência térmica -  $R$ , foram consultadas, em sua maioria, dos *Handbooks* da ASHRAE [28].

### 3.1.5. Características construtivas: esquadrias

Na tabela 2 se encontram as propriedades e os tipos de vidro utilizados nas esquadrias. Adicionalmente, na construção do modelo foram ingressados os marcos e travessas, conforme as dimensões do projeto arquitetônico e propriedades termofísicas apontadas em [33].

As janelas localizadas nas paredes laterais superiores das cúpulas possuem brises horizontais de proteção solar executados com ripas de madeira de 2,5 x 5 cm. Considerando o ângulo de inclinação das ripas como sendo o ângulo formado entre a normal exterior ao vidro e a normal exterior à ripa (*slat angle*), as janelas orientadas ao norte possuem inclinação de 87° e as orientadas ao leste e oeste 55°. Ambos tipos de brises foram modelados no programa como sendo elementos de sombreamento externo às janelas e com propriedades termofísicas padrão para persiana com ripas de baixa refletividade [34].

### 3.1.6. Ganhos internos

#### Ocupação de Pessoas

Baseado na contagem de pessoas no local e no calendário acadêmico da Universidade que mais utiliza as instalações, para as áreas de permanência de alunos, a recepção e as salas administrativas, o ano foi dividido em períodos de ocupação fixa ao longo do ano e ao longo do dia, apresentados nas tabelas 3, 4 e 5. Foi adotado que cada pessoa que se encontra nessas zonas, gera 117 W de calor, correspondente à taxa metabólica para uma pessoa digitando [35]. Para as zonas do acervo foi considerada uma pessoa das 10 às 18:00 h com taxa metabólica de 207 W, correspondente a uma pessoa caminhando [35]. Para o auditório considerou-se uma área de 0,7 m<sup>2</sup> por pessoa [36] e

taxa metabólica de 108 W correspondente à uma pessoa sentada [35]. Para os sábados foi considerada a permanência de uma pessoa nas zonas C23 e C24 e recepção das 8:00 às 12:00 h.

#### Iluminação

A quantidade de lâmpadas foi contabilizada a partir do projeto luminotécnico. Existem cinco tipos de lâmpadas, as quais são apresentadas na tabela 6. Para determinar a hora de acender as lâmpadas de tubo fluorescente e refletores das zonas de permanência de alunos, acervo bibliográfico e corredores, o ano foi dividido em cinco períodos de acordo com o pôr do sol, assim, considera-se que estas luminárias são acesas na hora indicada na tabela 7 e desligadas às 21:30 h. As salas administrativas, auditório e banheiros possuem luzes do tipo tubo fluorescente e são acesas durante seus respectivos períodos de funcionamento. Estimou-se que os banheiros da administração utilizam-se 30% do tempo, e os banheiros principais o tempo inteiro. Considerou-se que as lâmpadas espiral se encontram acesas das 8:00 às 11:00 h, das 11:00 às 16:00 h, metade delas, e das 16:00 às 21:30 h todas. As luzes da recepção encontram-se acesas durante todo período de funcionamento e a iluminação exterior é ligada das 18:00 às 8:00 h.

#### Equipamentos elétricos

Para computadores de escritório e *notebooks* foi adotado o método de cálculo Watts/Pessoa, a percentagem de pessoas utilizando os mesmos é baseada em visitas feitas *in loco*. Por simplicidade e a exceção do *datacenter*, o consumo mensal do restante de equipamentos será somado ao consumo total simulado mensalmente. Na tabela 8 é apresentada a lista de aparelhos elétricos.

#### Infiltração

Nos ambientes condicionados foi utilizada uma taxa de infiltração de 3,0 m<sup>3</sup>/h por metro de fresta para janelas basculantes e 6,5 m<sup>3</sup>/h por metro de fresta para portas bem ajustadas [9]. Para portas com passagem de pessoas foi utilizada a taxa de 4 m<sup>3</sup>/h por pessoa, a quantidade de pessoas que transpõem as portas foi estimada conforme tabela 9.

### 3.1.7. Condicionadores de ar

Os condicionadores de ar atualmente instalados foram ingressados na categoria *HVACTemplate: System: Unitary*, indicada para a modelagem de sistemas *split* residenciais [35]. Os dados disponíveis no catálogo do fabricante e que foram ingressados no *EnergyPlus* estão na tabela 10, para o restante de informações requeridas foram utilizados os valores padrão sugeridos pelo programa.

A temperatura dos termostatos foi considerada como sendo constante durante certos períodos do ano. A estimativa foi baseada na temperatura média de uso dos condicionadores de ar e a temperatura média para Foz do Iguaçu, conforme tabela 11. Considerou-se que, os condicionadores de ar ficam ligados durante o horário de funcionamento de cada dependência; a exceção dos meses frios, junho e julho, em que estimou-se que os mesmos são ligados no período das 13:00 às 18:00 h.

### 3.1.8. Resultado da simulação do modelo base

A simulação do modelo construído de acordo com os itens previamente detalhados, deu por resultado os consumos mensais

Tabela 1: Composição das superfícies e propriedades termofísicas dos materiais de construção.

Superfície	Camada	Material	L (m)	k (W/m-K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	cp (J/kg-K)	R (m <sup>2</sup> -K/W)	Fonte
Porta dupla	1	Laminado de cedro	0,0500	0,120	540	1210	-	[29]
Parede de concreto (abaixo janela cupulas)	1	Concreto	0,3000	1,630	2400	1050	-	[29]
Parede de madeira (arriba janela cupulas)	1	Revestimento madeira	0,0127	0,090	592	1170	-	[28]
	2	Madeira maciça	0,1400	0,141	559	1630	-	[29]
Entrepiso	1	Placa OSB	0,1500	0,072	700	1880	-	[28]
	2	Camada de ar (ascendente)	>0,05	-	-	-	0,140	[30]
	3	Chapa laminada	0,0150	0,120	540	1210	-	[29]
	4	Tábuas maciças	0,0200	0,172	704	1630	-	[29]
Piso de madeira	1	Brita nº2	0,2500	0,700	1500	800	-	[30]
	2	Manta impermeabilizante	0,0030	-	-	-	0,026	[28]
	3	Argamassa 3:1	0,0800	1,150	2100	1000	-	[30]
	4	Camada de ar (ascendente)	0,0100	-	-	-	0,150	[30]
	5	Chapa laminada	0,0150	0,120	540	1210	-	[29]
Parede 15cm	6	Tábuas maciças	0,0200	0,172	704	1630	-	[29]
	1	Reboco argamassa 1:5 20% cimento	0,0150	0,480	1440	840	-	[28]
	2	Chapisco cimento e areia 1:3	0,0070	0,720	1860	840	-	[28]
	3	Tijolo maciço	0,1020	0,895	1920	790	-	[29]
	4	Chapisco cimento e areia 1:3	0,0070	0,720	1860	840	-	[28]
	5	Reboco argamassa 1:5 20% cimento	0,0150	0,480	1440	840	-	[28]
Parede 30cm	1	Reboco argamassa 1:5 20% cimento	0,0150	0,480	1440	840	-	[28]
	2	Chapisco cimento e areia 1:3	0,0070	0,720	1860	840	-	[28]
	3	Blocos cerâmicos	0,2500	-	-	-	0,390	[29]
	4	Chapisco cimento e areia 1:3	0,0070	0,720	1860	840	-	[28]
	5	Reboco argamassa 1:5 20% cimento	0,0150	0,480	1440	840	-	[28]
Piso de granitina	1	Brita nº2	0,2500	0,700	1500	800	-	[30]
	2	Manta impermeabilizante	0,0030	-	-	-	0,026	[28]
	3	Argamassa 3:1	0,0800	1,150	2100	1000	-	[30]
	4	Cimento	0,0070	0,720	1860	840	-	[28]
	5	Granitina	0,0250	-	-	-	0,014	[28]
Laje com cobertura de brita	1	Brita	0,0400	0,700	1500	800	-	[30]
	2	Nata 1:6	0,0010	-	-	-	0,013	[29]
	3	Argamassa 1:4	0,0300	0,720	1860	840	-	[28]
	4	Manta asfáltica	0,0040	-	-	-	0,026	[28]
	5	Regularização	0,0200	-	-	-	0,026	[29]
	6	Laje	0,0750	-	-	-	0,140	[28]
Forro de chapa de OSB	1	Impermeabilização pintura asfáltica	-	-	-	-	0,026	[28]
	2	Placa OSB	0,1000	0,072	700	1880	-	[28]
	3	Camada de ar (descendente)	>0,05	-	-	-	0,210	[30]
	4	Impermeabilização pintura asfáltica	-	-	-	-	0,026	[28]
	5	Placa OSB	0,0250	0,072	700	1880	-	[28]
Cobertura	1	Telha tetrapack	-	-	-	-	0,037	[29]
Forro vertical abaixo dos zenitais	1	Placa OSB	0,1000	0,072	700	1880	-	[28]
	2	Lã de rocha	0,0500	0,036	30	840	-	[29]
	3	Placa OSB	0,1000	0,072	700	1880	-	[28]
Teto dos zenitais	1	Vidro pintado	0,0080	0,700	2800	750	-	[31]
Marco dos zenitais	1	Aço	0,0100	60,500	7854	434	-	[31]
Forro de gesso	1	Gesso	0,0190	0,160	800	1090	-	[29]
Laje com cobertura de argila expandida	1	Argila expandida	0,1000	0,128	450	950	-	[32]
	2	Nata 1:6	0,0010	-	-	-	0,013	[29]
	3	Argamassa 1:4	0,0300	0,720	1860	840	-	[28]
	4	Manta asfáltica	0,0040	-	-	-	0,026	[28]
	5	Regularização	0,0200	-	-	-	0,026	[29]
	6	Laje	0,0750	-	-	-	0,140	[28]
Cobertura da recepção	1	Brasilit	-	-	-	-	0,037	[29]
	2	Vidro	0,0080	0,700	2800	750	-	[31]
Portas internas	1	Laminado de cedro	0,0400	0,114	425	1630	-	[29]

Tabela 2: Propriedades dos vidros.

Tipo abertura	Tipo de Vidro	Vidro adotado	L (mm)	Transmitância solar - $T_{sol}$	Transmitância Visível - $T_{vis}$	k (W/m-K)	Fonte
Janela Fixa	Temperado	CLEAR 6mm	6	0,775	0,881	0,9	[29]
Janela Vitrine	Temperado	#4215 8mm	8,08	0,742	0,878	0,854	[33]
Porta Vidro	Temperado	#4216 10mm	10,08	0,713	0,868	0,879	[33]
Zenital com Vidro leitoso	Leitoso	#14468	7,8	0,248	0,632	1	[33]

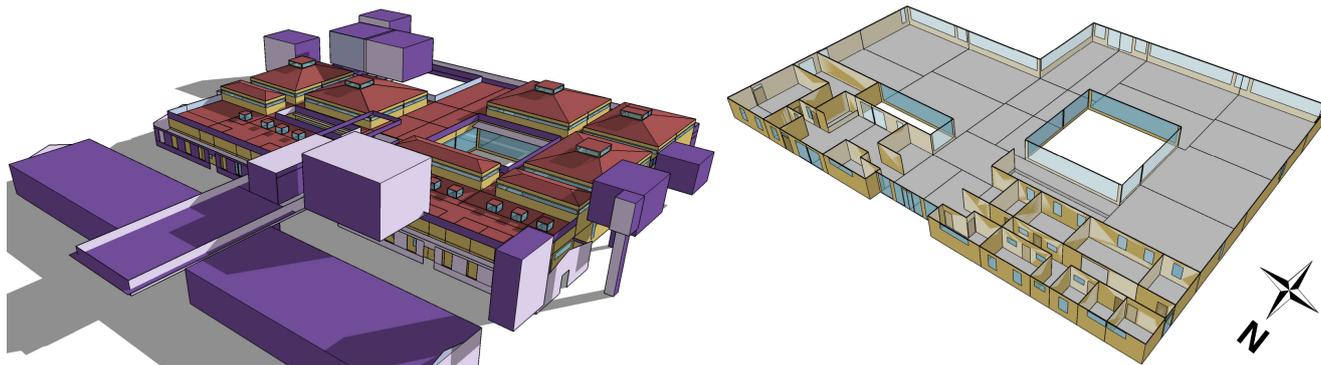


Figura 2: Modelo geométrico feito no *EnergyPlus*.

Tabela 3: Quantidade de pessoas nas estações de estudo ao longo do ano e ao longo do dia.

Zona	DD1 seg.- sex. (até: 8h)	DD1 seg.- sex. (até: 10h)	DD1 seg.- sex. (até: 18h)	DD1 seg.- sex. (até: 00h)	DD3 seg.- sex. (até: 8h)	DD3 seg.- sex. (até: 10h)	DD3 seg.- sex. (até: 18h)	DD3 seg.- sex. (até: 9:30h)	DD3 seg.- sex. (até: 00h)	DD4 seg.- sex. (até: 8h)	DD4 seg.- sex. (até: 10h)	DD4 seg.- sex. (até: 18h)	DD4 seg.- sex. (até: 9:30h)	DD4 seg.- sex. (até: 00h)	DD2 seg.- sex. (até: 8h)	DD2 seg.- sex. (até: 10h)	DD2 seg.- sex. (até: 18h)	DD2 seg.- sex. (até: 9:30h)	DD2 seg.- sex. (até: 00h)
PV2_1E	0	1	1	0	0	1	6	1	0	0	2	7	2	0	0	1	1	1	0
C21_N	0	0	2	0	0	1	4	1	0	0	2	7	2	0	0	0	2	0	0
C31_A	0	0	2	0	0	1	4	1	0	0	2	7	2	0	0	0	2	0	0
PV4_C32	0	1	3	0	0	2	5	1	0	0	3	7	3	0	0	1	3	1	0
C32_A	0	1	3	0	0	2	5	1	0	0	3	7	3	0	0	1	3	1	0
C23_S	0	1	2	0	0	2	10	2	0	0	4	12	4	0	0	1	3	1	0
C23_N	0	1	2	0	0	2	10	2	0	0	4	12	4	0	0	1	3	1	0
C24_S	0	1	2	0	0	2	10	2	0	0	4	12	4	0	0	1	3	1	0
C24_N	0	1	2	0	0	2	10	2	0	0	4	12	4	0	0	1	3	1	0

DD1 = (1/1 a 5/3)\* e (23/12 a 31/12)\*; DD3 = (6/3 a 14/6) \*\* e (31/7 a 14/11)\*\*\*; DD4 = (15/6 a 14/7)\*\* e (15/11 a 14/12)\*\*\*; DD2 = (15/7 a 24/7)\*\* e (15/12 a 22/12)\*\*\*. \* Férias letivas discentes; \*\* Primeiro semestre letivo de 2017; \*\*\* Segundo semestre letivo de 2017.

Tabela 4: Quantidade de pessoas na recepção ao longo do ano e do dia.

Zona	DDR1 seg. - sex. (até: 8h)	DDR1 seg. - sex. (até: 18h)	DDR1 seg. - sex. (até: 00h)	DDR2 seg. - sex. (até: 8h)	DDR2 seg. - sex. (até: 18h)	DDR2 seg. - sex. (até: 9:30h)	DDR2 seg. - sex. (até: 00h)
PV2_5O	0	3	0	0	3	1	0
PV2_5E	0	3	0	0	3	1	0

DDR1 = (1/1 a 5/3)\* e (23/12 a 31/12)\*; DDR2 = (6/3 a 22/12)\*\*.  
\* Férias letivas discentes; \*\* Período de aulas.

Tabela 5: Ocupação das salas administrativas ao longo do ano.

Salas admin. Seg. a Sex. 8-12 e 13-17 h	S11	S12	S13	S15	S23	S24	S17	S27	ECU
	1	1	3	2	2	2	2	1	6

apresentados na tabela 12. Os valores exibidos já consideram a soma da energia gasta pelos aparelhos elétricos secundários que não foram adicionados diretamente ao programa.

### 3.2. Validação do modelo

Na validação do modelo foram comparados o consumo mensal simulado com o consumo medido, do qual dispõem-se medições de novembro de 2016 a maio de 2017. Essas medições são a soma do consumo do prédio simulado e do consumo das salas de professores e alunos que se encontram dispostas em dois blocos, oeste e leste, respectivamente, na frente da edificação (Fig. 2, cor roxo). Optou-se por separar as salas do prédio principal, por estarem em processo de reforma. Para quantificar o gasto energético dessas salas foram simuladas separadamente três salas modelo: sala de estudo de alunos, sala de professores antes da reforma e sala de professores após reforma (condicionador de ar mais eficiente, nova orientação e vidro da janela opaco). Para totalizar o consumo, foram divididos em períodos; o ano, a partir da quantidade de salas em funcionamento e calendário acadêmico; e o dia, de acordo com a variação ocupacional. A seguir são listados uma série de acontecimentos inusuais que ocorreram durante a coleta das medições de consumo e que devem ser considerados na validação do modelo.

Tabela 6: Luminárias

Tipo de lâmpada	Potência (W)	Espaço	Fração radiante	Fração visível
Tubo fluorescente - Embutidas no forro	32	Interior e exterior	0,37	0,18
Tubo fluorescente - Forro rebaixado acrílico	32	Interior e exterior	0,37	0,18
Refletores - Fixados nas vigas	30	Cúpulas e recepção	0,72	0,18
Fluorescente espiral - Pendentes	85	Cúpulas grandes	0,42	0,18
Fluorescente compacta - Pendentes	20	Cúpulas pequenas	0,42	0,18
Fluorescente compacta - Fixadas nas vigas	7	Exterior	0,72	0,18

Tabela 7: Hora em que são ligadas as lâmpadas ao longo do ano.

Mês	Hora do pôr do sol	Hora de acender a luz
Janeiro	20:30	-
Fevereiro	20:13	-
Março	18:43	18:00:00
Abril	18:07	17:30:00
Mai	17:40	17:00:00
Junho	17:32	17:00:00
Julho	17:42	17:00:00
Agosto	18:00	17:30:00
Setembro	18:16	17:30:00
Outubro	18:34	18:00:00
Novembro	19:59	19:00:00
Dezembro	20:22	19:00:00

- Condicionadores de ar das zonas PV2\_20 e PV2\_30, fora de serviço;
- Novembro: Greve dos funcionários da biblioteca, horário de funcionamento alterado para 8:00 às 18:00 h;
- Novembro: Começo da reforma das salas do bloco leste. Salas de estudo de alunos fechadas, salas de professores funcionando normalmente no bloco oeste;
- Final de Novembro e começo de Dezembro: Greve de professores, uso das salas afetado;
- Janeiro: Brises das janelas das cúpulas retirados;
- Fevereiro: Começo da reforma do bloco oeste. Habilitação das salas de estudo de alunos e mudança das salas de professores para a ampliação feita no bloco leste;
- Fevereiro: Reposições de aulas referentes ao segundo semestre de 2016 e consequente aumento da ocupação de pessoas;
- Fevereiro: Semana de inventário de livros, horário de funcionamento alterado para 8:00 às 21:00 h;
- Abril: No ano 2017, esse mês apresentou temperaturas mais baixas que o ano meteorológico típico (Fig. 3), consequentemente, os condicionadores de ar permaneciam desligados pela manhã. Considerando esta ocorrência, o *schedule* de funcionamento dos condicionadores de ar neste mês, foi corrigido para o horário de 13:00 a 21:20 h.

Corrigindo o modelo base de acordo com as eventualidades ocorridas ao longo do ano 2016/2017, e somando aos resultados

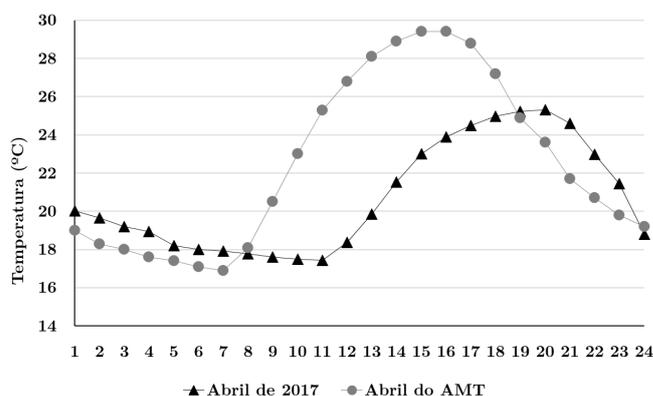


Figura 3: Discrepancia da temperatura média de abril de 2017 e do AMT.

o consumo das salas exteriores, é possível comparar os resultados da simulação com os dados medidos, assim foram obtidos os resultados da tabela 13.

Cabe salientar que as propostas de melhoria serão para o prédio central, sem levar em consideração às salas da frente. Além disso, como as eventualidades ocorridas em 2016/2017, não voltarão a se repetir no futuro, para os cálculos de economia de energia, se utilizara o modelo base, o qual considera que no ano não ocorrem eventos extraordinários e não considera o consumo das salas de estudo e professores.

### 3.3. Alterações propostas

#### 3.3.1. Ar condicionado do tipo multi-split

Para dimensionar o sistema, o VRV foi simulado em modo *autosize*, e assim obtidas as máximas potências de refrigeração e aquecimento para cada ambiente. Essa simulação foi rodada utilizando os dias de projeto estatísticos definidos pela ASHRAE [43]. No inverno, o dia típico de projeto é 21 de junho, e no verão: 21 de dezembro, 21 de janeiro e 21 de março, devido às posições solares diferentes [9]. Escolheu-se trabalhar com a frequência de ocorrência cumulativa anual 0,4% para o verão, e 99,6% para o inverno, recomendadas para instalações de alto nível. A carga térmica para aquecimento é muito menor que a carga de refrigeração, portanto, as unidades evaporadoras foram selecionadas a partir das máximas potências de refrigeração. As unidades escolhidas são da marca LG, e suas principais características encontram-se na tabela 14, junto à carga térmica de cada espaço.

A conexão das unidades internas à unidade externa levou em consideração: o *Corrected Capacity Ratio* - CCR (Eq. 1),

Tabela 8: Relação de equipamentos elétricos.

Equipamento	Potência (W)	Quantidade	Regime de uso	Espaço	Fração radiante	Consumo (kWh/mês)	Fonte
Computador Escritório	150	-	30 % das pessoas que se encontram na zona	Sul das cúpulas maiores	0,3	-	Local
Computador Escritório	120	-	100 % das pessoas que se encontram na zona	Salas administrativas e recepção	0,3	-	Local
Notebook	35	-	40 % das pessoas que se encontram na zona	Norte das cúpulas maiores, cúpulas menores e corredor.	0,3	-	[37]
Datacenter	4000	1	24h	ZT_S14	-	-	[38] [39]
Modem	12	12	24h	-	-	4,32	[40]
Telefone	3	14	60min/dia	-	-	0,924	[40]
Impressora	15	5	60min/dia	-	-	1,65	[40]
Bebedouro	-	1	24h	-	-	23	[41]
Geladeira	-	1	24h	-	-	30,8	[41]
Microondas	1200	1	20min/dia	-	-	26,4	[40]
Cafeteira	600	1	60min/dia	-	-	13,2	[40]

Tabela 9: Pessoas que transpõem as portas de acesso ao recinto.

Porta	Periodo	8:00 a 10:00 h	10:00 a 12:00 h	12:00 a 18:00 h	18:00 a 21:30 h
Entrada	Férias - pessoas/hora seg. a sex.	6	9	9	-
Entrada	Aulas - pessoas/hora seg. a sex.	20	60	60	20
Entrada	Aulas - pessoas/hora sab.	6	6	-	-
Laterais	Ano inteiro - pessoas/hora	1	1	1	-

o *Combination Ratio* - CR (Eq. 2), a proximidade, a confiabilidade do sistema, e os mesmos horários de funcionamento. Na sala S14 e no auditório, foram mantidos os condicionadores *split*, por ambos os espaços possuem horários diferenciados de funcionamento. Na figura A.11 do Apêndice A encontra-se um diagrama com o posicionamento das unidades condensadoras.

Na tabela 15, encontram-se as características das unidades selecionadas, os parâmetros usados para comprovar o correto dimensionamento do sistema (CCR e CR) e carga térmica. Cabe ressaltar que, no caso de sistemas *multi-split*, a carga térmica do sistema central é a carga máxima simultânea do conjunto de unidades servidas pelo sistema, e não é necessariamente a soma dos máximos das zonas, que podem não ocorrer simultaneamente [9]. O fator de correção foi extraído do *Performance Data Manual* [45] em base ao comprimento da linha de refrigerante e diferença de elevação.

$$CCR(\%) = \frac{\text{Carga térmica simultânea}}{\text{Capacidade corrigida da un. ext.}} \leq 100\% \quad (1)$$

$$CR(\%) = \frac{\text{Soma da capacidade nom. das un. int.}}{\text{Un. ext. ao serviço}} \leq 50 - 130\% \quad (2)$$

Uma vez escolhidos os equipamentos comerciais, o modelo em *autosize* foi preenchido com os dados do catálogo do fabricante e com os modelos de *EnergyPlus* disponíveis na *Building Component Library* [46] da NREL (*National Renewable Energy Laboratory*), os quais contém as curvas de desempenho à carga total e parcial, para operação em resfriamento e aquecimento.

### 3.3.2. Películas nos vidros

Foram escolhidas películas de controle solar da 3M, por serem comercializadas no Brasil e pela confiabilidade da marca. Elegeram-se três séries diferentes: *prestige*, *ceramic* e *neutral* [47]. A *prestige* é o último lançamento, oferece a melhor relação entre aproveitamento da luz natural e redução de calor, com a menor reflexividade. A *ceramic* não rejeita tanta energia quanto a primeira e é mais refletiva. A *neutral* é a classe tradicional de película com metais na sua composição e é a que apresenta a menor transmissão de luz visível. As propriedades óticas das películas foram obtidas da biblioteca do programa *Berkeley Lab Window v7.5.11.0* [33], na tabela 16 são mostradas essas propriedades junto às propriedades físicas de cada película.

As películas foram colocadas na parte posterior do prédio, quer dizer, deixando fora as áreas administrativas, auditório e recepção, já que as mesmas apresentam diversos elementos de sombreamento. Desta forma as películas de controle solar foram adicionados nas janelas e clarabóias orientadas ao leste, norte e oeste da região do acervo bibliográfico, permanência de alunos e corredor central. A fachada sul foi deixada fora por ser a menos ensolarada.

### 3.3.3. Ar Condicionado VRV e Películas nos vidros

Nesta seção são simuladas juntas as duas propostas anteriores, quer dizer, o sistema VRV junto com películas de controle solar nos vidros. Escolheu-se trabalhar com a película *Neutral 35*, por ser o modelo mais barato e que transmite uma quantidade aceitável de luz visível.

## 4. Resultados e discussões

Na figura 4 é apresentado o consumo elétrico mensal do modelo base e as três propostas sugeridas. No caso das películas de controle solar, o resultado corresponde à simulação com a película *Neutral 35*. Para maiores detalhes, na tabela B.24 do Apêndice B, encontram-se os valores separados do consumo dos equipamentos elétricos e iluminação, do consumo de ar condicionado, assim como o consumo total e porcentagens de economia de energia mensal que proporciona cada uma das alternativas.

Tabela 10: Condicionadores de ar atualmente instalados no prédio.

Tipo	Cassette	Cassette	Piso - teto	Hi-Wall	Hi-Wall	Piso-teto
Capacidade nominal refrigeração (Btu)	46.000	46.000	30.000	18.000	12.000	60.000
Capacidade nominal aquecimento (Btu)	-	44.000	-	-	-	-
COP (W/W)	2,94	2,88	2,78	3,01	3,01	2,88
Vazão ventilador unidade evaporadora (m³/h)	1.900	1.900	1.090	800	580	2.295
Quantidade	10	7	8	10	4	4
Local	Cupulas maiores e acervo	PV2.1:4	Cupulas menores e recepção	Administração S	Administração N	Auditório e corredor E

Tabela 11: Temperatura média compensada para Foz do Iguaçu [42] e temperatura de uso dos condicionadores de ar.

	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
Temperatura de bulbo seco (°C)	25,5	25,4	23,8	20,8	17,7	15,8	15,7	17,5	19	21,4	23,1	25,1
Temperatura de uso do termostato refrigeração (°C)	18	18	18	19	19	21	21	19	19	19	18	18
Temperatura de uso do termostato aquecimento (°C)	17	17	17	18	18	20	20	18	18	18	17	17

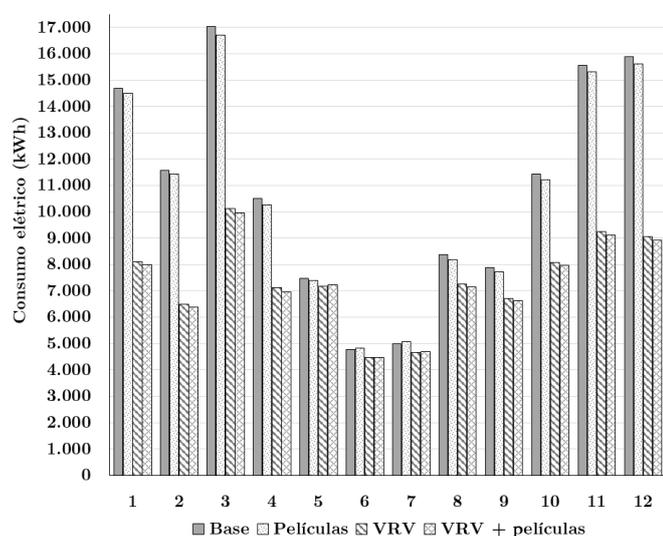


Figura 4: Consumo elétrico mensal das alternativas propostas.

#### 4.1. Sistema atual: Ar condicionado split

No gráfico da figura 5 é apresentado o consumo mensal de energia elétrica discriminado por serviço, para o modelo base. O consumo de condicionamento de ar é dado pela soma da refrigeração, aquecimento e ventiladores. Observa-se que nos meses quentes a participação do condicionamento de ar no consumo é bem superior ao resto dos serviços. Em janeiro e fevereiro, o consumo é inferior aos outros meses de verão, devido ao período de funcionamento do estabelecimento ser menor nesses dois meses, logo, o mês de maior consumo é março, totalizando 17.027 kWh, dos quais 14.257 kWh (86,7%) correspondem ao condicionamento de ar. Conforme a temperatura média ambiente decresce (tab. 11), o consumo em refrigeração, também diminui. Como a maioria dos *split* são somente para refrigeração, e como, nos meses mais frios, junho e julho, foi estabelecido que o ar é ligado metade do dia (13:00 às 18:00 h), o consumo nos meses de inverno cai abruptamente. O menor consumo é no mês de junho, totalizando 4.771 kWh, dos quais 1.727 kWh (36%) correspondem ao condicionamento de ar.

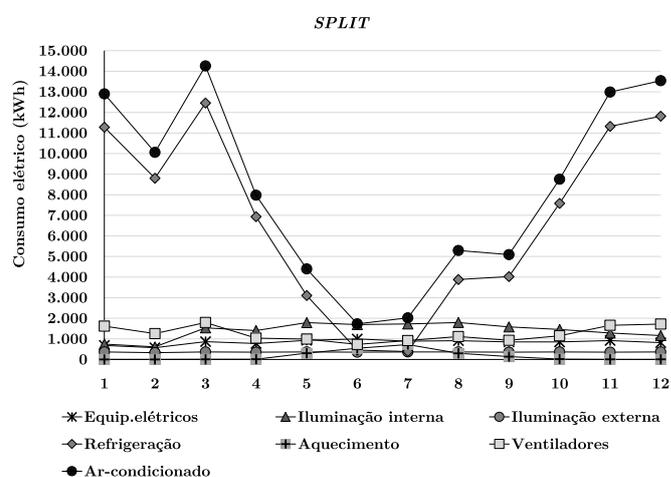


Figura 5: Consumo de energia elétrica mensal por serviço para o modelo base.

A figura 6 mostra a participação em porcentagem de cada serviço no consumo total anual, observa-se novamente, a grande parcela do ar-condicionado, correspondente a 76,07% do total (entre refrigeração, aquecimento e ventiladores).

#### 4.2. Proposta 1: Ar condicionado VRV

Como mostra a figura 7, o perfil de consumo é igual ao do caso base, porém com a substituição do sistema *split* pelo VRV, obteve-se uma economia de energia em condicionamento de ar de aproximadamente 50% nos meses quentes, descendo para aproximadamente 20% nos meses mais frios (Apêndice B tab. B.24). O mês que mais consumiu continua sendo março, com 10.120 kWh, dos quais 7.350 são de condicionamento de ar (72,6%), apresentando uma redução de 40% com relação ao modelo base. O mês de menor consumo continua sendo junho com 4.485 kWh, dos quais 1.441 kWh (32%) são de condicionamento de ar. A redução no consumo de condicionamento de ar em junho foi somente 16,7%, devido ao sistema VRV operar em modo refrigeração e aquecimento. Apesar do sistema funcionar em modo aquecimento, o consumo continua sendo baixo, por causa do *schedule* de funcionamento ser o mesmo que para o caso base,

Tabela 12: Consumo de energia elétrica mensal para o modelo base.

	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
<b>Consumo (kWh)</b>	14.699	11.577	17.027	10.510	7.486	4.771	5.000	8.369	7.883	11.426	15.550	15.881

Tabela 13: Validação da simulação, resultados vs. medições.

	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
<b>Simulação (kWh)</b>	14.645	13.574	20.563	11.608	9.269	6.131	6.387	10.263	9.861	13.981	12.421	15.867
<b>Medidor (kWh)</b>	14.885	13.630	19.417	11.224	10.234	-	-	-	-	-	12.003	16.543
<b>Diferença (%)</b>	1,61	0,41	-5,90	-3,42	9,43	-	-	-	-	-	-3,48	4,09

Tabela 14: Características das Unidades Evaporadoras selecionadas [44] e carga térmica.

Ambiente	Modelo comercial	Tipo	Quant.	Capacidade de Refrigeração (Btu)	Carga térmica calculada (Btu)	Vazão m <sup>3</sup> /s
Conectadas à unidade exterior 1						
PV2_1E	ARUN423TMC4	Cassette	1	42.000	38.903	0,500
C24_S	ARUN283TPC4	Cassette	2	28.000	56.894	0,317
C24_N	ARUN283TPC4	Cassette	2	28.000	54.151	0,317
C23_S	ARUN483TMC4	Cassette	1	48.100	45.985	0,533
C23_N	ARUN363TNC4	Cassette	2	36.200	61.236	0,417
PV2_2E	ARUN123TNA4	Cassette	1	12.300	10.214	0,233
PV2_3E	ARUN093TNA4	Cassette	1	9.600	9.340	0,225
Conectadas à unidade exterior 2						
PV2_1O	ARUN243TNA4	Cassette	1	24.200	21.487	0,350
C31_A	ARUN243SCL4	hi-wall	1	24.200	23.860	0,230
C32_A	ARUN153SBL4	hi-wall	2	15.400	28.754	0,180
PV2_2O	ARUN243TNA4	Cassette	1	24.200	21.228	0,350
PV2_3O	ARUN363TNC4	Cassette	1	36.200	33.219	0,417
PV4_C32	ARUN283TPC4	Cassette	2	28.000	49.417	0,317
PV2_5E	ARUN363TNC4	Cassette	1	36.200	29.090	0,417
PV2_5O	ARUN423TMC4	Cassette	1	42.000	40.457	0,500
Conectadas à unidade exterior 3						
C12_S	ARUN283TPC4	Cassette	2	28.000	49.249	0,317
C12_N	ARUN483TMC4	Cassette	1	48.100	47.794	0,533
C11_S	ARUN423TMC4	Cassette	1	42.000	39.994	0,500
C11_N	ARUN363TNC4	Cassette	1	36.200	30.446	0,417
C21_S	ARUN363TNC4	Cassette	2	36.200	66.991	0,417
C21_N	ARUN363TNC4	Cassette	2	36.200	65.543	0,417
Conectadas à unidade exterior 4						
S17	ARUN123SBL4	hi-wall	1	12.300	12.366	0,159
S27	ARUN073SBL4	hi-wall	1	7.500	7.257	0,117
ECU	ARUN183SCL4	hi-wall	2	19.100	36.573	0,208
PH2_E	ARUN363TNC4	Cassette	1	36.200	34.340	0,417
PH2	ARUN363TNC4	Cassette	1	36.200	29.413	0,417
S16	ARUN153SBL4	hi-wall	1	15.400	14.352	0,175
Conectadas à unidade exterior 5						
S11	ARUN123SBL4	hi-wall	1	12.300	11.699	0,159
S12	ARUN183SCL4	hi-wall	1	19.100	17.128	0,208
S13	ARUN243SCL4	hi-wall	1	24.200	19.566	0,233
S15	ARUN123SBL4	hi-wall	1	12.300	11.798	0,159
S23	ARUN073SBL4	hi-wall	1	7.500	6.716	0,090
S24	ARUN153SBL4	hi-wall	1	15.400	12.637	0,175
SPH1	ARUN283TPC4	Cassette	1	28.000	25.582	0,317

das 13:00 às 18:00 h, sendo que nesse horário as temperaturas médias ambientes do arquivo climáticos são próximas às do setpoint do termostato.

#### 4.3. Proposta 2: Películas nos vidros

A simulação utilizando as películas de controle solar da tabela 16 deram como resultado os consumos mensais apresen-

tados no gráfico da figura 9. Em ordem decrescente, as películas que proporcionaram maior economia foram: *Neutral 20*, *Prestige 40*, *Ceramic 30*, *Neutral 35*, *Prestige 70*, conforme a redução térmica que cada um deles oferece. Cabe ressaltar que a redução térmica é proporcional à redução da transmissão de luz visível, e que quanto melhor a qualidade da película, mais luz visível deixará passar (cores mais claras) oferecendo a mesma redução

Tabela 15: Características das unidades condensadoras selecionadas [44] e carga térmica.

Unidade	Carga térmica calculada (Btu)	Carga max. simultânea (Btu)	Modelo comercial	Capacidade de refrigeração (Btu)	Fator de correção	Capacidade corrigida (Btu)	COP (W/W)	CCR (%)	CR (%)
1	276.723	253.500	ARUN288BTE4	288.000	0,97	279.360	3,34	90,7	102,9
2	247.512	209.986	ARUN264BTE4	264.000	0,97	256.080	3,37	82,0	103,7
3	300.017	257.421	ARUN312BTE4	312.000	0,97	302.640	3,3	85,1	104,8
4	134.300	127.289	ARUN144BTE4	144.000	0,97	139.680	3,54	91,1	101,3
5	105.126	87.675	ARUN096BTE4	96.000	0,98	94.080	4,03	93,2	123,8

Tabela 16: Propriedades físicas e óticas dos vidros utilizados [33] [47].

Código	P1	P2	P3	P4	P5
Modelo	Prestige 40	Prestige 70	Ceramic 30	Neutral 20	Neutral 35
Cor					
d (mm) - espessura	6,3	6,3	6	6,2	6,1
$T_s$ - Transmittância solar	0,254	0,398	0,546	0,124	0,461
$R_{fs}$ - Reflectância solar frontal	0,240	0,246	0,069	0,195	0,117
$R_{bs}$ - Reflectância solar posterior	0,073	0,096	0,064	0,194	0,111
$T_v$ - Transmittância visível	0,432	0,729	0,762	0,156	0,529
$R_{fv}$ - Reflectância visível frontal	0,057	0,074	0,081	0,210	0,125
$R_{bv}$ - Reflectância visível posterior	0,053	0,070	0,079	0,186	0,109
$e_f$ - Emissividade hemisférica frontal	0,87	0,87	0,84	0,84	0,84
$e_b$ - Emissividade hemisférica posterior	0,84	0,84	0,84	0,78	0,85
k (W/m.K) - Condutividade	0,96	0,96	0,96	0,95	0,95
Redução térmica (%)	52	41	50	53	46
Luz visível transmitida (%)	42	71	36	15	36

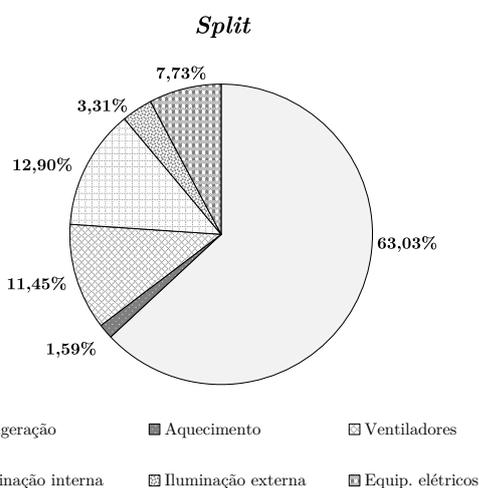


Figura 6: Contribuição de cada serviço no consumo anual para o modelo base.

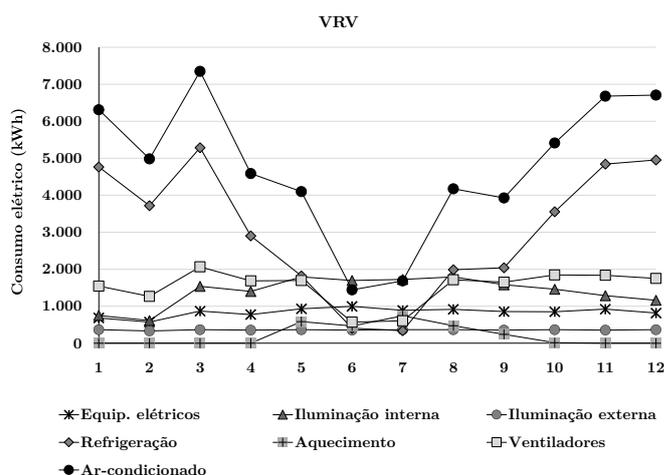


Figura 7: Consumo de energia elétrica mensal por setor com o sistema VRV.

térmica, o que pode ser observado comparando os modelos *Prestige 40* e *Neutral 20*. Ambas películas deram por resultado as maiores reduções no consumo, por causa da redução térmica oferecida ser de 52 e 53%, respectivamente. No entanto, a película *Neutral 20* oferece uma passagem de luz visível muito menor que a *Prestige 40*, 15 e 42%, respectivamente.

Visto que as películas de controle solar foram introduzidas na parte posterior do prédio, é interessante analisar os resultados somente para as zonas térmicas influenciadas com a mudança. Essa análise encontra-se na tabela B.25 do Apêndice B, onde, para cada modelo de película simulada, apresenta-se o consumo mensal em condicionamento de ar e total, e a economia obtida com cada uma das opções. O resultado mais favorável foi para

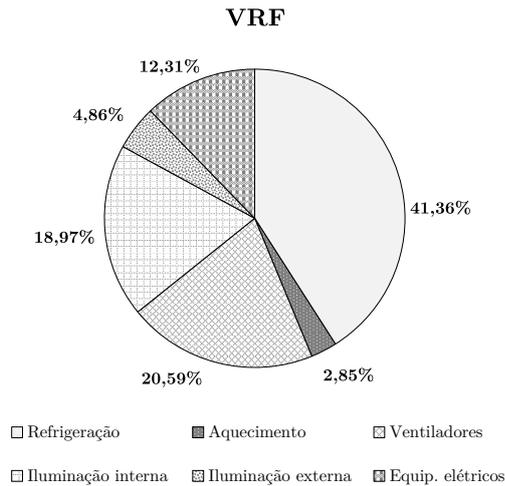


Figura 8: Contribuição de cada serviço no consumo anual para a proposta 1.

a película *Neutral 20*, proporcionando a máxima redução de consumo em ar-condicionado de 7,31%, no mês de setembro.

Os resultados obtidos sugerem que o uso de películas de controle solar não gera redução significativa no consumo. Entretanto para tirar conclusões, devem ser consideradas a orientação e área das janelas. No caso da biblioteca, dispõe-se da maior área envidraçada na fachada sul, a qual não foi considerada nas simulações por ser a menos ensolarada. Exceto pelas janelas dos pátios internos, as paredes orientadas norte e oeste, que são as que possuem maiores ganhos térmicos, apresentam pouca área envidraçada, e além disso a geometria em forma de cúpulas provoca sombreamentos entre as clarabóias.

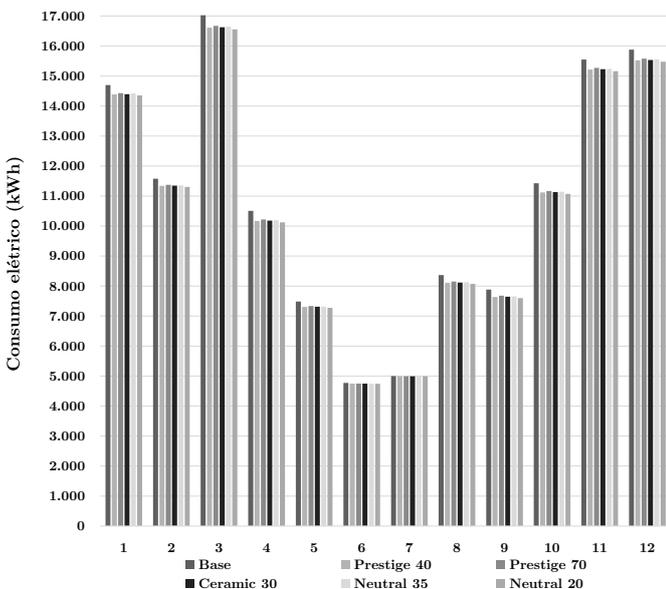


Figura 9: Consumo elétrico mensal com uso de películas de controle solar.

#### 4.4. Proposta 3: VRV e Películas

No gráfico da figura 4, encontra-se o consumo elétrico mensal desta alternativa comparada com as outras propostas. Como o sistema de ar condicionado VRV é bem mais eficiente que o *Split*, a redução de consumo proporcionada pelas películas nesse caso é menor que quando utilizadas junto ao sistema *split*, 1,17% e 2,15% anual, respectivamente.

### 5. Análise Econômica

Na figura C.12 do Apêndice C, encontra-se o histórico dos ajustes tarifários estabelecidos pela COPEL (Companhia Paranaense de Energia) e a evolução da inflação (IPCA - Índice de Preços ao Consumidor Amplo). Através do gráfico se aprecia como as tarifas de energia elétrica não seguem uma trajetória bem definida. Com o intuito de adotar uma premissa para a projeção da tarifa, o histórico foi dividido em três períodos. No período de 1999 a 2004 as tarifas cresceram acima do índice de inflação, no período de 2005 a 2013, as tarifas evoluíram abaixo da inflação, e de 2014 a 2015 bem acima da inflação, caindo em 2016. Na tabela 17, encontra-se a média geométrica da evolução da tarifa elétrica e do IPCA para ditos períodos.

Tabela 17: Evolução do IPCA [48] e da tarifa de energia elétrica [49].

	1999-2004	2005-2013	2014-2016	1999-2016
Alterações tarifárias (%)	18,24	0,47	23,25	10,19
IPCA (%)	8,67	5,30	7,79	6,84
Diferença (%)	9,57	-4,83	15,46	3,35

Para estabelecer o valor da inflação, foi utilizada a projeção até 2023 feita pelo banco Bradesco, a média dessa projeção corresponde a 4,33% ao ano [50]. De acordo com a tabela 17, foram montados três cenários: cenário referência, a tarifa elétrica cresce 3% acima da inflação, condizente com a média geométrica da diferença de todo o período considerado; cenário bom, a tarifa elétrica cresce 9% acima da inflação, de acordo com o período de 1999 a 2004; e cenário contraproducente, no qual a inflação cresce acima da tarifa de energia em 3%, similar ao período 2005 a 2013. Na tabela 18, resumem-se as premissas de cada cenário.

Tabela 18: Cenários.

	Cenário Referência	Cenário Bom	Cenário Contraproducente
Alterações tarifárias (%)	7,33	13,33	1,33
IPCA (%)	4,33	4,33	4,33
Diferença (%)	3,00	9,00	-3,00

#### 5.1. Proposta 1: Ar condicionado VRV

Na tabela 19, encontram-se as variáveis de entrada necessárias na análise. A TMA utilizada corresponde à composição da média geométrica da poupança líquida (P) nos últimos 10 anos [51], com a inflação. Para efetuar a composição utilizou-se a fórmula

$(1 + TMA) = (1 + i) * (1 + P)$ . O custo da energia elétrica adotado é o valor vigente da tarifa convencional da COPEL, o qual inclui os impostos ICMS e PIS/COFINS [52]. O valor do investimento para o VRV corresponde ao preço médio de equipamentos desse tipo, estimado a partir de unidades de igual potência às do sistema proposto [53]. Para o ar-condicionado *split*, foi utilizado o preço médio de mercado dos modelos atualmente instalados no prédio.

Tabela 19: Variáveis de entrada para a proposta 1.

P (%)	1,0900
TMA (%)	5,4672
Tarifa elétrica (R\$/kWh)	0,640
Investimento VRV (R\$)	743.237
Consumo VRV (kWh/ano)	88.508
Investimento Split (R\$)	219.000
Consumo Split (kWh/ano)	130.179
Vida útil VRV (anos)	20
Vida útil Split (anos)	10

A análise econômica desta proposta será abordada desde a proposição de qual dos sistemas de ar condicionado em estudo é o mais vantajoso. Considerando as variáveis de entrada da tabela 19, foram montados os fluxos de caixa para cada um dos cenários propostos. Na tabela C.26 do Apêndice C, encontra-se o fluxo de caixa para o cenário referência; para os outros cenários, o fluxo é montado de forma similar, mas considerando a taxa de aumento do preço da eletricidade respectiva ao caso. Posto que, a vida útil do sistema VRV é o dobro que a do sistema *split* [54] [55], para montar o fluxo de caixa e comparar essa duas alternativas, aplicou-se o método do mínimo comum múltiplo, o qual utiliza a hipótese de que o bem será substituído por outro de características idênticas, quando atingida sua vida econômica de utilização [56].

Dada a importância do investimento, a análise foi repetida para o caso com financiamento. Para o sistema VRV foi utilizado o financiamento para projetos de eficiência energética oferecido pelo BNDES [57], o qual possui taxa de juros de 9,1% a.a., prazo de 10 anos e financia até 80% do valor do investimento. Para o sistema *split*, foi utilizada a linha de financiamento BNDES automático [58], para aquisição de equipamentos novos, a qual possui taxa de juros de 13,5% a.a., prazo de 6 anos e financia até 80% do investimento. As tabelas de financiamento, C.27 e C.28, e a tabela com o fluxo de caixa para o cenário referência, C.29, encontram-se no Apêndice C.

Finalmente, na tabela 20, são apresentados os resultados obtidos para o Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR), Pay Back Descontado (PBD) e Custo Anual Uniformizado (CAU). Observa-se que a instalação do sistema VRV em lugar do sistema *split*, é mais vantajosa nos cenários referência e bom; já para o cenário contraproducente, o VRV resulta ser a opção mais cara. Também, nos cenários referência e bom, ter o dinheiro para o investimento em lugar de financiar resulta mais lucrativo.

Tabela 20: Resultados da análise econômica para o sistema de ar condicionado.

Cenário	VPL (R\$)	TIR (%)	PBD (anos)	CAU Split (R\$)	CAU VRV (R\$)	CAU (R\$)
Sem financiamento						
Referência	204.862	8,85%	13,93	-185.558	-168.462	17.096
Bom	694.369	13,52%	10,74	-245.165	-187.218	57.946
Contraprod.	-169.050	1,37%	-	-88.713	-102.820	-14.108
Com financiamento						
Referência	176.093	9,72%	15,18	-191.236	-176.541	14.695
Bom	665.600	16,72%	12,39	-250.843	-195.298	55.545
Contraprod.	-69.210	3,27%	-	-105.124	-110.900	-5.776

A figura 10 mostra o gráfico de como varia a TIR e o PBD, em função do aumento do preço da eletricidade, para o caso sem financiamento. Nota-se que, o sistema VRV torna-se mais vantajoso que o sistema *split*, desde que a energia cresça a uma taxa anual maior ou igual a 3,3% ou, em outras palavras, 1% abaixo da inflação.

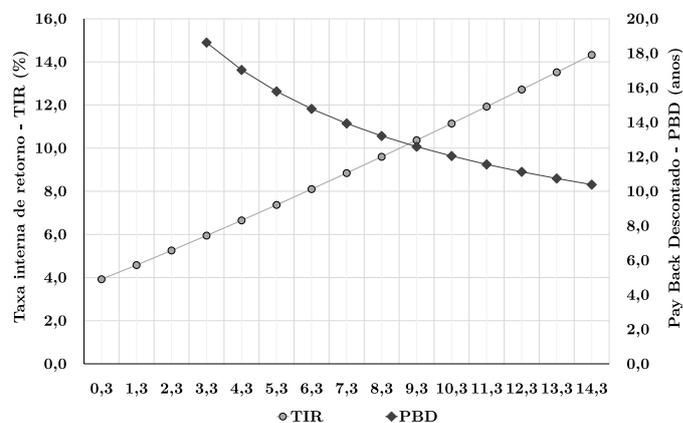


Figura 10: Variação da TIR e PBD em função da taxa de aumento do preço da eletricidade.

## 5.2. Proposta 2: Películas nos vidros

O valor do metro quadrado de película de controle solar foi obtido através de orçamento com uma empresa do ramo, a área em que as películas serão colocadas corresponde a 239,9 m<sup>2</sup>. Na tabela 21 encontram-se os valores do investimento e resultados para o cenário bom. Como os resultados mostram que a proposta não é economicamente viável para nenhum dos tipos de película utilizadas, não é necessário repetir a análise para o resto dos cenários.

Tabela 21: Resultados da análise econômica para as películas de controle solar.

Película	Preço (R\$/m <sup>2</sup> )	Investimento (R\$)	Vida útil (anos)	Economia anual (kWh)	VPL (R\$)	CAU (R\$)
Prestige 40	540	129.550	15	3007	-82.047	-3.671
Prestige 70	540	129.550	15	2551	-89.241	-3.992
Ceramic 30	335	80.369	15	2906	-34.454	-1.541
Neutral 20	177	42.464	10	3445	-12.945	-1.007
Neutral 35	177	42.464	10	2780	-18.638	-1.450

### 5.3. Proposta 3: VRV e películas

Seguindo o mesmo procedimento que na proposta 1 e utilizando as novas variáveis de entrada da tabela 22, foram montados os fluxos de caixa correspondentes a cada cenário; os resultados da análise são apresentados na tabela 23. Essa opção resulta viável, por causa do investimento nas películas ser diluído dentro do investimento no sistema de condicionamento de ar, no entanto, verifica-se que esta opção é menos atrativa que a proposta 1.

Tabela 22: Variáveis de entrada para a proposta 3.

TMA (%)	5,4672
Tarifa elétrica (R\$/kWh)	0,640
Investimento VRV (R\$)	785.700
Consumo VRV + películas (kWh/ano)	87.482
Investimento Split (R\$)	219.000
Consumo Split (kWh/ano)	130.179
Vida útil VRV (anos)	20
Vida útil Split (anos)	10
Vida útil películas (anos)	10

Tabela 23: Resultados da análise econômica do sistema VRV e películas de controle solar.

Cenário	VPL (R\$)	TIR (%)	PBD (anos)	CAU <i>Split</i> (R\$)	CAU VRV (R\$)	CAU (R\$)
Sem financiamento						
Referência	152.243	7,86	15,66	-185.558	-172.853	12.705
Bom	653.800	12,67	11,77	-313.173	-258.612	54.561
Contraprod.	-84.285	3,74	-	-122.843	-129.876	-7.034
Com financiamento						
Referência	117.943	8,13	16,67	-191.236	-181.394	9.843
Bom	619.500	15,27	13,12	-318.852	-267.154	51.698
Contraprod.	-67.195	3,50	-	-127.285	-132.893	-5.608

## 6. Conclusões

Verificou-se que o uso de simulação computacional em edificações é uma ótima ferramenta para analisar diferentes alternativas, possibilitando a comparação de diversas soluções para um problema em particular. Mediante a modelagem da biblioteca no *EnergyPlus* foram obtidos resultados satisfatórios, com diferença entre o consumo real e simulado menor que 10% para os sete meses dos quais se possui medidas de consumo. Através do uso da *Building Component Library* da NREL [46] e catálogos do fabricante, foi possível dimensionar o sistema VRV, assim como, utilizando a biblioteca do programa WINDOW [33], foi possível obter as propriedades das películas de controle solar; desse modo o consumo das alternativas foi simulado da forma mais próxima à realidade possível.

Verificou-se que a utilização de um sistema VRV em lugar dos aparelhos *split* proporciona uma economia anual em ar condicionado igual a 42,08%, devido ao sistema ter a capacidade de modular continuamente a potência entregue em função da demanda real do conjunto de unidades interiores. Vale ressaltar que a potência total das unidades evaporadoras do sistema

proposto é 10,6% menor à do sistema *split*, o que também contribui na diminuição do consumo. A película de controle solar que proporcionou a maior economia de energia apresentou uma diminuição do consumo em ar condicionado de 4,59% com relação ao consumo das zonas térmicas em que as películas foram instaladas. Para trabalhos futuros é interessante realizar uma análise luminotécnica para avaliar a influência que as películas podem ter na iluminação interior, e assim verificar se a poupança em condicionamento de ar compensa a eventual necessidade de aumento do consumo das luminárias.

Da análise econômica, conclui-se que a utilização de um sistema VRV é mais economicamente atrativa que os aparelhos *split*, entretanto é recomendável utilizar este tipo de sistema na fase inicial de projeto e não para substituição, o que ainda resulta inviável. Devido à pequena área envidraçada e adequada orientação das janelas, a utilização de películas solares verificou-se inviável, em razão do grande investimento e baixa economia de energia proporcionada.

## Referências

- [1] Ministério de Minas e Energia (MME), *O que fazer para tornar mais eficiente o uso de energia elétrica em prédios públicos*. URL <https://goo.gl/eh8H7B>
- [2] Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Ministério de Minas e Energia (MME), Balanço energético nacional 2016–ano base 2015, Governo Federal.
- [3] J. N. Pessoa, E. Ghisi, Estado da arte em eficiência energética: sistemas de condicionamento de ar, LabEE, Procel, Eletrobras, FEESC, 2015.
- [4] Eletrobrás, Avaliação do Mercado de Eficiência Energética do Brasil, Procel, 2006.
- [5] DIAMONT, *Sistemas de refrigeração: Expansão direta vs. expansão indireta*. URL <https://goo.gl/DiUUb4>
- [6] Procel, Sistemas de Ar Condicionado, Eletrobras and Procel Edifica, 2011.
- [7] N. Quadri, Sistemas de Aire Acondicionado, Alsina, 2001.
- [8] E. Pita, Air Conditioning Principles and Systems, Prentice Hall, 2002.
- [9] ABNT NBR 16401-1 Instalações de ar-condicionado - Sistemas centrais e unitários - Parte 1: Projetos das instalações (2008).
- [10] A. Alahmer, S. Alsaqoor, Simulation and optimization of multi-split variable refrigerant flow systems, *Ain Shams Engineering Journal* xx (xx) (2017) xxx–xxx.
- [11] C. Liu, T. Zhao, J. Zhang, T. Chen, X. Li, M. Xu, X. Yang, Operational electricity consumption analyze of vrf air conditioning system and centralized air conditioning system based on building energy monitoring and management system, *Procedia Engineering* 121 (2015) 1856–1863.
- [12] J. R. Plummer, *Window film: A cost effective window retrofit*. URL <https://goo.gl/xjESjc>
- [13] A. Bahadori-Jahromi, A. Rotimi, A. Mylona, P. Godfrey, D. Cook, Impact of window films on the overall energy consumption of existing uk hotel buildings, *Sustainability* 9 (5) (2017) 731.
- [14] Potential for Energy Savings in Retrofitting of an office building in São Paulo/Brazil, *Proceedings of Building Simulation*, 2011.
- [15] J. C. de Souza Grass, Eficiência de Sistemas de Ar Condicionado em um Prédio Residencial, monografia (Engenharia Mecânica), UFRGS (Universidade Federal do Rio Grande do Sul), Porto Alegre, Brasil (2013).
- [16] W. B. de Souza, Comparação entre dois sistemas de ar-condicionado para um prédio histórico, monografia (Engenharia Mecânica), UFRGS (Universidade Federal do Rio Grande do Sul), Porto Alegre, Brazil (2010).
- [17] P. Baggio, Simulação computacional para comparação de sistemas de ar condicionado, monografia (Engenharia Mecânica), UFRGS (Universidade Federal do Rio Grande do Sul), Porto Alegre, Brazil (2011).
- [18] F. A. Zanata, R. da Costa Dutra, Caracterização, aplicação e comparação entre sistemas de fluxo variável de refrigerante e sistemas de água gelada, monografia (Engenharia Mecânica), UnB (Universidade de Brasília), Brasília, Brazil (2011).

- [19] T. N. Aynur, Y. Hwang, R. Radermacher, Simulation comparison of vav and vrf air conditioning systems in an existing building for the cooling season, *Energy and Buildings* 41 (11) (2009) 1143–1150.
- [20] Y. Zhou, J. Wu, R. Wang, S. Shiochi, Energy simulation in the variable refrigerant flow air-conditioning system under cooling conditions, *Energy and Buildings* 39 (2) (2007) 212–220.
- [21] F. L. Pereira, Determinação computacional da inclusão de parâmetros físicos no comportamento termoenergético de uma edificação, Master's thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre (2005).
- [22] R. Yin, P. Xu, P. Shen, Case study: Energy savings from solar window film in two commercial buildings in shanghai, *Energy and Buildings* 45 (2012) 132–140.
- [23] C. Li, J. Tan, T.-T. Chow, Z. Qiu, Experimental and theoretical study on the effect of window films on building energy consumption, *Energy and Buildings* 102 (2015) 129–138.
- [24] D. H. Li, T. N. Lam, S. L. Wong, E. K. Tsang, Lighting and cooling energy consumption in an open-plan office using solar film coating, *Energy* 33 (8) (2008) 1288–1297.
- [25] X. Wang, N. Wang, X. Liu, R. Shi, Energy-saving analysis for the modern wing of the art institute of chicago and green city strategies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 73 (2017) 714–729.
- [26] ABNT NBR 15220 Desempenho térmico de edificações - Parte 3: Definições, símbolos e unidades (2005).
- [27] EnergyPlus, [Weather data by location](https://goo.gl/jZFVZM) (2017). URL <https://goo.gl/jZFVZM>
- [28] A. Handbook, *Fundamentals: SI Edition*. 2009, ASHRAE, Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- [29] A. Handbook, *Fundamentals: SI Edition*. 2005, ASHRAE, Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- [30] ABNT NBR 15220 Desempenho térmico de edificações - Parte 1: Definições, símbolos e unidades (2003).
- [31] Y. Çengel, G. Afshin, *Transferencia de calor y masa*, Mc Graw Hill, 2011.
- [32] CINEXPAN, *Ficha técnica de argila expandida - Número 3222* (2016).
- [33] Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley lab window 7.5, Programa de Computador (2017).
- [34] U.S. Department of Energy (DOE), Building Technologies Office (BTO), *Library files for energy plus - datasets* (2016).
- [35] U.S. Department of Energy (DOE), *Input Output Reference Energy Plus*, 2016.
- [36] C. Soler, D. Kowaltowsky, S. Pina, Conforto em auditórios: Proposta de procedimento para o projeto, *ENCAC/ELEACAC (2005) 1950–1959*.
- [37] Microsoft, *Joulemeter: Computational energy measurement and optimization*, Programa de Computador (2010).
- [38] DELL, *Liebert XDF Mini Data Center (MDC)*, Emerson Network Power, 2007.
- [39] Cyber Security Division (CSD), *Guidelines for Small Datacenter*, Q-CERT, 2014.
- [40] Cemig, ANEEL, *Governo de Minas, Energia inteligente*, Cemig, 2014.
- [41] INMETRO, Procel, *Programa Brasileiro de Etiquetagem, Tabela Refrigeração*, INMETRO, 2016.
- [42] Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), [Temperatura média compensada 1961-1990](https://goo.gl/SBejPh) (2017). URL <https://goo.gl/SBejPh>
- [43] A. Handbook, *Fundamentals*, Chap. 14, Psychrometrics. 2013, ASHRAE, Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- [44] LG, *Multi V IV: Engineering Manual*.
- [45] LG, *Multi V IV: Performance Data Manual*.
- [46] National Renewable Energy Laboratory (NREL), [Building component library](https://bcl.nrel.gov/) (2017). URL <https://bcl.nrel.gov/>
- [47] 3M, *Window Film Manual*, Renewable Energy Division (2012).
- [48] Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), *Ipca* (2017). URL <https://goo.gl/jQTPVG>
- [49] Companhia Paranaense de Energia (COPEL), [Alterações tarifárias](https://goo.gl/iPCAhP) (2017). URL <https://goo.gl/iPCAhP>
- [50] Bradesco, [Projeções bradesco longo prazo](https://goo.gl/xLm14R) (2017). URL <https://goo.gl/xLm14R>
- [51] Associação Brasileira das Entidades de Crédito Imobiliário e Poupança (ABECIP), [Caderneta de poupança](https://goo.gl/5ToenZ) (2017). URL <https://goo.gl/5ToenZ>
- [52] Companhia Paranaense de Energia (COPEL), [Tarifa convencional - sub-grupo b3](https://goo.gl/JE2fXG) (2017). URL <https://goo.gl/JE2fXG>
- [53] CYPE Ingenieros, [Gerador de preços para a construção civil](https://goo.gl/3dTAun) (2017). URL <https://goo.gl/3dTAun>
- [54] J. Park, Comparative analysis of the vrf system and conventional hvac systems focused on life-cycle cost, Master's thesis, Georgia Institute of Technology, Georgia (2013).
- [55] ASHRAE, [Equipment life expectancy chart](https://goo.gl/7NNkp). URL <https://goo.gl/7NNkp>
- [56] J. A. N. de Oliveira, *Engenharia Econômica*, McGraw-Hill, São Paulo, 1982.
- [57] BNDES, [Bndes finem - eficiência energética](https://goo.gl/hS3IVs). URL <https://goo.gl/hS3IVs>
- [58] Oficina Projetos, [Bndes automático](https://goo.gl/Lm1njm). URL <https://goo.gl/Lm1njm>

## Apêndice A. Posicionamento das unidades externas

## Apêndice B. Resultados das propostas de melhoria

## Apêndice C. Análise econômica

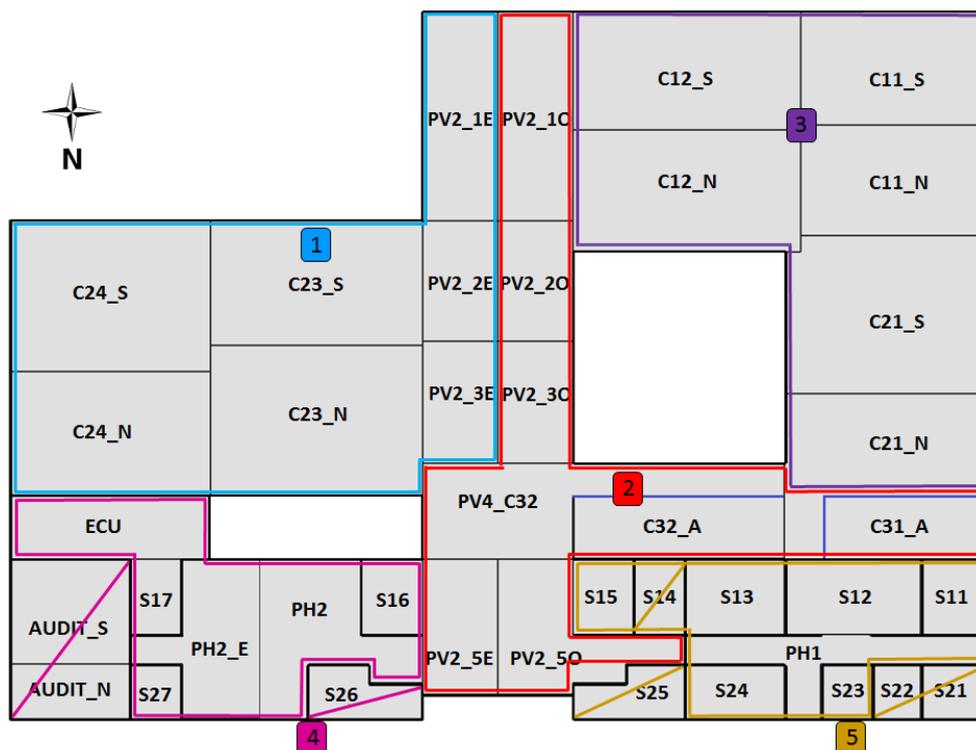


Figura A.11: Posicionamento das unidades condensadoras e zonas abrangidas.

Tabela B.24: Consumo mensal desagregado e total, e economia das propostas. Película de controle solar utilizada: *Neutral 35*.

Consumo (kWh)	Equip. eletr. e iluminação	Ar-condicionado				Total			
		Split	Slit + películas	VRV	VRV + películas	Base	Proposta 1	Proposta 2	Proposta 3
Jan.	1.797	12.902	12.625	6.310	6.194	14.699	14.422	8.107	7.991
Fev.	1.514	10.063	9.844	4.982	4.875	11.577	11.357	6.496	6.389
Mar.	2.770	<b>14.257</b>	<b>13.878</b>	<b>7.350</b>	<b>7.201</b>	<b>17.027</b>	<b>16.648</b>	<b>10.120</b>	<b>9.971</b>
Abr.	2.529	7.981	7.670	4.586	4.427	10.510	10.198	7.115	6.955
Mai.	<b>3.089</b>	4.397	4.226	4.098	4.143	7.486	7.315	7.186	7.232
Jun.	3.044	1.727	1.703	1.441	1.427	4.771	4.747	4.485	4.470
Jul.	2.978	2.022	2.015	1.685	1.702	5.000	4.993	4.663	4.680
Ago.	3.073	5.295	5.056	4.174	4.080	8.369	8.129	7.247	7.153
Set.	2.788	5.094	4.867	3.927	3.856	7.883	7.655	6.715	6.644
Out.	2.673	8.753	8.468	5.412	5.290	11.426	11.141	8.085	7.963
Nov.	2.559	12.991	12.679	6.680	6.551	15.550	15.238	9.239	9.111
Dez.	2.342	13.539	13.213	6.707	6.581	15.881	15.555	9.049	8.923
<b>TOT.</b>	<b>31.155</b>	<b>99.023</b>	<b>96.243</b>	<b>57.353</b>	<b>56.327</b>	<b>130.179</b>	<b>127.398</b>	<b>88.508</b>	<b>87.482</b>
Economia (%) em relação	Ar-condicionado				Total				
	Split	Slit + películas	Split VRV	Split VRV + películas	Base	Proposta 1	Base Proposta 2	Base Proposta 3	
Jan.		2,15	<b>51,09</b>	<b>51,99</b>		1,89	<b>44,85</b>	<b>45,63</b>	
Fev.		2,18	50,49	51,56		1,90	43,89	44,82	
Mar.		2,66	48,45	49,49		2,23	40,56	41,44	
Abr.		<b>3,90</b>	42,53	44,53		<b>2,96</b>	32,30	33,82	
Mai.		3,89	6,81	5,78		2,28	4,00	3,39	
Jun.		1,40	16,57	17,42		0,51	6,00	6,31	
Jul.		0,35	16,66	15,82		0,14	6,74	6,40	
Ago.		<b>4,52</b>	21,17	22,95		2,86	13,40	14,52	
Set.		4,47	22,92	24,31		2,89	14,81	15,71	
Out.		3,26	38,17	39,56		2,50	29,24	30,31	
Nov.		2,40	48,58	49,57		2,00	40,58	41,41	
Dez.		2,41	50,46	51,39		2,05	43,02	43,81	
<b>TOT.</b>		<b>2,81</b>	<b>42,08</b>	<b>43,12</b>		<b>2,14</b>	<b>32,01</b>	<b>32,80</b>	

Tabela B.25: Consumo desagregado e total das zonas térmicas em que foram introduzidas as películas e economia obtida.

Consumo (kWh)	Equip. eletr. e iluminação	Split	Split + Prestige 40	Split + Prestige 70	Split + Ceramic 30	Split + Neutral 35	Split + Neutral 20	Tot. Base	Tot. Opção 1	Tot. Opção 2	Tot. Opção 3	Tot. Opção 4	Tot. Opção 5
Jan.	1.727	9.680	9.370	9.414	9.382	9.402	9.335	11.407	11.098	11.141	11.109	11.129	11.062
Fev.	1.444	7.517	7.282	7.316	7.290	7.299	7.248	8.961	8.726	8.760	8.734	8.744	8.692
Mar.	2.701	<b>11.011</b>	<b>10.601</b>	<b>10.659</b>	<b>10.615</b>	<b>10.633</b>	<b>10.544</b>	<b>13.712</b>	<b>13.301</b>	<b>13.359</b>	<b>13.316</b>	<b>13.334</b>	<b>13.245</b>
Abr.	2.459	6.212	5.873	5.923	5.885	5.901	5.826	8.671	8.332	8.382	8.344	8.360	8.285
Mai.	<b>3.019</b>	3.242	3.063	3.091	3.069	3.071	3.031	6.261	6.082	6.110	6.088	6.090	6.050
Jun.	2.974	971	948	950	948	947	945	3.945	3.922	3.924	3.922	3.922	3.919
Jul.	2.909	1.178	1.173	1.174	1.172	1.172	1.171	4.086	4.081	4.082	4.081	4.080	4.080
Ago.	3.004	4.027	3.773	3.814	3.781	3.792	3.736	7.031	6.777	6.817	6.784	6.795	6.739
Set.	2.719	3.864	3.622	3.662	3.630	3.638	3.582	6.583	6.341	6.381	6.349	6.357	6.301
Out.	2.604	6.692	6.388	6.436	6.399	6.408	6.338	9.296	8.992	9.040	9.003	9.011	8.942
Nov.	2.490	9.849	9.520	9.571	9.531	9.540	9.468	12.339	12.009	12.061	12.020	12.029	11.957
Dez.	2.272	10.295	9.940	9.994	9.952	9.970	9.890	12.567	12.212	12.266	12.224	12.242	12.162
<b>TOT.</b>	<b>30.322</b>	<b>74.537</b>	<b>71.552</b>	<b>72.003</b>	<b>71.652</b>	<b>71.772</b>	<b>71.113</b>	<b>104.859</b>	<b>101.874</b>	<b>102.324</b>	<b>101.974</b>	<b>102.094</b>	<b>101.434</b>

Economia (%) em relação	Ar-condicionado					Total				
	Split Prestige 40	Split Prestige 70	Split Ceramic 30	Split Neutral 35	Split Neutral 20	Base Opção 1	Base Opção 2	Base Opção 3	Base Opção 4	Base Opção 5
Jan.	3,20	2,75	3,08	2,88	3,57	2,71	2,34	2,62	2,44	3,03
Fev.	3,12	2,67	3,02	2,89	3,57	2,62	2,24	2,53	2,42	3,00
Mar.	3,73	3,20	3,60	3,43	4,24	2,99	2,57	2,89	2,76	3,41
Abr.	5,45	4,64	5,26	5,01	6,21	<b>3,90</b>	<b>3,32</b>	<b>3,77</b>	<b>3,59</b>	<b>4,45</b>
Mai.	5,51	4,63	5,34	5,26	6,49	2,85	2,40	2,76	2,72	3,36
Jun.	2,38	2,12	2,38	2,40	2,67	0,59	0,52	0,59	0,59	0,66
Jul.	0,43	0,34	0,48	0,51	0,57	0,12	0,10	0,14	0,15	0,17
Ago.	<b>6,31</b>	<b>5,31</b>	<b>6,12</b>	<b>5,85</b>	<b>7,24</b>	3,61	3,04	3,51	3,35	4,15
Set.	6,28	5,24	6,07	<b>5,85</b>	<b>7,31</b>	3,69	3,07	3,56	3,44	4,29
Out.	4,54	3,83	4,38	4,25	5,29	3,27	2,76	3,15	3,06	3,81
Nov.	3,34	2,82	3,23	3,14	3,87	2,67	2,25	2,58	2,51	3,09
Dez.	3,45	2,93	3,33	3,16	3,94	2,82	2,40	2,73	2,59	3,23
<b>TOT.</b>	<b>4,00</b>	<b>3,40</b>	<b>3,87</b>	<b>3,71</b>	<b>4,59</b>	<b>2,85</b>	<b>2,42</b>	<b>2,75</b>	<b>2,64</b>	<b>3,27</b>

Tabela C.26: Fluxo de caixa para o cenário referência, sem financiamento.

Ano	Fluxo Split	Fluxo VRV	Fluxo (VRV - Split)	VP (TMA = 5,47%) (VRV - Split)	VP acumulado (VRV - Split)
0	-219.000	-743.237	-524.237	-524.237	-524.237
1	-83.341	-56.663	26.678	25.295	-498.942
2	-89.449	-60.816	28.633	25.741	-473.200
3	-96.006	-65.274	30.732	26.196	-447.004
4	-103.043	-70.059	32.985	26.659	-420.346
5	-110.596	-75.194	35.402	27.130	-393.216
6	-118.703	-80.706	37.997	27.609	-365.607
7	-127.404	-86.622	40.782	28.096	-337.511
8	-136.743	-92.971	43.772	28.593	-308.918
9	-146.766	-99.786	46.980	29.098	-279.820
10	-376.524	-107.100	269.424	158.220	-121.600
11	-169.070	-114.950	54.120	30.135	-91.465
12	-181.463	-123.376	58.087	30.667	-60.798
13	-194.764	-132.420	62.345	31.209	<b>-29.590</b>
14	-209.041	-142.126	66.915	31.760	2.170
15	-224.363	-152.544	71.819	32.321	34.491
16	-240.809	-163.725	77.084	32.892	67.382
17	-258.461	-175.726	82.734	33.473	100.855
18	-277.406	-188.607	88.799	34.064	134.919
19	-297.740	-202.432	95.307	34.665	169.584
20	-319.564	-217.270	102.293	35.278	204.862

Tabela C.27: Financiamento SAC dos ar-condicionado split (j = 13,5% a.a.) [58].

Ano	Prestação	Juros (R\$)	Amortização (R\$)	Saldo Dívida (R\$)
0	-	0	0	175.200
1	52.852	23.652	29.200	146.000
2	48.910	19.710	29.200	116.800
3	44.968	15.768	29.200	87.600
4	41.026	11.826	29.200	58.400
5	37.084	7.884	29.200	29.200
6	33.142	3.942	29.200	0

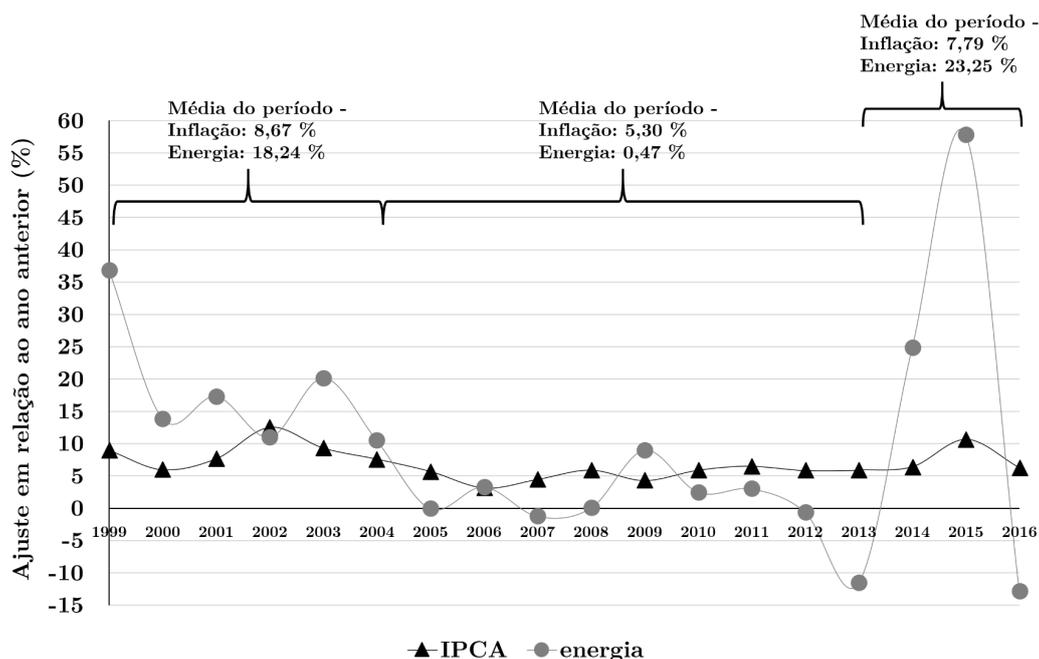


Figura C.12: Histórico da inflação e ajustes no preço da energia elétrica.

Tabela C.28: Financiamento SAC do sistema VRV ( $j = 9,1\% \text{ a.a.}$ ) [57]

Ano	Prestação	Juros (R\$)	Amortização (R\$)	Saldo Dívida (R\$)
0	-	0	0	594.589
1	113.567	54.108	59.459	535.130
2	108.156	48.697	59.459	475.671
3	102.745	43.286	59.459	416.213
4	97.334	37.875	59.459	356.754
5	91.924	32.465	59.459	297.295
6	86.513	27.054	59.459	237.836
7	81.102	21.643	59.459	178.377
8	75.691	16.232	59.459	118.918
9	70.280	10.822	59.459	59.459
10	64.870	5.411	59.459	0

Tabela C.29: Fluxo de caixa para o cenário referência, com financiamento.

Ano	Financiamento <i>Split</i>	Compra Energia <i>Split</i>	Financiamento VRV	Compra Energia VRV	Fluxo (VRV - <i>Split</i> )	VP (TMA = 5,47% a.a.) (VRV - <i>Split</i> )	VP acumulado (VRV - <i>Split</i> )
0	-43.800	0	-148.647	0	-104.847	-104.847	-104.847
1	-52.852	-83.341	-113.567	-56.663	-34.037	-32.273	-137.120
2	-48.910	-89.449	-108.156	-60.816	-30.613	-27.521	-164.641
3	-44.968	-96.006	-102.745	-65.274	-27.045	-23.054	-187.695
4	-41.026	-103.043	-97.334	-70.059	-23.324	-18.851	-206.545
5	-37.084	-110.596	-91.924	-75.194	-19.437	-14.895	-221.441
6	-33.142	-118.703	-86.513	-80.706	-15.373	-11.170	-232.611
7		-127.404	-81.102	-86.622	-40.320	-27.778	-260.389
8		-136.743	-75.691	-92.971	-31.919	-20.850	-281.239
9		-146.766	-70.280	-99.786	-23.300	-14.431	-295.670
10	-43.800	-157.524	-64.870	-107.100	29.354	17.238	-278.432
11	-52.852	-169.070		-114.950	106.972	59.563	-218.869
12	-48.910	-181.463		-123.376	106.997	56.489	-162.380
13	-44.968	-194.764		-132.420	107.313	53.719	-108.661
14	-41.026	-209.041		-142.126	107.941	51.232	-57.429
15	-37.084	-224.363		-152.544	108.903	49.010	<b>-8.419</b>
16	-33.142	-240.809		-163.725	110.226	47.033	38.614
17		-258.461		-175.726	82.734	33.473	72.086
18		-277.406		-188.607	88.799	34.064	106.150
19		-297.740		-202.432	95.307	34.665	140.816
20		-319.564		-217.270	102.293	35.278	176.093