

SIMULAÇÃO ENERGÉTICA DE UMA EDIFICAÇÃO PÚBLICA EM TRAMANDAÍ-RS

ENERGY SIMULATION OF A PUBLIC BUILDING IN TRAMANDAÍ-RS

George Lucas Bohmer Bouchahine¹ 

Flavio Vanderlei Zancanaro Júnior² 

Resumo: As edificações consomem uma parcela significativa da energia elétrica faturada no Brasil. Em prédios públicos, o maior consumo de energia elétrica é destinado ao uso dos sistemas de iluminação e climatização. Ações de eficiência energética aplicadas a edificações já construídas apresentam resultados satisfatórios na redução do consumo de energia elétrica. O presente trabalho tem como objetivo avaliar melhorias dos sistemas de iluminação e condicionamento de ar da Prefeitura Municipal de Tramandaí a partir da modelagem computacional no programa *Energyplus*, possibilitando compreender o comportamento energético da edificação em relação ao seu consumo de energia elétrica anual e propor ações de eficiência energética a partir do *retrofit* dos sistemas analisados. Também, a fim de demonstrar a viabilidade econômica de cada cenário, o tempo de retorno do investimento é analisado. A edificação possui 5 pavimentos com área construída de 4.388,57 m², 165 zonas térmicas e consumo de energia elétrica de 162,65 MWh/ano. Como resultado, determinou-se a comparação entre o perfil de consumo de energia elétrica ao longo de um ano da edificação com os dados do modelo real. Em contraste o consumo real da edificação e o consumo do cenário com o *retrofit* do sistema de iluminação foi apresentada uma economia na ordem de 17,96% com retorno de investimento menor que um ano.

Palavras-chave: Eficiência Energética. *Energyplus*. *Retrofit*. Climatização. Iluminação.

Abstract: Buildings consume a considerable portion of the electricity billed in Brazil. In public buildings, the higher electricity consumption is destined for the use of lighting and air conditioning systems. Energy efficiency actions applied to already built buildings show satisfactory results in reducing electricity consumption. The present work aims to evaluate the energy efficiency of the lighting and conditioning systems of Tramandaí's City Hall from the computational modeling in the *Energyplus* program, making it possible to understand the energy behavior of the building in relation to its annual electricity consumption and to propose energy efficiency actions from the retrofit of the analyzed systems. The building has 5 floors with a constructed area of 4,388.57 m², 165 thermal zones and electricity consumption of 162.65 MWh/year. As a result, it was determined the comparison between the profile of electricity consumption over a year of the building with the data of the real model. In contrast the actual consumption of the building and the consumption of the lighting system retrofit scenario, savings in the order of 17.96% with a less than one year investment return were found.

Keywords: Energy Efficiency, *Energyplus*, *Retrofit*. Air Conditioning. Lighting.

¹ Bacharel em Engenharia de Gestão de Energia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, george.bohmer@ufrgs.br.

² Doutor, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, flavio.zancanaro@ufrgs.br.

1 INTRODUÇÃO

O estudo de eficiência energética em edificações é um assunto de grande interesse na sociedade, uma vez que este setor responde aproximadamente por um consumo de energia elétrica correspondente a 45% do total faturado no Brasil, enquanto 8,5% são consumidos pelo setor público. Edificações já construídas que promovem ações de Eficiência Energética (EE) apresentam um potencial de redução de consumo estimado em 30%, enquanto as edificações ainda em fase de construção demonstram 50%. Ainda, cerca de 70% do consumo de energia elétrica nos prédios públicos é destinado ao uso de sistemas de iluminação e climatização. Dessa forma, constata-se que uma parcela considerável de prédios públicos no país consome energia elétrica de forma ineficiente (PROCEL, 2020; EPE, 2020).

O Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO) deu origem, em 1984, aos programas de avaliação de eficiência energética de equipamentos. Já em 1997 foi criado o Programa de Eficiência Energética em Prédios Públicos, em uma parceria entre Eletrobras e o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), a fim de promover a EE nos prédios públicos nos níveis federal, estadual e municipal. Além disso, o Programa visa a implementação de medidas de EE e a difusão da informação junto aos agentes envolvidos com a administração pública. Para isso, os prédios públicos devem promover economia de energia e melhoria na qualidade dos sistemas de iluminação, refrigeração, forças-motrizes e demais sistemas (PROCEL, 2006).

Sem muitos resultados até então e, ainda, na busca pela redução e racionalização do consumo de energia elétrica, em 24 de julho de 2000, o Presidente da República sancionou a Lei nº 9.991, que dispõe sobre a realização de investimentos em pesquisa, desenvolvimento e EE por parte das empresas concessionárias, permissionárias e autorizadas do setor de energia elétrica.

Logo, no ano seguinte, é sancionada a Lei de Eficiência Energética (10.295/2001), que criou a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia visando a alocação eficiente de recursos energéticos e a preservação do meio ambiente (Brasil, 2001). A partir da sanção destas leis e,

consequentemente, com a obrigatoriedade de investimentos direcionados ao setor, o Brasil começou, efetivamente, a investir em medidas para evitar desperdícios de energia elétrica. Dessa forma, inicia-se um movimento no país em busca de edificações, equipamentos e tecnologias mais eficientes e com menor impacto ambiental. Desde então, a EE tornou-se item indispensável nos novos projetos ou reformas (*retrofit*) de prédios públicos federais.

A implementação de soluções que visem a EE em edificações é cada vez mais valorizada, tanto por corroborar com aspectos de sustentabilidade e preservação dos recursos naturais, quanto por apresentarem reduções de custos de energia. Medidas como utilização de um sistema de condicionamento ambiental com menor consumo de energia e adoção de lâmpadas mais eficientes são algumas das diversas possibilidades de redução de consumo energético. Há mais de duas décadas, Westphal *et al.* (1998) aplicou o conceito de *retrofit* ao sistema de iluminação no prédio da Federação das Indústrias de Santa Catarina com utilização do programa *VisualDOE*, no qual apresentou 35% de redução de consumo de energia elétrica para iluminação e 14% para refrigeração. Nesse estudo, foi analisada a substituição de lâmpadas incandescentes por lâmpadas fluorescentes. Na mesma linha, Clasen (2012) em seu trabalho de *retrofit* do sistema de iluminação em salas de aula da Universidade Federal de Santa Catarina, constatou uma economia de energia de 31,35% a partir da instalação de lâmpadas de tecnologia *Light Emitting Diode* (LED). Foi estimado um *payback* simples de 1 ano e 3 meses. Em estudo similar, Neto (2016) obteve economia de 45% no consumo destinado a iluminação em uma escola pública no Paraná. Recentemente, Rudnicki e Schmidt (2020) constataram um potencial de redução de consumo de energia elétrica destinada a iluminação de 58% a partir da análise da aplicação de lâmpadas LED no prédio público da Associação dos Municípios do Oeste do Paraná.

Pietzsch (2012), ao analisar o comportamento energético de uma edificação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul através do programa *Energyplus*, propôs a substituição das lâmpadas fluorescente por LED. Como resultado, obteve uma redução de consumo de energia destinada a iluminação de 40% e de 13% para condicionar o ar dos ambientes. Já Machado (2018), com

uma metodologia de simulação com a utilização do mesmo programa em um edifício acadêmico em São Paulo demonstrou, a partir da substituição de lâmpadas fluorescentes por lâmpadas LED de fluxo luminoso equivalente, uma redução de 27%.

No que tange ao *retrofit* do sistema de condicionamento de ar, Gamarra e Pereira (2017) analisam a viabilidade técnica e econômica da substituição do sistema de climatização existente (*split* convencional) por um sistema de Vazão de Refrigerante Variável (VRV) em uma biblioteca no Paraná. Ao final do estudo, concluiu-se que a alteração do sistema proporcionaria uma redução de 42,08% no consumo de energia elétrica com climatização, porém, provou-se inviável economicamente devido ao elevado custo inicial de implementação. Taube (2017) faz a mesma análise para um prédio público da Universidade Federal do Pampa, na qual constata uma redução de 39,78% no consumo destinado a climatização dos ambientes da edificação.

O Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (2015) apresentou um estudo de caso aplicado ao prédio público do Ministério de Minas e Energia no Distrito Federal, no qual foram avaliados cenários de substituição dos condicionadores de ar existentes com classificação energética nível C por condicionadores de ar com rotação fixa e variável de classificação energética nível A. Os resultados revelaram economias na ordem de 7,7% e 10%, para os respectivos cenários, no que tange consumo destinado a climatização.

A cidade de Tramandaí, localizada na região do litoral norte do estado do Rio Grande do Sul, com cerca de 52.632 habitantes segundo IBGE (2020), é a segunda cidade mais populosa da região e, com isso, possui diversos prédios públicos, nos quais a implementação de medidas de EE pode trazer benefícios à população. O objetivo do estudo é avaliar propostas de melhorias dos sistemas individuais de iluminação e condicionamento de ar do prédio público da Prefeitura Municipal de Tramandaí (PMT) a partir dos dados do perfil de consumo de energia elétrica e uso final da energia, determinados pela simulação termo energética da edificação com a implementação de um modelo numérico no programa *Energyplus*. Por fim, será apresentado o tempo de retorno do investimento, a fim de demonstrar a viabilidade econômica de cada cenário.

2 METODOLOGIA

O estudo dividiu-se em três etapas principais: Aquisição dos dados, simulação termo energética da edificação existente e dos cenários de melhorias propostas e análise de viabilidade econômica.

2.1 Objeto de Estudo

A edificação da PMT, localizada na Av. da Igreja, número 346 - centro de Tramandaí/RS, foi construída em 1983, possui área total de 4.388,57 m² e cerca de 165 ambientes. A edificação possui cinco pavimentos com projeção aproximada de 46 m de comprimento por 24 m de largura e altura de 17,5 m, fachada frontal voltada para o Sul e orientação Norte-Sul paralela ao eixo longitudinal inclinada 32° a Leste. A Figura 1 apresenta a fachada frontal e o entorno da PMT. O quinto pavimento e parte do quarto pavimento (auditório) foram interditados há dois anos e, dessa forma, não fizeram parte do escopo do trabalho. Assim, foram analisados 3.270,18 m², sendo 2.276,78 m² de escritórios, 643,44 m² de áreas de circulação e corredores, 45,75 m² de escadas, 66,77 m² de depósitos, 82,2 m² de cozinhas e copas e 155,24 m² de banheiros em áreas comuns e privativas.

Figura 1 - (a) Fachada frontal da edificação e (b) Entorno da edificação.



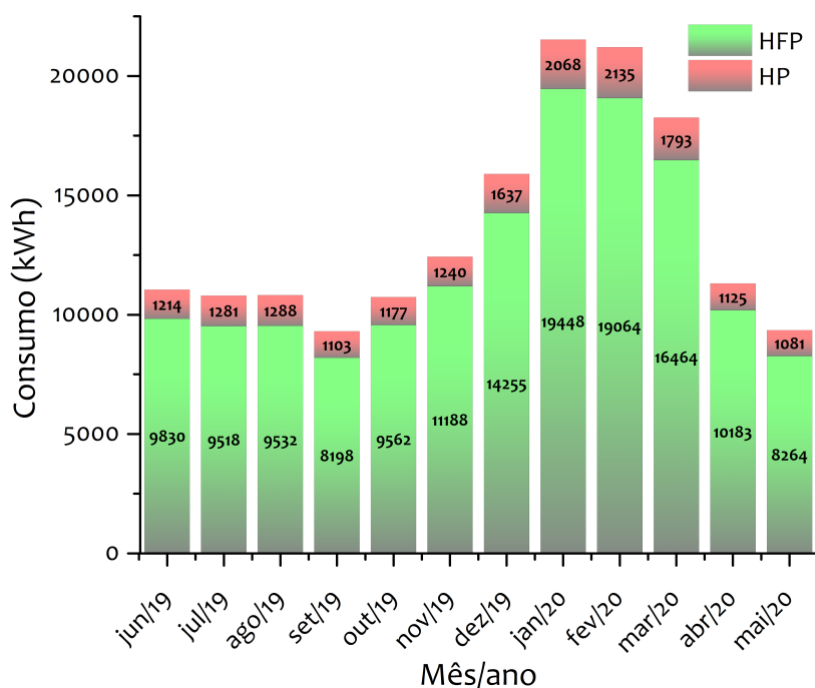
Fonte: Google Earth (2020).

A edificação possui um horário de atendimento ao público das 13:00h às 19:00h de segunda a sexta-feira, período em que há grande circulação de

peças. No entanto, entre 08:00h e 13:00h a edificação é ocupada parcialmente por atividades de limpeza, manutenção ou desenvolvimento de atividades, por parte dos servidores, não relacionadas a atendimento ao público.

A PMT está localizada na área de concessão da Companhia Estadual de Energia Elétrica (CEEE), enquadra-se no subgrupo de tensão A4 e, atualmente, opta pela modalidade tarifária horária verde. É atendida em uma tensão de 13.800 V e possui uma demanda contratada de 155 kW. Foram analisadas as faturas de energia elétrica de junho de 2019 a maio de 2020, possibilitando a compreensão do perfil de consumo de energia elétrica da edificação. A Figura 2 apresenta o consumo de energia elétrica mensal no horário de ponta (HP), período compreendido entre as 18:00h e 21:00h, e no horário fora de ponta (HFP), demais horas do dia. Observa-se, que o consumo é semelhante entre os meses de abril e novembro e consideravelmente superior entre dezembro e março. O consumo médio mensal da edificação no HFP é de 12.125,50 kWh enquanto no HP é de 1.428,50 kWh. Logo, durante os meses considerados na análise a edificação consumiu 162,65 MWh.

Figura 2 - Consumo de energia elétrica mensal.



Fonte: Dos autores (2022).

Analisando o histórico das faturas de energia elétrica da edificação, percebe-se uma variação considerável no preço das tarifas exercidas. A tarifa referente a energia no HFP oscilou entre 0,485337 e 0,561414 R\$/kWh, enquanto o HP variou entre 2,186411 e 2,412791 R\$/kWh nos meses considerados. Nesta tarifa já estão considerados os impostos referentes a incidência do Imposto de Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS), Programa de Integração Social (PIS) e Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social (COFINS). A fim de utilizar um valor que melhor represente a realidade da tarifa exercida, foram utilizados como base para o cálculo de viabilidade econômica os valores de 0,529927 e 2,279054 R\$/kWh para o HFP e HP, respectivamente, obtidos a partir da média aritmética das tarifas aplicadas nos doze meses analisados.

2.2 Simulação Termo Energética

A utilização de um modelo computacional possibilita a iteração com diversas características operacionais e propriedades físicas da edificação que por sua vez, possuem análises reais complexas, por exemplo, troca do sistema de condicionamento de ar, alteração de ganhos internos como iluminação e equipamento, influência da luz diurna, ventilação natural e forçada, infiltração, materiais construtivos, entre outros. Os dados de saídas obtidos refletem um perfil de comportamento da edificação em relação ao consumo de energia, ganho e perda transiente de energia nos componentes construtivos, entre outras possibilidades. No entanto, nem sempre a implementação numérica condiz com o uso e operação real da edificação após a sua ocupação, sendo assim, é conveniente que haja a calibração do modelo numérico. A aquisição e inserção dos dados da edificação em um programa é muito importante para obter-se o resultado mais próximo da realidade.

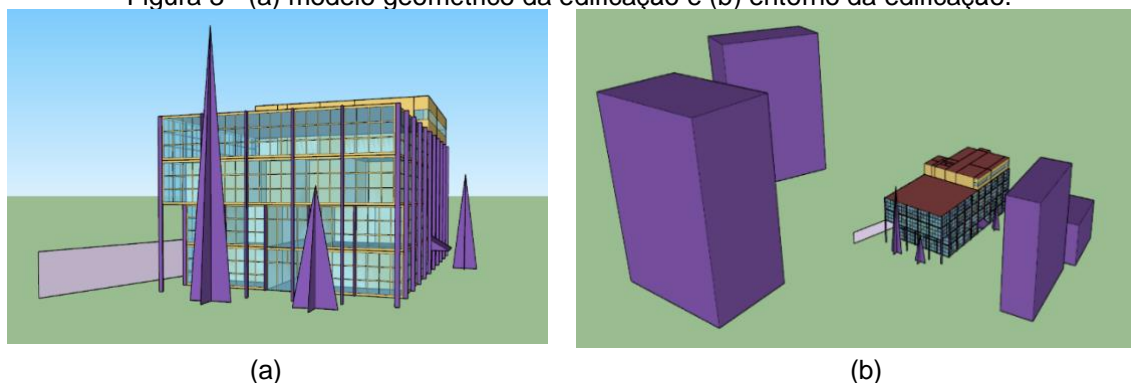
Visando compreender o consumo de energia da edificação existente da PMT e após as alterações nos sistemas de iluminação e condicionamento de ar, utilizou-se da ferramenta de simulação termo energética. Para tal, a edificação foi modelada utilizando as ferramentas de desenho do programa *Sketchup 2017*,

juntamente com o *plugin OpenStudio 2.9*. Para resolução, utilizou-se o algoritmo de cálculo do programa *Energyplus 9.2*, validado conforme os protocolos da *ASHRAE Standard 140 (2014)*. São considerados quatro cenários de simulação: modelo base (Modelo Real), modelo proposto de iluminação (Proposta Iluminação), modelo proposto de climatização (Proposta Climatização) e modelo combinado (Proposta Combinada), o qual prevê a combinação das melhorias propostas. As informações do modelo real foram coletadas *in loco*, a fim de representar o comportamento da edificação existente.

2.2.1 Modelo Real

O modelo geométrico trata-se da representação tridimensional da edificação, que tem o intuito de representar, mais fielmente possível, a construção da edificação existente. Para tal, cada ambiente é representado como uma zona térmica, definida como um volume de ar a temperatura uniforme com uma envoltória composta por paredes, pisos, teto, portas e janelas (Energy, 2019). Na modelagem, foram construídas 165 zonas térmicas, sendo 60 climatizadas e 25 nas quais não foram adicionados ganhos internos por não fazerem parte do escopo do trabalho. A Figura 3 apresenta a vista frontal da modelagem tridimensional e o entorno da edificação.

Figura 3 - (a) modelo geométrico da edificação e (b) entorno da edificação.



(a)
Fonte: Dos autores (2022).

(b)

O entorno da edificação impacta diretamente em seu consumo de energia. Objetos como árvores e outros edifícios causam um efeito de sombreamento na

edificação, de modo a influenciar na quantidade de luz visível e na radiação incidente sobre a edificação e, por isso, devem ser considerados e modelados. Simplificações foram realizadas devido a limitações do programa. Assim, a simulação do modelo geométrico será validada a partir da comparação do consumo de energia elétrica do modelo real com o consumo de energia elétrica real. Para isto, foram analisados o consumo total anual e o perfil de consumo ao longo dos meses do ano.

A edificação localiza-se na zona bioclimática 2 (ABNT NBR 15.220-3, 2003). Os dados climáticos utilizados na simulação são oriundos da estação meteorológica automática situada em Tramandaí, código 869900, do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). O arquivo contém registros no período entre 2001 e 2010 no formato *Energyplus Weather* (Climate.OneBuilding.Org, 2020), do tipo Ano Meteorológico Típico (*Typical Meteorological Year - TMY*), onde são selecionados os meses mais expressivos que ocorreram no período medido, resultando em um arquivo com 8760 horas de dados.

2.2.2 Características Construtivas: Envoltória, Cobertura e Piso

As características construtivas e especificações físicas dos elementos que constituem a envoltória da edificação são apresentadas no Tabela 1. Padrões para cada tipo de construção são assumidos, respeitando a ordem crescente do exterior da zona térmica para o interior. As propriedades termofísicas, que são condições necessárias para definir o material, são: espessura – L , condutividade térmica – k , massa específica – ρ , calor específico – c_p e resistência térmica – R . As paredes internas e externas possuem acabamento branco e foi considerado emissividade (ϵ) de 0,9 e a absortividade solar térmica/visível (α) de 0,2. Demais valores de propriedades e características foram extraídos da ABNT NBR 15.220-2 (2003).

2.2.3 Características Construtivas: Esquadrias

As esquadrias externas foram representadas no modelo geométrico, considerando os marcos e travessas conforme as dimensões do projeto

arquitetônico. Os vidros externos possuem a característica fumê e são considerados como fixos. As propriedades termofísicas das esquadrias e dos vidros são apresentadas na Tabela 2 e Tabela 3, respectivamente. As características consideradas são: transmitância solar - τ_s , transmitância visível - τ_v , transmitância infravermelho - τ_{in} , refletividade solar frontal e posterior - ρ_s e emissividade infravermelho frontal e posterior - ε_{in} . Com essas propriedades, o vidro possui o valor do coeficiente de ganho de calor solar (SHGC – *Solar Heat Gain Coefficient*) de aproximadamente 0,59. Neste estudo não foram considerados sistemas de proteção solar. Os vidros internos estão presentes parcialmente em divisórias internas de madeiras e como divisórias entre ambientes. O valor do SHGC dos vidros internos é 0,81.

Tabela 1 - Características construtivas e propriedades termofísicas

Montagem	Material	L (m)	k (W/m·K)	ρ (kg/m ³)	c_p (J/kg·K)	R (m ² ·K/W)
Paredes interna e externa	Argamassa reboco	0,025	1,15	2.000	1.000	-
	Cerâmica (bloco 9x14x24)	0,009	0,9	920	1.600	-
	Camada de ar	-	-	-	-	0,175
Divisória interna de madeira	Argamassa reboco	0,025	1,15	2.000	1.000	-
	Placa de MDF	0,025	0,17	700	2.300	-
	Camada de ar	-	-	-	-	0,14
Piso	Placa de MDF	0,025	0,17	700	2.300	-
	Solo arenoso	0,5	0,30	1.500	2.090	-
	Brita	0,025	0,7	1.500	800	-
	Concreto	0,1	1,75	2.200	1.000	-
	Cimento	0,007	0,72	1.860	840	-
Laje	Piso Cerâmico	0,01	0,9	1.600	920	-
	Piso Cerâmico	0,01	0,9	1.600	920	-
	Laje maciça de concreto	0,1	1,75	2.200	1.000	-
Cobertura	Argamassa de reboco	0,025	1,15	2.000	1.000	-
	Telha Fibrocimento	0,01	0,95	1.900	840	-
	Camada de ar	-	-	-	-	0,21
	Laje maciça de concreto	0,1	1,75	2.200	1.000	-
	Argamassa de reboco	0,025	1,15	2.000	1.000	-

Fonte: ABNT NBR 15220-2 (2003); ASHRAE Handbook (2017); Energy (2019).

Aberturas internas, como portas e janelas, não foram representadas. No entanto, algumas zonas térmicas da edificação são abertas entre si. Com o intuito de representar essa característica, foi utilizada a propriedade *Air*

Boundary como material construtivo. Essa propriedade faz com que a resistência térmica do material seja desprezada, possibilitando a troca de ar entre as zonas térmicas (Energy, 2019).

Tabela 2 - Características termofísicas das esquadrias

Descrição	L (m)	k (W/m·K)	ρ (kg/m ³)	c_p (J/kg·K)	R (m ² ·K/W)	ε (-)	α (-)
Alumínio	0,003	230	2700	880	-	0,9	0,97

Fonte: ABNT NBR 15220-2 (2003); ASHRAE Handbook (2017).

Tabela 3 - Características termofísicas dos vidros

Descrição	L (m)	τ_s (-)	τ_v (-)	τ_{in} (-)	ε_{in} (-)	ρ_s (-)	k (W/m·K)
Vidro Fumê - Externo	0,006	0,46	0,46	0	0,84	0,05	0,9
Vidro simples (clear) - Interno	0,006	0,775	0,881	0	0,84	0,071	0,9

Fonte: ASHRAE Handbook (2017); Energy (2019).

2.2.4 Cargas Internas

As cargas internas referem-se as fontes que emitem calor no interior dos ambientes. Essa liberação de calor é atribuída ao sistema de iluminação, equipamentos, pessoas e infiltrações.

2.2.4.1 Sistema de Iluminação

O sistema de iluminação da PMT apresenta circuitos fechados, ou seja, para cada ambiente fechado até o teto existe, no mínimo, um acionamento independente para a iluminação interna do ambiente. A partir da coleta dos dados foi possível obter informações de quantitativos de lâmpadas e luminárias, assim como, de suas respectivas características técnicas.

O sistema possui uma potência total instalada de 22.023 W, sendo 1.508 W destinados a iluminação externa. Desses, existem diferentes tecnologias de lâmpadas, sendo 465 do tipo fluorescente, 135 LED, 2 Vapor Metálico e 2 incandescente.

Para simulação, além da potência de iluminação instalada na zona térmica, se faz necessário informar o valor referente a fração visível e radiante de dissipação de cada luminária. Assim, adotou-se os valores de 0,08 e 0,73 para lâmpadas de tecnologia incandescente, 0,21 e 0,37 para fluorescente e 0,25 e 0,51 para LED, respectivamente, conforme recomendado por (Ahn *et al.*, 2014; ASHRAE Handbook, 2017). Já as lâmpadas de vapor metálico, como estão na área externa do edifício, não necessitam de tais informações.

As diversas tipologias de ambientes encontradas na edificação apresentam diferentes perfis de utilização do sistema de iluminação. Assim, considerou-se que, a partir dos horários de funcionamento da edificação, os ambientes de escritório, assim como escadas e circulação utilizam diariamente o sistema por 8 horas, enquanto cozinhas/copas e banheiros de uso comum por 4 horas. Banheiros de uso privativo e depósitos utilizam por 2 horas e 5 minutos, respectivamente. Já a iluminação externa, acionada por sensor fotoelétrico, opera entre as 18:00h e 06:00h.

2.2.4.2 Equipamentos

Ao longo da auditoria energética foram levantados os quantitativos dos principais equipamentos elétricos da edificação. Equipamentos como bebedouros, impressoras e o elevador tiveram seus dados de potência, informados pelo fabricante, levantados *in loco*. Para os demais equipamentos, foram utilizados valores de potências recomendadas pela Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG). Para todos os equipamentos considerou-se fração radiante igual a 0,3 e fração convectiva de 0,7 (ASHRAE Handbook, 2017; Energy, 2019).

A Tabela 4 apresenta os equipamentos com suas respectivas potências e regime de utilização, inseridos no *Energyplus* para cálculo de consumo de energia.

Tabela 4 - Equipamentos elétricos

Equipamento	Quantidade	Potência (W)	Utilização Média Diária (horas)
Bebedouro*	26	80	24
Cafeteira Elétrica	20	600	1
Chaleira Elétrica	14	600	1
Computador	197	100	8
Elevador*	1	2.237	0,5
Forno Micro-ondas	8	1.200	0,3
Frigobar	16	70	24
Geladeira	7	110	24
Impressora Grande*	54	120	1
Impressora Pequena*	12	20	1
Notebook	5	30	8
Telefone sem Fio	49	3	24
Televisão	6	150	5
Ventilador	20	65	8

*Dados coletados no local.

Fonte: Adaptada de CEMIG (2019).

2.2.4.3 Pessoas

Para cada ambiente regularmente ocupado foi coletado o número de ocupantes. Configurou-se o perfil de ocupação de modo que enquanto o ambiente estiver iluminado todos os ocupantes estarão presentes. Cada ocupante dissipa 117 W de calor com fração radiante igual a 30%, referente a taxa metabólica para uma pessoa realizando a atividade de digitação (ASHRAE Handbook, 2017).

2.2.4.4 Infiltração de Ar nas Zonas Térmicas

A renovação do ar interior em ambientes climatizados é obrigatória e deveria ser prevista no edifício de estudo, no entanto, este não possui um sistema mecânico dedicado a esta finalidade. A ABNT NBR 16401-3 (2008) estipula que a vazão mínima de ar exterior a ser suprida pelo sistema de ventilação em ambientes de escritório é de 0,3 L/s.m², com o intuito de manter a concentração de poluentes no ar em nível aceitável. Assim, para a simulação,

considera-se que a vazão mínima exigida é atendida em decorrência da abertura e do fechamento de portas e janelas, assim como de infiltrações por frestas.

2.2.5 Sistema de Climatização

A PMT possui 60 ambientes climatizados, que somam 1.864,22 m², equivalentes a 57% da área total avaliada. Foram identificados 66 condicionadores de ar do tipo *Split high wall* de rotação fixa, com capacidades de refrigeração entre 9.000 Btu/h (2.636 W) e 30.000 Btu/h (8.787 W), totalizando 1198 kBtu/h (350,894 kW ou 99,7 TR – Toneladas de Refrigeração). Todos os equipamentos são independentes e apresentam um coeficiente de performance (COP) que varia entre 2,81 e 3,46 – regulamentados pelo INMETRO e com níveis A, B, C e D de EE (INMETRO, 2020). O valor percentual de condicionadores de ar instalados na edificação por nível de classificação de EE: 30,30% nível A, 22,73% nível B, 40,91% nível C e 6,06% nível D.

Os condicionadores de ar levantados foram modelados como *Packaged Terminal Heat Pumps* (PTHP). Os dados dos equipamentos foram obtidos nos catálogos dos fabricantes e nas informações cedidas pelo INMETRO. Foi considerado que todos os equipamentos possuem a funcionalidade de operar em ciclo reverso, ou seja, operam tanto para resfriamento quanto aquecimento. Para informações além das características técnicas de cada equipamento foram utilizados valores padrão sugeridos pelo programa. A disponibilidade do sistema de climatização está vinculada a ocupação, ou seja, os condicionadores de ar só podem estar em operação caso o ambiente esteja sendo ocupado. A temperatura dos termostatos foi considerada como constante durante o ano inteiro, configurada para 24 °C para resfriamento e 21 °C para aquecimento.

2.3 Propostas de Melhorias

É previsto o *retrofit* dos sistemas de iluminação e climatização como ação de redução do consumo de energia elétrica da edificação. Para isto, são analisadas tecnologias disponíveis no mercado, capazes de atender as necessidades específicas da edificação e possivelmente proporcionar igual ou

melhor conforto e qualidade dos serviços já prestados, consumindo menor quantidade de energia.

2.3.1 Sistema de Iluminação

A determinação por um *retrofit* no sistema de iluminação não se resume a simples substituição de lâmpadas por outras mais eficientes energeticamente. O processo abrange a análise das tecnologias existentes, os benefícios obtidos com a aplicação da nova solução e a viabilidade econômica nessa troca. As lâmpadas propostas levam em consideração o fluxo luminoso, em lúmens, das lâmpadas atuais instaladas, uma vez considerado que os níveis mínimos de iluminância, em lux, já são atendidos nos ambientes conforme a ABNT NBR ISO/CIE 8995-1 (2013), que trata sobre a iluminação de ambientes de trabalho. Temperatura de cor e vida útil das lâmpadas são características também consideradas. Assim, as lâmpadas propostas devem possuir propriedades similares, entregando igual ou melhor nível de conforto e potência inferior às lâmpadas atuais.

As lâmpadas selecionadas permitem a substituição imediata das lâmpadas atuais, sem a necessidade de troca das luminárias, com exceção das lâmpadas externas de vapor metálico, que terão seu conjunto (lâmpada e luminária) completamente substituído por refletores de tecnologia LED.

2.3.2 Sistema de Condicionamento de Ar

Propõem-se a substituição dos condicionadores de ar atuais por máquinas com características semelhantes, porém mais eficientes energeticamente. A proposta contempla a troca dos condicionadores de ar menos eficientes, com níveis de EE C e D por equipamentos de rotação fixa de mesma capacidade de refrigeração e vazão de ar, porém com nível de EE A. A única exceção é o condicionador de ar de uma sala do terceiro pavimento, que possui capacidade de refrigeração de 22.000 Btu/h (6.443 W) e será substituído por um de 24.000 Btu/h (7.029 W), modelo mais comum e disponível no mercado.

2.4 Análise de Viabilidade Econômica

Para realização do *retrofit* dos sistemas são necessários investimentos, tanto em material quanto em mão-de-obra. O *Payback* Simples (PBS) é um método destinado a avaliação do tempo de retorno do investimento. A partir deste, é determinado o prazo necessário para que o capital inicial investido seja recuperado. Este fator ajuda a determinar a viabilidade e atratividade da proposta do ponto de vista financeiro.

A fim de calcular o PBS das propostas, foram considerados apenas os custos de compra das novas lâmpadas e condicionadores de ar, que compõem o investimento total, sendo desconsiderado o custo relacionado a substituição e descarte dos equipamentos antigos. Tais atividades poderiam ser realizadas pela equipe de manutenção interna do prédio da PMT e não exigiriam custos adicionais. A economia anual proporcionada, causada pela redução de consumo de energia elétrica dos sistemas propostos, será quantificada a partir da multiplicação da redução de consumo no HFP e HP por seus respectivos preços de tarifa. Neste cálculo simplificado será também desconsiderado o benefício relacionado a redução de demanda e a taxa de crescimento do preço da tarifa de energia elétrica ao longo dos anos. O cálculo do PBS é expresso pela Equação 1,

$$PBS = \frac{I_t}{E_a} \quad (\text{anos}) \quad (1)$$

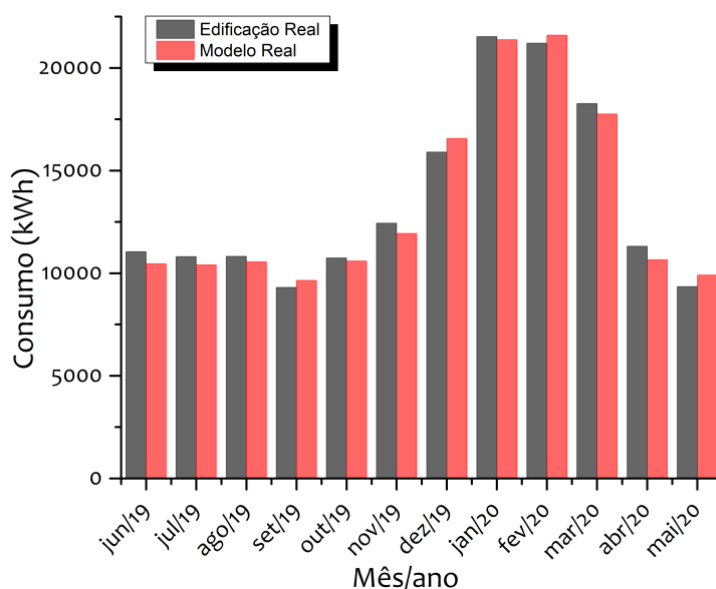
onde I_t é o investimento total (R\$) e E_a é a economia anual proporcionada (R\$/anos).

3 RESULTADOS

A validação do modelo numérico foi realizada através da comparação do consumo mensal simulado com o medido pela concessionária. A Figura 4 apresenta uma comparação entre o perfil de consumo de energia elétrica ao longo de um ano da edificação com os dados do Modelo Real. Observa-se que os perfis de consumo são semelhantes. O Modelo Real apresenta consumo

anual de 161,40 MWh, com um erro global de 0,77% em relação ao valor referência de 162,65 MWh e erros mensais que variam entre -6,00% e 5,31%, o que comprova que o modelo é uma boa representação da edificação existente.

Figura 4 - Perfil de consumo de energia elétrica.



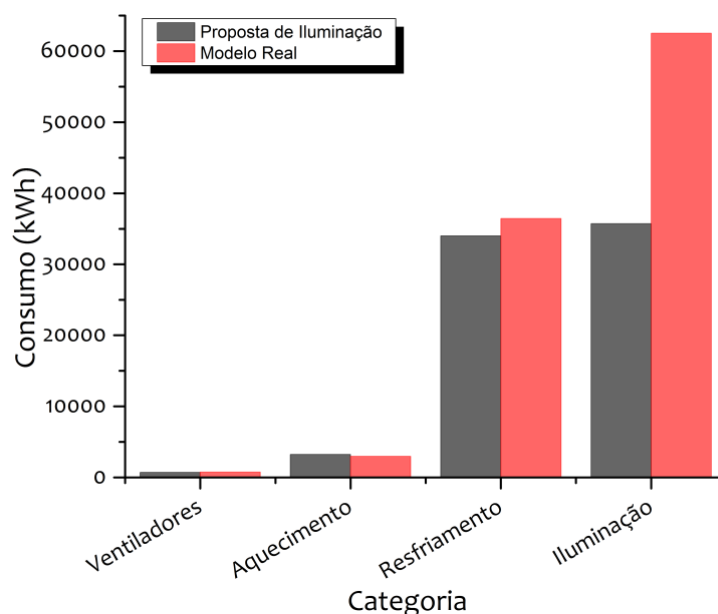
Fonte: Dos autores (2022).

A fim de facilitar a compreensão dos resultados obtidos, segmentou-se o uso em categorias: climatização (ventiladores, aquecimento e resfriamento), equipamentos e iluminação. O modelo real apresentou um consumo por uso final de: 62.496,38 kWh destinados a iluminação (38,72%), 58.740,17 kWh para equipamentos (36,39%) e 40.164,79 kWh para climatização (24,89%), sendo 36.436,51 kWh para resfriamento, 2.967,49 kWh para aquecimento e 760,79 kWh para ventiladores. O consumo destinado a iluminação e climatização somados representam 63,61% do consumo total da edificação, o que é comum, conforme já mencionado estes sistemas chegam a representar até 70% do consumo total (PROCEL, 2020). Já o percentual mais elevado, 38,72% para iluminação, atribui-se a grande quantidade de lâmpadas fluorescentes instaladas.

3.1 Retrofit do Sistema de Iluminação

A proposta contempla a substituição de 464 lâmpadas com um custo total de material aproximado de R\$ 14.116,31. A partir do *retrofit* do sistema de iluminação foi possível reduzir a potência instalada de 22.023 W para 12.000 W, representando 54,49%. Já a Densidade de Potência de Iluminação (DPI) média dos ambientes reduziu de 7,30 W/m² para 3,93 W/m². A Figura 5 apresenta o cenário do consumo de energia por uso final, no qual o consumo de energia destinado a iluminação teve redução de 42,85%.

Figura 5 - Consumo de energia anual por uso final devido ao retrofit de iluminação.



Fonte: Dos autores (2022).

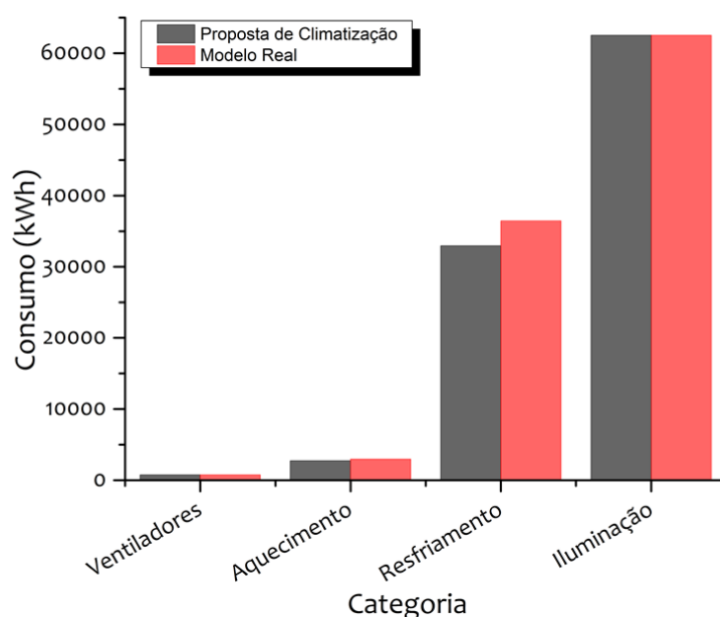
A energia dispendida para resfriar os ambientes foi reduzida em 2.446,43 kWh (7,20%), devido a diminuição de carga térmica proveniente do sistema de iluminação nos ambientes, assim como os ventiladores, que reduziram seu consumo em 45,31 kWh (6,33%). Contudo, devido a menor potência instalada e, conseqüentemente, menor liberação de calor pelas lâmpadas, a energia necessária para aquecer os ambientes teve um aumento de 288,02 kWh (8,85%). Assim, a energia total necessária para climatizar os ambientes apresentou uma redução de 5,49%. Por fim, o *retrofit* do sistema de

iluminação apresentou consumo de 132.417,71 kWh, redução de 28.983,76 kWh, o que representa 17,96% do consumo total da edificação, sendo 17,71% do HFP e 20,51% do HP. Como esperado, o consumo de energia destinado a equipamentos não sofreu modificações.

3.2 *Retrofit* do Sistema de Condicionadores de Ar

A proposta prevê a substituição de 31 condicionadores de ar com um custo total de R\$ 75.029,05. O *retrofit* do sistema de condicionadores de ar proporcionou um ganho de EE individual dos equipamentos. O COP médio entre todos os equipamentos instalados aumentou de 3,06 W/W para 3,30 W/W. Considerando apenas os 31 condicionadores de ar instalados, houve um ganho de eficiência na ordem de 18,18%, visto que o COP médio aumentou de 2,86 W/W para 3,38 W/W. A Figura 6 apresenta a redução de consumo de energia em comparação com o Modelo Real.

Figura 6 - Consumo de energia por uso final devido ao *retrofit* do condicionamento de ar.



Fonte: Dos autores (2022).

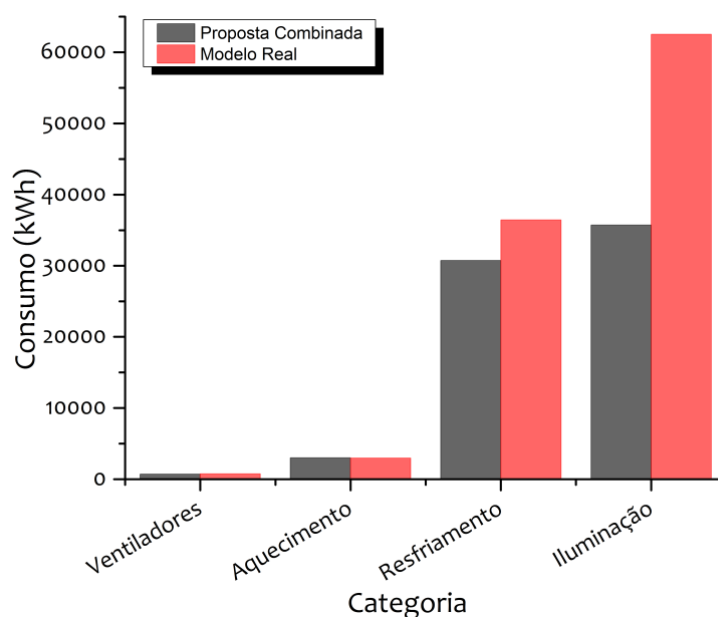
A solução proposta apresentou redução de 9,60% no consumo de energia para resfriamento, 7,29% para aquecimento e 0,12% para os ventiladores,

totalizando uma diminuição de 9,25% da energia destinada à climatização. As categorias de equipamentos e iluminação não apresentaram alterações, conforme esperado. Portanto, a proposta de *retrofit* do sistema de condicionamento de ar resultou em um consumo anual de 157.684,97 kWh, redução de 3.716,51 kWh (2,30%), sendo 2,36% do HFP e 1,69% do HP.

3.3 Combinação das Propostas

A partir da combinação dos *retrofits* dos sistemas de iluminação e de condicionamento de ar obtém-se a maior redução de consumo de energia elétrica para a edificação. A Figura 7 apresenta a redução de consumo de energia em comparação com o Modelo Real.

Figura 7 - Consumo de energia por uso final devido aos *retrofits* combinados



Fonte: Dos autores (2022).

A combinação das propostas apresentou redução de 15,66% no consumo de energia para resfriamento e 5,96% para os ventiladores, no entanto acréscimo de 1,65% para aquecer as zonas térmicas, totalizando uma diminuição de 14,20% de energia destinada a climatização. Logo, a combinação resultou em

um consumo total anual de 128.917,80 kWh, redução de 32.483,68 kWh, o que equivale a 20,13% do consumo total da edificação, sendo 19,94% do HFP e 22,05% do HP.

3.3 Análise de Viabilidade Econômica

A partir das reduções de consumo de energia elétrica encontradas para cada proposta é possível quantificar as economias monetárias que as soluções proporcionam, as quais são apresentadas na Tabela 5. Observa-se, que para a combinação das propostas de *retrofit* são obtidas as maiores economias anuais, R\$ 15.522,29 e R\$ 7.275,41 para o HFP e HP, respectivamente.

Tabela 5 - Economias proporcionadas.

Proposta	Redução Anual HFP	Redução Anual HP	Economia Anual HFP	Economia Anual HP
Iluminação	26.013,99 kWh	2.969,77 kWh	R\$ 13.785,52	R\$ 6.768,27
Climatização	3.472,27 kWh	244,24 kWh	R\$ 1.840,05	R\$ 556,63
Combinada	29.291,38 kWh	3.192,30 kWh	R\$ 15.522,29	R\$ 7.275,41

Fonte: Dos autores (2022).

A Tabela 6 apresenta o PBS de cada proposta, considerando a economia anual proporcionada e o investimento total. O período de retorno sobre o investimento da proposta de iluminação é de aproximadamente 9 meses. Uma vez considerada a vida útil de 50.000 horas para as novas lâmpadas instaladas (equivalente a 14 anos, conforme perfil de utilização do sistema de iluminação), têm-se que, a partir deste período, a PMT passaria a economizar uma quantia significativa de recurso financeiro ao ano. A proposta de climatização apresenta um período de retorno sobre o investimento superior a 31 anos, o que é considerado elevado, visto que a vida útil dos equipamentos instalados é estimada em 10 anos. Assim, a proposta de climatização não se demonstra economicamente viável, apesar de reduzir em torno de 3,72 MWh/ano. O último cenário apresentou um investimento total de R\$ 89.145,36 e PBS menor que 4 anos, de modo que a proposta de *retrofit* do sistema de condicionamento de ar torne-se mais atrativa financeiramente, desde que seja combinada com o *retrofit* do sistema de iluminação.

Tabela 6 – Payback simples das propostas

Proposta	Economia Anual	Investimento Total	Payback simples
Iluminação	R\$ 20.553,79	R\$ 14.116,31	0,7 anos
Climatização	R\$ 2.396,68	R\$ 75.029,05	31,3 anos
Combinada	R\$ 22.797,71	R\$ 89.145,36	3,9 anos

Fonte: Dos autores (2022).

4 CONCLUSÕES

O uso de simulação computacional em edificações apresenta-se como um recurso de grande valia, uma vez que permite comparar variáveis de interesse em diferentes cenários de melhorias antes da efetiva implementação. Mediante modelagem da PMT foram obtidos resultados satisfatórios, com diferença entre o consumo real e simulado menor que 1% para os doze meses analisados.

A partir dos resultados apresentados, comprova-se a importância da iniciativa pública na realização de ações de EE, visto que, apenas para uma edificação, analisando-se o quesito iluminação, a economia anual de energia seria de 28.983,76 kWh, proporcionando uma redução de custos anual estimada em R\$ 20.553,79. Assim, para o *retrofit* do sistema de iluminação, por apresentar um período de retorno de investimento de apenas 9 meses, recomenda-se que seja implementado o mais breve possível, de forma a gerar uma melhor utilização dos recursos públicos. A utilização de condicionadores de ar com nível de EE A é mais economicamente atrativa do que a utilização de equipamentos menos eficientes, entretanto, recomenda-se empregar esses equipamentos na concepção da edificação e não para substituição, o que ainda resulta inviável. Portanto, sugere-se que o investimento em *retrofit* do sistema de condicionamento de ar seja gradual, ou seja, na medida que os equipamentos antigos finalizem a vida útil ou apresentem avarias, sejam substituídos por equipamentos mais eficientes. Outra alternativa possível seria investir as economias proporcionadas pelo *retrofit* do sistema de iluminação na implementação gradativa do *retrofit* do sistema de condicionamento de ar.

Para trabalhos futuros sugere-se a avaliação da EE da envoltória da edificação e uma análise de redução de consumo de energia pelo aproveitamento da luz natural, visto que a edificação possui uma área envidraçada considerável. Assim como, a avaliação relacionada ao atendimento

dos requisitos mínimos de iluminância nos ambientes, conforme ABNT NBR ISO/CIE 8995-1 e qualidade do ar interior, conforme ABNT NBR 16401-3.

REFERÊNCIAS

ABNT, **NBR15220-2**. Desempenho Térmico de Edificações Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator de calor solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, Brasil, 2003.

ABNT, **NBR15220-3**. Desempenho Térmico de Edificações Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, Brasil, 2003.

ABNT, **NBR16401-3**. Instalações de ar-condicionado – Sistemas centrais e unitários. Parte 3: Qualidade do ar interior. Primeira Edição. Rio de Janeiro, 2008.

ABNT, **NBR ISO/CIE. 8995-1**. Iluminação de Ambientes de Trabalho Parte 1: Interior. Rio de Janeiro, Brasil, 2013.

Ahn, B. L., Jang, C. Y., Leigh, S. B., Yoo, S., Jeong, H., **Effect of LED lighting on the cooling and heating loads in office buildings**. Applied Energy 113 (2014) 1484–1489, 2014.

ASHRAE, **ANSI/ASHRAE140** - Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs (SI Edition), 2014.

ASHRAE, **ASHRAE Handbook** – Fundamentals (SI edition). Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, 2017.

Brasil. Lei Nº 10.295, de 17 de Outubro de 2001. **Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia**, 2001 Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/leis_2001/l10295.htm#:~:text=LEI%20No%2010.295%2C%20DE%2017%20DE%20OUTUBRO%20DE%202001.&text=Disp%C3%B5e%20sobre%20a%20Pol%C3%ADtica%20Nacional,Art>.

Acesso em set/2020.

CEMIG, **Energia Inteligente: Guia do Melhor Consumo – Dicas de Economia de Energia e Segurança com a Rede Elétrica**, 2019. Disponível

em: <http://www.cemig.com.br/pt-br/A_Cemig_e_o_Futuro/sustentabilidade/nossos_programas/Eficiencia_Energética/Paginas/Material_Educacional.aspx>. Acesso em out/2020.

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, **Guia para Eficiência Energética nas Edificações Públicas**. Rio de Janeiro, 2015.

Clasen, B. C., **Estudo de Retrofit de Iluminação de Salas de Aula da UFSC**. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2012.

Climate.OneBuilding.Org, 2020. Disponível em: <<http://climate.onebuilding.org>>. Acesso em set/2020.

Energy, U. S. D., **EnergyPlus Essentials: EnergyPlus™ Version 9.2.0 Documentation**, 2019.

EPE, **Balanço Energético Nacional (BEN) 2020: Ano base 2019**, 2020. Disponível em < <https://ben.epe.gov.br> >. Acesso em out/2020.

Gamarra, M. G. U.; Pereira, L. P., **Simulação Termo-Energética de uma Biblioteca Visando Aumento da Eficiência Energética – Estudo de Caso**. Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil, 2017.

IBGE, **Cidades e Estados**, 2020. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/rs/tramandai.html>>. Acesso em nov/2020.

INMETRO, **Condicionadores de ar – índices antigos (CEE)**, 2020. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/condicionadores.asp>>. Acesso em set/2020.

Machado, D. F. C., **Análise Comparativa entre Estratégias de Retrofit e seus Impactos na Eficiência Energética no Edifício Acadêmico 2 – Unifesp, Baixada Santista – SP**. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) Engenharia de Petróleo e Recursos Renováveis, Universidade Federal de São Paulo. Santos, 2018.

Neto, A. N. L., **Proposta de Retrofit para o Sistema de Iluminação Artificial de uma Escola Pública**. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Londrina. Londrina. 2016.

PROCEL, **PROCEL EPP - Eficiência Energética nos Prédios Públicos**, 2006. Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br/data/Pages/LUMIS623FE2A5ITEMID5C0D828A5E894B4AA0280C96CCED1760PTBRIE.htm>>. Acesso em set/2020.

PROCEL, **Manual de Aplicação dos Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C) 4.1**. Versão 2, 2016. Disponível em: <Erro! A referência de hiperlink não é válida. Acesso em out/2020.

PROCEL, **Resultados PROCEL 2020: Ano Base 2019**, 2020. Disponível em < <http://www.procelinfo.com.br/resultadosprocel2020/>>. Acesso em out/2020.

Pietsch, D. A., **Dimensionamento de um Sistema de Ar Condicionado e Análise Energética para um Prédio**. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) Engenharia Mecânica., Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2012.

Rudnicki, L.; Schmidt, A. O., **Avaliação da melhoria na classificação energética e viabilidade financeira de Retrofit na iluminação de um prédio público**. Revista Competitividade e Sustentabilidade, v. 7, n. 1, p. 50-57. 2020.

Taube, G. E., **Análise do desempenho termoenergético do prédio NTIC da Universidade Federal do Pampa Campus Alegrete**. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) Engenharia Mecânica., Universidade Federal do Pampa. Alegrete, 2017.

Westphal, F. S.; Ghisi, E.; Lamberts, R., **Simulação energética do edifício sede da FIESC: estudo de retrofit no sistema de iluminação**. VII Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído, 1998.

Enviado em: 29 mar. 2022.

Aceito em: 11 ago. 2022.

Editora responsável: Bianca Neves Machado.