

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO
NÍVEL MESTRADO**

JOSÉ MÁRIO BARBOSA ALVES

**Análise da eficiência energética da envoltória de edifícios públicos segundo a
Instrução Normativa Inmetro para edificações Comerciais, de Serviços e
Públicas – INI-C: Estudo de caso na UNIFAL-MG.**

São Leopoldo - RS

2022

JOSÉ MÁRIO BARBOSA ALVES

Análise da eficiência energética da envoltória de edifícios públicos segundo a Instrução Normativa Inmetro para edificações Comerciais, de Serviços e Públicas – INI-C: Estudo de caso na UNIFAL-MG.

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo, pelo Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Orientador: Prof. Dr. Marco Aurélio Stumpf González

São Leopoldo - RS

2022

A474a Alves, José Mário Barbosa.
Análise da eficiência energética da envoltória de edifícios públicos segundo a Instrução normativa Inmetro para edificações comerciais, de serviços e públicas – INI-C : estudo de caso na UNIFAL-MG / por José Mário Barbosa Alves. – 2022.
115 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) — Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, São Leopoldo, RS, 2022.
“Orientador: Dr. Marco Aurélio Stumpf González”.

1. Eficiência energética. 2. Certificação ambiental.
3. Edificações públicas. 4. INI-C. I. Título.

CDU: 725.1:621.311

JOSÉ MÁRIO BARBOSA ALVES

**Análise da eficiência energética da envoltória de edifícios públicos segundo a
Instrução Normativa Inmetro para edificações Comerciais, de Serviços e
Públicas – INI-C: Estudo de caso na UNIFAL-MG.**

Dissertação apresentada como requisito parcial
para obtenção do título de Mestre em Arquitetura e
Urbanismo, pelo Programa de Pós-Graduação em
Arquitetura e Urbanismo da Universidade do Vale
do Rio dos Sinos - UNISINOS

Aprovado em 23 de setembro de 2022.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Andrea Parisi Kern – UNISINOS - PPGE

Profa. Dra. Maria Fernanda Oliveira – UNISINOS

Prof. Dr. Marco Aurélio Stumpf Gonzalez – UNISINOS

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Luiz Antônio e Fátima, aos meus irmãos Nayara e Luiz Henrique e à minha vovó Terezinha pelo incentivo e apoio durante estes anos.

Ao Prof. Marco Aurélio Stumpf Gonzalez pela orientação desta pesquisa.

Ao Prof. Daniel Reis Medeiros pela contribuição com este trabalho.

À querida amiga Aline pelo ouvido atento, pelas palavras confortantes e pela companhia afetuosa no dia a dia sul-rio-grandense.

Aos amigos Marcos, Rafael e André Luiz pelos momentos de distração e divertimento durante este período.

Aos amigos Charles, Cláudio, Vinícius, Lucas, Ricardo e Marinne pelas horas do café sempre temperado com ideias e conversas que contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

À Universidade Federal de Alfenas – Unifal-MG pela oportunidade para que eu expandisse meus conhecimentos.

Los edificios,
Rodeados de entornos variables, donde cambian el día y la noche,
el calor y el frío, el viento y la calma, la lluvia y el sol;
Se convierten en refugios de artificiales condiciones, como islas de
tranquilidad en un mundo incómodo.

Rafael Serra

RESUMO

A partir das crises energéticas vividas no Brasil, foram implementadas iniciativas de redução, conservação e eficiência do uso da energia elétrica nas edificações públicas. A publicação da Instrução Normativa nº 02/2014 pelo Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão – MPOG tornou obrigatória a obtenção da classificação “A” (máxima) da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia – ENCE para os projetos e para suas respectivas obras, na esfera da Administração Pública Federal. Como procedimento para a obtenção desta etiqueta, os projetos ou edifícios já construídos são submetidos a análise e classificação de sua eficiência energética utilizando-se os métodos previstos na Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas - INI-C. Esta pesquisa objetivou analisar o potencial de ampliação da eficiência energética da envoltória de um modelo de edifício público educacional por meio da proposição de estratégias para a melhoria do seu desempenho. Para o estudo de caso foi elaborado um modelo arquitetônico com as características e propriedades físicas dos elementos construtivos comumente adotados pela Universidade Federal de Alfenas - Unifal-MG. Utilizando-se o método simplificado previsto na normativa a envoltória do metamodelo foi classificada com o nível A de eficiência. Embora sua classificação tenha obtido o nível mais elevado foram propostas estratégias de melhoria com vistas a redução da carga térmica total de refrigeração para potencializar sua eficiência. As estratégias abordaram intervenções no envidraçamento das aberturas, na cobertura, nas paredes externas e no ângulo de sombreamento vertical. Por meio da adoção de um conjunto de estratégias pode-se alcançar reduções de até 18,36% em relação às cargas térmicas de resfriamento apuradas para o metamodelo.

Palavras-chave: Eficiência Energética. Certificação Ambiental. INI-C.

ABSTRACT

Based on the energy crises experienced in Brazil, initiatives were implemented to reduce, conserve, and improve the use of electric energy in public buildings. The publication of Instruction nº 02/2014 by the Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão – MPOG made it mandatory to obtain the “A” (maximum) rating of the Etiqueta Nacional de Conservação de Energia – ENCE for projects and construction sites in the sphere of the Federal Public Administration. As a procedure for obtaining this standard, existing projects or buildings should be submitted for analysis and classification of their energy efficiency using the methods provided in Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas - INI-C. This research aimed to analyze the potential for expanding the energy efficiency of the envelope of a public educational building model by proposing strategies to improve its performance. For the case study, an architectural model was elaborated with the characteristics and physical properties of the constructive elements commonly adopted by the Universidade Federal de Alfenas - Unifal-MG. Using the simplified method provided in the regulations, the envelope of the model was classified with level “A” of efficiency. Although its classification obtained the highest level, improvement strategies were proposed aiming at a reduction of the total thermal load of refrigeration to enhance its efficiency. The strategies addressed interventions in the glazing of the openings, in the roof, in the external walls and the angle of vertical shading. By adopting this set of strategies, reductions around 18,36% can be achieved in relation to the thermal loads calculated for the basic model.

Key-words: Energy efficiency. Environmental Certification. INI-C.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Carta bioclimática elaborada por Olgyay.....	30
Figura 2 – Carta bioclimática para o Brasil.....	31
Figura 3 – Participação setorial no consumo de energia no Brasil, ano base 2020. .	36
Figura 4 – Consumo por uso final em edifícios públicos.	37
Figura 5 – Selo LEED.....	41
Figura 6 – Modelo da ENCE para edifícios comerciais, de serviços e públicos.	45
Figura 7 – Selo PROCEL Edificações.	46
Figura 8 – Equivalente numérico para cada nível de eficiência.....	47
Figura 9 – Equação geral de _____ e suas variáveis.....	47
Figura 10 – Diferença entre PAFT e PAZ.....	51
Figura 11 – Parcela de abertura contabilizada para o cálculo do PAF.....	54
Figura 12 – Escala para classificação do nível de eficiência da envoltória.	60
Figura 13 – Fluxograma de aplicação do método.	67
Figura 14 – Fluxograma das etapas de avaliação da envoltória para edificações condicionadas artificialmente.	68
Figura 15 – Processo de separação das zonas térmicas segundo a INI-C.....	70
Figura 16 – Interface do metamodelo web para estimativa da carga térmica total anual.	73
Figura 17 – Vista do Prédio V da Unifal-MG.....	76
Figura 18 – Vista aérea do entorno do Prédio V.	77
Figura 19 – Fachada frontal.	78
Figura 20 – Fachada posterior.	78
Figura 21 – Fachadas laterais.	79
Figura 22 – Planta baixa do pavimento inferior.	79
Figura 23 – Planta baixa do pavimento térreo.....	80
Figura 24 – Planta baixa do primeiro pavimento.	80
Figura 25 – Planta baixa do segundo pavimento.	80
Figura 26 – Divisão das zonas térmicas do metamodelo base.	81
Figura 27 – Imagem do metamodelo base.....	82

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 –Valores obtidos da carga térmica anual para a condição de referência e para a condição real com respectivo percentual de redução, por local (kWh/ano). ..87	
Gráfico 2 – Comparação dos efeitos das estratégias de melhoria da eficiência energética relacionadas ao envidraçamento nas cargas térmicas do modelo.90	
Gráfico 3 – Comparação dos efeitos das estratégias de melhoria da eficiência energética relacionadas à cobertura nas cargas térmicas do modelo.....93	
Gráfico 4 - Comparação dos efeitos das estratégias de melhoria da eficiência energética relacionadas às paredes externas nas cargas térmicas do modelo.96	
Gráfico 5 - Comparação dos efeitos das estratégias de melhoria da eficiência energética relacionadas ao ângulo vertical de sombreamento nas cargas térmicas do modelo.98	
Gráfico 6 – Comparação dos valores alcançados pela aplicação das estratégias de melhoria da eficiência energética à condição real.....99	
Gráfico 7 – Comparação dos efeitos dos conjuntos de estratégias nas cargas térmicas da modelo.102	

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Propriedades térmicas relacionadas aos elementos da envoltória.....	32
Quadro 2 – Categorias da Certificação LEED.....	42
Quadro 3 – Categorias da certificação AQUA-HQE	44
Quadro 4 – Limites dos intervalos dos níveis de eficiência	57
Quadro 5 – Limites dos intervalos das classificações de eficiência da envoltória	62
Quadro 7 – Limites dos intervalos dos níveis de eficiência e classificação final do sistema de envoltória pela INI-C.	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Pré-requisitos específicos da envoltória.	48
Tabela 2 – Transmitância térmica máxima de coberturas para o nível “A”.	49
Tabela 3 – Transmitância térmica máxima de paredes exteriores para o nível “A”.....	49
Tabela 4 – Limites máximos de absorvância de superfícies.	50
Tabela 5 – Limites de fator solar e de percentual de abertura zenital de coberturas.	50
Tabela 6 – Parâmetros do ICmaxD	56
Tabela 7 – Parâmetros do ICmin.....	56
Tabela 8 – Limites dos parâmetros de avaliação da envoltória atendidos pelo método simplificado.....	61
Tabela 9 – Valores de referência para edificações educacionais.....	69
Tabela 10 – Parâmetros das estratégias de melhoria da eficiência energética.	75
Tabela 11 – Parâmetros de entrada adotados para o metamodelo em sua condição real.	83
Tabela 12 – Parâmetros das estratégias de melhoria da eficiência energética.	84
Tabela 13 – Valores obtidos para a condição de referência.....	85
Tabela 14 – Variáveis para a determinação da escala de eficiência energética da envoltória.....	85
Tabela 15 – Valores obtidos para a condição real.	86
Tabela 16 – Efeito das estratégias de eficiência energética relacionadas ao envidraçamento nas cargas térmicas da envoltória.	89
Tabela 17 – Efeito das estratégias de eficiência energética relacionadas a cobertura nas cargas térmicas da envoltória.....	92
Tabela 18 – Efeito das estratégias de eficiência energética relacionadas às paredes externas nas cargas térmicas da envoltória.	95
Tabela 19 – Efeito das estratégias de eficiência energética relacionadas a cobertura nas cargas térmicas da envoltória.....	97
Tabela 20 – Efeito do conjunto de estratégias de eficiência energética nas cargas térmicas da envoltória.	100
Tabela 21 – Parâmetros usados no metamodelo – Pavimento térreo.....	113
Tabela 22 – Parâmetros usados no metamodelo – Pavimentos intermediários.....	114
Tabela 23 – Parâmetros usados no metamodelo – Pavimento cobertura.....	115

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AQUA-HQE	Alta Qualidade Ambiental - <i>Haute Qualité Environnementale</i>
BEN	Balanco Energético Nacional
ENCE	Etiqueta Nacional de Conservação de Energia
GC	Grupo Climático
IN	Instrução Normativa
INI-C	Instrução Normativa INMETRO – Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
LEED	<i>Leadership in Energy and Environmental Design</i>
MEC	Ministério da Educação
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MME	Ministério de Minas e Energia
MPOG	Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão
NBR	Normas Brasileiras de Regulação
ONU	Organização das Nações Unidas
PBE	Programa Brasileiro de Etiquetagem
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
RTQ-C	Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos
SLTI	Secretaria de Logística e Tecnologia da Informação
TEP	Tonelada Equivalente de Petróleo
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UNICAMP	Universidade Estadual de Campinas
Unifal-MG	Universidade Federal de Alfenas
USGBC	<i>United State Green Building Concil</i>
ZB	Zoneamento Bioclimático

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Tema	16
1.2 Delimitação do Tema.....	18
1.3 Problematização	20
1.4 Objetivos	21
1.4.1 Objetivo Geral	21
1.4.2 Objetivos Específicos	21
1.5 Justificativa.....	21
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
2.1 Os Impactos Ambientais Causados Pelas Construções	23
2.2 Sustentabilidade e as Construções Sustentáveis	24
2.3 O Conforto Térmico, a Envoltória e os gastos Energéticos	27
2.4 A Utilização de Projetos Padronizados em Obras Públicas	33
2.5 Eficiência Energética	35
2.6 Programas Voltados para a Eficiência Energética no Brasil.....	38
2.7 Sistemas de Certificação Ambiental.....	40
2.7.1 LEED	41
2.7.2 AQUA-HQE	43
2.7.3 PBE-Edifica	44
2.8 RTQ-C.....	46
2.8.1 Procedimentos de cálculo pelo método prescritivo	51
2.8.2 Procedimentos para determinação da eficiência da envoltória pelo método prescritivo do RTQ-C.....	54
2.8.3 Estudos que envolveram a aplicação do método prescritivo do RTQ-C	57
2.9 INI-C.....	59
2.9.1 Procedimentos para a determinação da classificação de eficiência energética da envoltória pelo método simplificado da INI-C	62
2.9.2 Estudos que envolveram a aplicação do método simplificado da INI-C	63
3 MÉTODO	67
3.1 Delineamento da Pesquisa	67
3.2 Aplicação do Método Simplificado da INI-C para classificação da eficiência energética da envoltória	68

3.3 Estratégia para a Melhoria da Eficiência Energética.....	74
4 ESTUDO DE CASO	76
4.1 Elaboração do Metamodelo Base – Condição Real	81
4.2 Resultados	85
4.2.1 Classificação da envoltória.....	85
4.2.2 Resultado das estratégias de eficiência energética para a envoltória relacionadas ao envidraçamento das aberturas.....	88
4.2.3 Resultado das estratégias de eficiência energética para a envoltória relacionadas à cobertura.....	91
4.2.4 Resultado das estratégias de eficiência energética para a envoltória relacionadas às paredes externas.....	93
4.2.5 Resultado das estratégias de eficiência energética para a envoltória relacionadas ao ângulo de sombreamento	96
4.2.6 Conjunto de estratégias para a melhoria da eficiência energética	99
4.2.7 Consolidação das análises.....	102
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	104
REFERÊNCIAS.....	106
APÊNDICE A – TABELAS	113

1 INTRODUÇÃO

No início dos anos 2.000 o Brasil viveu uma crise energética que serviu de alerta, não apenas para a sociedade, mas também para o governo, para as questões relacionadas à economia de energia elétrica e eficiência energética nas edificações. Para Amorim et al. (2016, p. 492) a eficiência energética “deixou de ser apenas uma medida operacional de máquinas e passou a ser um objetivo comum de todos: empresas, instituições e governos”.

A partir desse momento algumas medidas governamentais foram tomadas a fim de se reduzir o consumo de energia nas edificações e melhorar o seu desempenho e a sua eficiência energética, dentre as quais destacam-se a Lei nº 10.295 de 2001 que dispõem sobre a Política Nacional de Conservação e uso Racional de Energia (BRASIL, 2001^a), o Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos – RTQ - C (INMETRO, 2009), a NBR 15.220 (ABNT, 2005), a NBR 15.575 (ABNT, 2008), a criação do Selo PROCEL Edifica para edifícios comerciais, de serviços e públicos em 2014.

Paralelamente à criação do Selo PROCEL, foi promulgada a Instrução Normativa nº 02/2014 do Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão – MPOG que tornou obrigatória a obtenção da classificação “A” (máxima) da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia – ENCE para os projetos e para suas respectivas obras, novas ou àquelas que venham a receber *retrofit*¹ em edifícios da Administração Pública Federal direta, autárquica e fundacional (BRASIL, 2014). Esta etiqueta faz parte do Programa Brasileiro de Etiquetagem de Edifícios (PBE-Edifica) destinado a promover a redução do consumo de energia elétrica. Para a classificação da Etiqueta são avaliados três elementos da edificação: sua envoltória, seu sistema de iluminação e seu sistema de condicionamento de ar (ELETROBRÁS/PROCEL, 2019).

Recentemente, em 2021, foi revisado método de avaliação para a classificação da eficiência energética para a obtenção da ENCE por meio da

¹ Segundo o Manual para Etiquetagem de Edificações Públicas (ELETROBRÁS/PROCEL, 2014, p. 20) “*Retrofit* são intervenções nas edificações que alterem os sistemas de iluminação, condicionamento de ar e ou a envoltória, por meio da remodelação ou atualização do edifício ou dos sistemas, através da incorporação de novas tecnologias e conceitos”.

publicação da Portaria nº 42, que aprova a Instrução Normativa Inmetro para a classificação de eficiência energética de edifícios comerciais, de serviços e públicas - INI-C (INMETRO, 2021). A nova normativa substituirá, a partir de 2023, integralmente, o antigo RTQ-C, como método para a classificação da eficiência energética.

Apesar desses esforços evidencia-se, nos últimos anos, um ligeiro aumento no consumo de energia elétrica nos edifícios do país, da ordem de 22,8% segundo dados do Balanço Energético Nacional – BEM de 2021, ano base 2020. A exceção a este crescimento foi o ano de 2020 momento em que houve uma redução de 1,0% no consumo de energia elétrica em comparação com o ano de 2019, em função da pandemia de Covid-19 (BEM, 2021).

Borgstein (2017) atribui uma parcela dessa expansão a fatores como o aumento populacional, o incremento do estoque de edificações e o crescimento da demanda por serviços e equipamentos consumidores de energia elétrica.

Vale destacar que uma parcela deste estoque de edifícios pertence ou é alugada pelo poder público o que traz ao centro da discussão a atuação do governo na promoção e na melhoria da eficiência e do desempenho energéticos dos seus imóveis com vistas à redução do consumo de energia elétrica. Vale destacar, também, que do total consumido de energia pelos edifícios públicos, 48% estão relacionados aos equipamentos de ar-condicionado, 23% com os sistemas de iluminação e 15% com equipamentos de escritório (LAMBERTS *et al*, 2014).

Neste sentido, Rogers (2012) defende que o poder público tem a responsabilidade de realizar e, também, fiscalizar os projetos de edificações para que elas, públicas ou privadas, tenham qualidade e estimulem inovações. Paulse (2016) complementa que as edificações públicas, além de desempenharem um papel no sentido de aprimoramento destes conceitos de redução do consumo de energia elétrica, também servem como instrumento de divulgação destas ideias, uma vez que estas obras atingem um público amplo e diversificado.

1.1 Tema

Os edifícios, em geral, têm como principais propósitos abrigar e garantir condições de conforto e qualidade de vida às pessoas. Estudos mostram que as pessoas passam, em média, 80% do tempo de suas vidas dentro dos edifícios

(EDWARDS, 2005; PINHEIRO, 2006), pois neles vivem, trabalham ou estudam revelando sua importância na vida cotidiana moderna.

No entanto, a construção destes edifícios provoca uma considerável degradação no meio ambiente sendo a sua indústria considerada uma das menos sustentáveis do planeta (SILVA *et al.*, 2003). Estes danos ambientais permeiam toda a cadeia produtiva do setor da construção civil: da manufatura dos materiais e dos equipamentos, passando pelo processo de construção propriamente dito, pelo seu uso, até o desmonte do edifício. Acrescente-se a isso a grande quantidade de recursos naturais é empregada, bem como a poluição gerada e dos resíduos produzidos (FOSSATI, 2008).

Alguns autores defendem que uma parcela importante dessa degradação ambiental e do esgotamento dos recursos naturais é consequência direta dos atuais processos adotados na construção e na operação dos edifícios (GONÇALVES e DUARTE, 2006), portanto, diretamente vinculada a definições arquitetônicas e ao uso e ocupação destes espaços. Princípios básicos relacionados à chamada arquitetura vernácula foram sendo substituídos, por motivações estéticas e econômicas, que resultaram na redução do conforto propiciado pelo edifício ao seu usuário, contribuindo para o uso, algumas vezes desproporcional, de tecnologias e sistemas artificiais de climatização e iluminação que trazem impacto direto no consumo de energia elétrica (CARLO, 2008).

Ainda segundo Carlo (2008), parte do uso desses sistemas de climatização, além de estarem ligados às cargas internas de ocupação, ao uso de equipamentos produtores de calor e à iluminação, relaciona-se principalmente com as características da envoltória do edifício, pois é por meio dos elementos que a compõem que ocorrem as trocas térmicas entre os meios interno e externo.

De acordo com Lamberts *et al.* (2014), para que um edifício alcance o desempenho térmico desejado, é importante que as suas características arquitetônicas, em especial aquelas relacionadas à envoltória (paredes, coberturas e aberturas), sejam definidas levando-se em consideração critérios de conforto ambiental e também de eficiência energética. Fatores relacionados à orientação solar, os materiais empregados, a área de esquadria e as cores adotadas influenciam no desempenho térmico do edifício (LAMBERTS e TRIANA, 2007). Quando o desempenho desejado não é alcançado, a ineficiência térmica da envoltória deverá ser compensada com a utilização dos equipamentos de

climatização que aumentarem os custos iniciais da obra, e, também, aumentam também os custos de operação e de manutenção do edifício. Para Mascaró (2010), uma porcentagem destes custos poderia ser evitada se a envoltória da edificação fosse bem resolvida.

Nesse sentido, as certificações ambientais, além de tornarem o processo de construção e operação dos edifícios mais eficientes se apresentam como uma estratégia efetiva de verificação e comprovação da redução do uso da energia elétrica, uma vez que estabelecem requisitos mínimos de desempenho e critérios condicionantes (PAUSE, 2016).

No tocante às edificações públicas sua etiquetagem, conforme disposto na IN 02/2014, pode ser vista como um importante passo para incentivar a construção de prédios energeticamente mais eficientes, bem como tornar-se um caminho inequívoco à promoção da sustentabilidade (BRASIL, 2014).

Assim, a avaliação da eficiência energética da envoltória de uma edificação pública concorre, não apenas para garantir melhores níveis de conforto aos usuários, como também para a melhoria da eficiência energética da edificação e, conseqüentemente, para a redução de custos com energia elétrica.

1.2 Delimitação do Tema

Para o estudo da eficiência energética das edificações educacionais públicas, os prédios pertencentes às Universidades Federais apresentam-se como um interessante recorte, pois, nos últimos anos, a Rede Federal de Ensino Superior passou por um forte processo de crescimento. Por meio do Programa de Apoio a Planos de Reestruturação e Expansão das Universidades Federais (REUNI), um programa governamental iniciado em 2007, foram criados mais de uma centena de novos *campi* universitários por todo o país, muitos destes *campi* foram construídos em cidades do interior do Brasil o que expandiu a oferta de educação superior pública nestas regiões. Segundo dados do programa foram pactuadas 2.267, das quais 90% foram finalizadas até 2014, totalizando mais de 3 milhões de metros quadrados edificadas, (MEC, 2012; MEC, 2014).

A Universidade Federal de Alfenas – Unifal-MG, sediada na cidade de Alfenas no Sul de Minas Gerais, foi umas das instituições que se beneficiaram deste programa de expansão, construindo três novos *campi*, em três municípios do sul do

estado: um *campus* em Poços de Caldas, um *campus* em Varginha e uma segunda unidade em Alfenas. Antes de aderir ao programa, a Unifal-MG contava com pouco mais de 19 mil metros quadrados de área construída; em 2019 atingiu mais de 113 mil metros quadrados edificadas (UNIFAL-MG 2015; UNIFAL-MG, 2019).

Importante ressaltar que os projetos arquitetônicos dos prédios da instituição são desenvolvidos pelo corpo técnico da Universidade e em sua grande maioria contam com características e elementos construtivos similares, inclusive elementos da envoltória, variando em alguns casos a forma dos edifícios em função da demanda de utilização. A adoção destas características e elementos similares teve como propósito a redução dos tempos de elaboração de projetos e da realização dos processos licitatórios, bem como facilitar o acompanhamento e a fiscalização das obras. Como evidencia, segundo Kowaltowski (2011, p. 101), a padronização de projetos de arquitetura “é uma prática comum em empreendimentos públicos” como escolas e universidades.

No entanto, embora os *campi* da Unifal-MG estejam localizados em cidades próximas e na mesma região geográfica, cada unidade se insere em uma Zona Bioclimática brasileira (ZB) diferente: Alfenas está na ZB 4, Poços de Caldas na ZB 1 e Varginha na ZB 2. Por esse motivo, cada campus possui características ambientais próprias, o que pressupõem certas adequações em suas características e elementos construtivos da envoltória para que o projeto de arquitetura se adapte às condições locais e atenda às necessidades de conforto dos usuários e, ainda, garanta um bom desempenho energético. Mas, como lembra Almeida (2018), em muitas situações e por diversos motivos como impossibilidade técnica, econômica, temporal ou até mesmo por vontade política, essas adequações não são implementadas.

Outra questão importante refere-se à etiquetagem das edificações públicas atualmente. Apesar de ser compulsória a obtenção da ENCE para os prédios públicos construídos ou reformados a partir de 2014, tal exigência não vem sendo integralmente atendida. No período de 2014 a 2018, segundo dados do PBE-Edifica (INMETRO 2019), 39 etiquetas de projeto foram emitidas para instituições públicas, das quais 10 pertencem a edifícios de Universidades Federais. Nesse mesmo período, o total de etiquetas emitidas para a categoria edificações comerciais, de serviço e pública foi de 129. No âmbito da Unifal-MG, nenhuma de suas edificações obteve a etiqueta ou sequer foram submetidas ao processo de classificação da

eficiência energética de sua envoltória (INMETRO 2019), não sendo possível saber se as características e os elementos construtivos adotados pela instituição estão adequados aos contextos climáticos cujos prédios estão inseridos. A análise e classificação do nível de eficiência energética da envoltória dos prédios da Universidade é importante para que possam ser identificadas e corrigidas eventuais situações de ineficiência térmica.

O cenário descrito tem como determinantes 1) a construção de edifícios cuja envoltória possui características e elementos construtivos similares; 2) a necessidade crescente de redução do consumo de energia elétrica e; 3) a obrigatoriedade de obtenção da ENCE – cujo desafio de harmonização motivou o desenvolvimento desta pesquisa.

Assim, o presente trabalho se limita a analisar o potencial de ampliação da eficiência energética da envoltória comumente adotada nos prédios da Unifal-MG por meio das diretrizes constantes do regulamento da certificação brasileira PBE-Edifica e, com isso, identificar as situações que eventualmente não atendam à IN 02/2014, não tendo sido abordadas questões relacionadas ao custo benefício e ao tempo de retorno para a implantação de estratégias com vistas ao atendimento da IN. Este trabalho pretende, ao final, contribuir para a melhoria da condição de conforto para os alunos e funcionários da Unifal-MG, e promover a economia de recursos públicos por meio da redução do consumo de energia elétrica.

1.3 Problematização

Frente às constantes dificuldades orçamentárias enfrentadas pelas Universidades Federais brasileiras, é importante projetar e construir, ou mesmo atualizar, os seus edifícios buscando maior eficiência energética e melhores níveis de conforto interno. O uso racional da energia pode ser conquistado pela adoção de soluções arquitetônicas e materiais construtivos mais adequadas ao contexto climático de inserção do edifício. Dados do programa PBE-Edifica mostram que existe um potencial de economia de energia para os edifícios etiquetados de até 30% para aqueles que passam por processo de *retrofit*, e de até 50% para prédios novos.

Pelo exposto a questão-problema pela qual esta pesquisa se estrutura é: Qual a variação do percentual da eficiência energética de um modelo arquitetônico

elaborado com base nos elementos construtivos comumente adotados pela Unifal-MG em seus prédios, a partir da implementação de estratégias para a melhoria do desempenho energético da envoltória?

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta pesquisa é analisar o potencial de ampliação da eficiência energética da envoltória de um edifício público universitário com vistas à obtenção da classificação máxima da ENCE.

1.4.2 Objetivos Específicos

- a) determinar o nível de eficiência energética da envoltória e classificá-la segundo a ENCE;
- b) propor medidas para a melhoria do desempenho térmico da envoltória;
- c) comparar o desempenho térmico da envoltória do metamodelo em sua condição de referência, da sua condição real e da sua condição melhorada.

1.5 Justificativa

No tocante ao consumo geral de energia elétrica no Brasil, dados do Balanço Energético Nacional – BEN de 2021 mostram que os edifícios em geral foram responsáveis pelo consumo de 50,8% de toda a energia elétrica produzida no país naquele ano, sendo que o setor público foi o responsável pelo consumo de 8,2% da energia (EPE, 2021). Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, o valor pago pelas Universidades Federais em despesas com energia elétrica no ano de 2015 foi de cerca de 430 milhões de Reais, despontando com um importante grupo consumidor de recursos representando cerca de 9% do total de gastos apurados para a pasta da Educação (ANEEL, 2016). Especificamente no âmbito da Unifal-MG, o valor total pago às concessionárias de energia no ano de 2018 foi de R\$ 1.564.722,20 (UNIFAL-MG, 2019).

Soma-se a isto a atuação profissional do proponente desta pesquisa que pertence ao corpo técnico da Instituição e exerce a atividade de arquiteto com

participação ativa e direta no planejamento e na execução das obras da Universidade. O desenvolvimento deste trabalho, intimamente relacionado ao seu dia a dia de serviço é, também, uma oportunidade de se retribuir o apoio recebido da instituição e compartilhar com a comunidade da Unifal-MG parte dos conhecimentos adquiridos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Os Impactos Ambientais Causados Pelas Construções

O setor da construção civil é importante pois satisfaz aos anseios de qualidade de vida e conforto da sociedade em geral além de estimularem o crescimento e a produção de riquezas para cidades, regiões e nações. É responsável pela implantação da infraestrutura básica como geração de energia, saneamento básico, transportes e espaços públicos, além da construção de edifícios públicos e privados dos mais diversos fins como moradia, trabalho, educação, saúde e lazer. Sua cadeia produtiva é responsável, ainda, por uma parcela importante do consumo dos recursos naturais disponíveis, incluindo energia e água, além da emissão de gases do efeito estufa (AGOPYAN et al., 2011).

Os impactos negativos decorrentes destas atividades humanas têm acarretado, além de uma degradação ambiental, mudanças climáticas significativas que, por sua vez, acabam alterando o modo de vida da população. Emissões indiscriminadas de dióxido de carbono – CO₂ e de outros gases de efeito estufa na atmosfera nas últimas décadas estão diretamente relacionadas com o aumento médio das temperaturas globais atuais que, inequivocamente, são os mais quentes dos últimos 200 anos (ROAF et al., 2009).

Na visão de Smith (2017), em nível global, a melhor maneira de se lidar com o problema das emissões de CO₂ é atuando diretamente sobre as construções pois os edifícios respondem por mais de 50% das emissões totais deste gás. Estima-se que apenas o uso dos edifícios seja responsável por 25% das emissões totais de CO₂.

Contribuindo com este cenário, nos últimos anos a matriz energética brasileira passou a depender mais da eletricidade produzida pelas usinas termoelétricas o que fez com que as emissões de CO₂ triplicassem, contribuindo para que no ano de 2015 o setor energético nacional fosse considerado o maior emissor deste gás no país. De modo geral, as emissões de dióxido de carbono pelos edifícios se dão de duas maneiras: uma direta, quando há consumo de fontes de energia primária, como a queima de combustíveis fósseis por exemplo, e outra indireta, mediante o consumo de fontes secundárias, como é o caso da energia elétrica (BORGSTEIN, 2017).

Lamberts et al. (2014) afirmam que o processo de verificação da eficiência energética de um edifício deveria ser realizado ainda na fase de projeto pois nesta etapa é possível testar as soluções arquitetônicas, buscando-se as mais adequadas, pois estas definições arquitetônicas influenciam diretamente o desempenho térmico do edifício. Na visão dos autores, as construções deveriam ser concebidas de maneira a se utilizar racionalmente a energia sem, contudo, comprometer o nível de conforto e da qualidade de vida dos seus usuários.

Para Fossati e Lamberts (2008), edifícios mais eficientes poderiam minimizar os impactos ambientais e as atuais alterações do clima, evidenciando, com isso, a importância do conceito de sustentabilidade e de desenvolvimento sustentável. Isso porque, para eles, a forma como os edifícios são projetados, construídos e operados, impactam diretamente no consumo de recursos naturais, no conforto e na saúde dos usuários.

2.2 Sustentabilidade e as Construções Sustentáveis

O assunto sustentabilidade tem tido destaque já a algum tempo e está relacionado à busca da conciliação entre desenvolvimento econômico, preservação ambiental e aspectos sociais inerentes a qualquer sociedade (CORTESE, 2017).

A preocupação com a preservação ambiental surge da percepção de que a exploração dos recursos naturais passa a ser maior do que a capacidade natural de regeneração do planeta. Embora esta preocupação não seja nova, foi nas décadas de 1970 e de 1980 que esta questão passou a ser mais fortemente debatida, principalmente após a publicação de um relatório pela Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento da ONU, chamado Nosso Futuro Comum. Este relatório definiu o conceito de desenvolvimento sustentável como sendo “o desenvolvimento que satisfaz as necessidades presentes, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de suprir suas próprias necessidades” (BRUNDTLAND, 1987, p. 54).

O conceito de desenvolvimento sustentável torna-se importante para a indústria da construção civil uma vez que ela é responsável por consumir uma grande quantidade de recursos naturais e energéticos, além de produzir significativo montante de resíduos, podendo ser vista como uma importante fonte transformadora do meio ambiente em função do impacto ambiental e social provocado pela

fabricação dos materiais, da construção, do uso e da operação dos edifícios (CORTESE, 2017). É atrelado a estes conceitos de preservação ambiental, de desenvolvimento sustentável, de menor impacto ambiental e de eficiência das edificações que estão as origens do movimento de construções sustentáveis, ou também chamado de arquitetura sustentável.

Para Keller e Burke (2010), este movimento não surgiu de um único evento, mas sim do efeito convergente de diversos marcos históricos, a maioria deles, ambientais ou econômicos. A publicação do livro “Primavera Silenciosa”, de Rachel Carson, em 1962 teria chamado a atenção da sociedade para a proliferação em larga escala do uso de pesticidas, inseticidas e herbicidas bem como os seus impactos sobre a cadeia alimentar, sobre o ciclo da água e por último, sobre os próprios seres humanos, o que provocou discussões que levaram à criação de agências fiscalizadoras do meio ambiente. Outra prática igualmente relevante para o surgimento da arquitetura sustentável foi o movimento ecológico, com o seu ativismo ambiental, que deu origem a diferentes movimentos sociais, culturais e ambientais e acabou por incorporar esse ativismo no âmbito das políticas públicas, por meio da criação de diretrizes e tratados ambientais. Mais um marco que teria contribuído também para o desenvolvimento do conceito de arquitetura sustentável foi a criação de partidos políticos cuja plataforma se baseava nos pilares do conhecimento ecológico, da justiça social, da democracia popular e da não violência. O movimento ambientalista se moveu em direção a uma unidade mais global com a criação do Clube de Roma em 1968, outro marco focado em questões mundiais por meio do estudo de problemas políticos, sociais, culturais, ambientais e tecnológicos desde uma perspectiva global, multidisciplinar e de longo prazo.

Uma das contribuições mais relevantes desse Clube foi a publicação do livro “Os Limites do Crescimento” em 1972 que previu, em um modelo matemático, a capacidade de suporte ecológico do planeta Terra face a “um desejo de acumulação infinita” até o ano de 2100. O modelo demonstrou que até o ano de 2072 os recursos naturais estariam exauridos e a população diminuiria como resultado da incapacidade de atendimento de suas próprias necessidades. Conferências, cúpulas e convenções configuram, do mesmo modo, como importantes marcos para o surgimento do conceito de arquitetura sustentável dentre os quais se destacam a Conferência de Estocolmo, em 1972, A Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, de 1984, o Protocolo de Montreal, de 1987, a Cúpula da Terra

realizada no Rio de Janeiro, em 1992, o Protocolo de Quioto, de 1997 e a Cúpula da Terra realizada em Johannesburgo, em 2002 (KELLER e BURKE, 2010).

A crise energética da década de 70, originada pelo embargo do petróleo, induziu ao desenvolvimento de soluções visando a economia de energia das edificações dos países desenvolvidos. Nestes países haviam sido construídos grandes edifícios com fachada de vidro que impossibilitavam a ventilação natural do edifício e demandavam permanente uso do condicionamento ambiental artificial para que pudessem operar. A reação de projetistas a este modelo de construção foi outro pontapé para o desenvolvimento do conceito de arquitetura bioclimática (AGOPYAN et al., 2011). O benefício alcançado por esta crise foi o desenvolvimento de alternativas para a obtenção e preservação da energia. O interesse pela eficiência energética levou à criação de agências federais com a missão de estabelecer padrões de sustentabilidade para os vários setores da sociedade.

Na visão de Pinheiro (2006), as construções sustentáveis seriam um novo modelo de construção focado não apenas na qualidade, no tempo e nos custos, mas também preocupado com o meio ambiente, com o consumo de recursos, com as emissões de poluentes, com a saúde dos trabalhadores e dos usuários. O conceito de desenvolvimento sustentável está intrínseco na dinâmica da construção sustentável, pois abrange os aspectos econômicos, ambientais e sociais que se satisfazem por meio da persecução da eficiência no uso de materiais e de energia elétrica.

Neste sentido, não se pode falar em desenvolvimento sustentável e preservação do meio ambiente sem se falar em construção sustentável, edifício sustentável, edifícios verdes, arquitetura sustentável ou arquitetura bioclimática. Embora o conceito equivalente a cada uma destas denominações possa diferir, em sua maioria eles interagem se complementando, ou mesmo se sobrepõem definindo um tipo de construção mais comprometida com o meio ambiente (GURGEL, 2012).

Para Silva (2007, p. 6), “o surgimento e difusão dos conceitos de projeto ecológico (*green building*) foi uma das mais importantes respostas do meio técnico à generalização da conscientização ambiental da década de 1990”.

Para os autores Fossati e Lamberts (2008) construções sustentáveis são aquelas projetadas para um uso racional de materiais, água e energia, procurando minimizar ao longo do seu ciclo de vida, os custos ambientais.

Para Veras (2013) as construções sustentáveis podem ser definidas como aquelas que melhoram a qualidade de vida de seus usuários e promovem o desenvolvimento econômico, social e cultural do local onde estão inseridas.

Os termos “verde”, “ecológico” e “sustentável” são comumente empregados como se fossem sinônimos, mas, para os autores Kwok e Grindzik (2013), ser sustentável é mais abrangente do que ser ecológico ou verde pois aborda os impactos de longo prazo do ambiente construído para as futuras gerações além de exigir o estudo das relações entre ecologia, economia e bem-estar social. Nesta visão as edificações verdes ou ecológicas seriam aquelas que atenderiam aos requisitos mínimos das certificações e as edificações sustentáveis, por outro lado, seriam aquelas que vão além dos requisitos ecológicos, procurando alcançar um alto desempenho.

Mais focada na relação entre as construções e o seu entorno, a arquitetura bioclimática busca garantir melhores níveis de conforto no interior dos edifícios por meio do estudo das variáveis climáticas, das condicionantes locais e nas características humanas. Na visão de Roméro (2015), a arquitetura bioclimática se apoia na arquitetura vernácula para dar respostas climáticas mais adequadas aos usuários considerando as condicionantes locais. O projeto de arquitetura bioclimática deve tirar partido do clima, da vegetação, da topografia devendo estes elementos serem considerados desde o início da concepção projetual. Corbella e Corner (2011) afirmam que o quanto antes o arquiteto pensar nas estratégias bioclimática, maiores serão suas opções disponíveis e melhores serão as respostas quanto o desempenho da edificação e seus níveis de conforto.

Keller e Burke (2010) afirmam que as técnicas de projeto para edificações bioclimáticas requerem conhecimento do clima, das condições do terreno, do movimento do ar, do formato do edifício e dos materiais utilizados sempre com o objetivo de aproveitar ou rechaçar as energias naturais que incidem no edifício. Na visão de Lamberts *et al* (2014) os conceitos de arquitetura bioclimática deveriam fazer parte de qualquer projeto arquitetônico.

2.3 O Conforto Térmico, a Envoltória e os gastos Energéticos

Um das funções dos espaços edificados é atender ao bem-estar dos seus usuários de modo que possam desenvolver suas atividades com conforto. Assim

uma arquitetura condizente com o contexto climático, além de proporcionar conforto, traz também benefícios à saúde, melhoria do desempenho das atividades e diminuição do consumo de energia. Ambientes inadequados do ponto de vista do conforto térmico provocam em seus usuários sonolência, apatia e desinteresse pelo trabalho (LABAKI e BUENO-BARTHOLOMEI, 2011).

O corpo humano funciona como uma máquina térmica que produz calor (energia) por metabolismo. Um sistema de regulação térmica mantém a temperatura do corpo relativamente estável, em torno de 37°C (KOWALTOWSKI, 2011). O corpo ganha ou perde parte dessa energia para o ambiente. Este processo é denominado termorregulação. Este esforço desempenhado pelo corpo tem impacto no desempenho da pessoa. Se o organismo ganha mais calor do que perde, a temperatura da pele sobe e ele se afasta do conforto. Se perde mais calor do que ganha, a temperatura corporal cai e a pessoa sente frio. Quando os ganhos são iguais às perdas, o corpo encontra o equilíbrio térmico, porém quando isso não acontece, o corpo se aquece ou resfria-se afastando-se do equilíbrio térmico. Neste caso o sistema termorregulador entra em ação até que o balanço energético se restabeleça. Quanto menos vezes o organismo necessitar pôr em ação este sistema, mais o ambiente se aproxima dos limites de conforto (CORBELLA e CORNER, 2011). O equilíbrio termofisiológico se relaciona com as características físicas dos materiais da envoltória, com as variáveis ambientais e com as variáveis pessoais. Assim a sensação de bem-estar, conforto térmico, irá variar de indivíduo para indivíduo. A termorregulação, mesmo sendo um mecanismo natural de controle, é um esforço desempenhado pelo organismo e, por isso, impacta no desempenho do indivíduo (LAMBERTS *et al*, 2005). O ser humano desenvolve melhor suas atividades quando a temperatura do ambiente está entre 21° e 25° Celsius. Estudos relacionados a performance em ambientes de trabalho mostram que há uma diminuição de 2% do desempenho do indivíduo para cada grau Célcius aumentado num intervalo entre 25° e 32°C (FISK e SEPPANEN, 2006). Em ambientes escolares confortáveis, os alunos melhoram sua concentração, atenção e o aprendizado.

A melhoria das condições de conforto térmico do ambiente construído deveria ser uma preocupação constante; contudo, é comum observar ambientes inadequados. Estes ambientes “representam um custo social” pelo desconforto térmico que provocam pois comprometem diretamente a saúde e a disposição de

seus usuários para realizarem suas atividades, além de onerar a operação daquele local com equipamentos mecânicos de condicionamento térmico (KOWALTOWSKI, 2011, p. 139).

Segundo Roaf et al. (2014), as edificações podem ser consideradas como nossa terceira pele. A primeira seria a própria pele do corpo humano e a segunda seriam as vestimentas que constantemente são trocadas. Ainda segundo os autores, em climas mais amenos o homem consegue sobreviver apenas com a pele do corpo, em outros, mais extremos, apenas lançando-se mão destas três camadas é possível sobreviver. Quanto mais extremo for o clima, maior a dependência da edificação para proteção. Em tese, quanto mais defesas térmicas a edificação possuir, menor será o número de sistemas artificiais ativos de climatização necessários e por consequência, menores serão os gastos com energia durante o ciclo de vida do edifício.

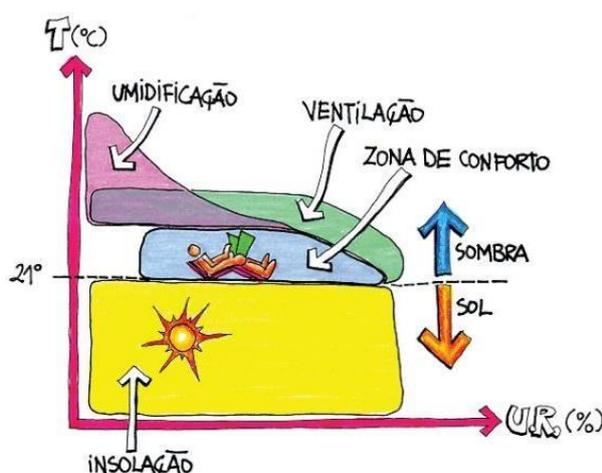
Corbella e Corner (2011) tratam esta terceira pele, ou seja, a envoltória do edifício, como sendo uma membrana permeável e controlada que separa os meios internos e externos do edifício. Segundo o Manual para Aplicação do RTQ-C (ELETROBRÁS, 2016, p. 39) a envoltória de uma edificação “trata-se de um conjunto de elementos construtivos que estão em contato com o meio exterior, ou seja, que compõem os fechamentos dos ambientes internos em relação ao ambiente externo”. Nesta visão, a envoltória pode ser considerada como o principal elemento arquitetônico para a determinação da eficiência energética de um edifício, responsável pela necessidade de resfriamento ou aquecimento, essenciais para a garantia dos níveis adequados de conforto.

Lamberts (2004) define conforto térmico como sendo o estado mental que expressa a satisfação do homem com o ambiente térmico que o circula. A NBR 15.220-1 (ABNT, 2005, p. 5) define conforto como “satisfação psicofisiológica de um indivíduo com as condições térmicas do ambiente”. Cunha (2006) define conforto térmico como sendo uma situação em que um indivíduo se encontra em um estado físico de bem-estar, representado pela ausência de sensações de calor ou frio. Pode-se dizer que o indivíduo está em situação de conforto quando percebe o ambiente sem incômodo, com uma sensação neutra em relação a ele.

Quanto ao conhecimento acerca do conforto térmico nas edificações, dois estudos se destacam: o de Olgyay e o de Givoni.

O primeiro foi desenvolvido por Olgay que elaborou um gráfico bioclimático (Figura 1) também chamado de “carta bioclimática” para o processo de construção com base na síntese de elementos da fisiologia humana, da climatologia e da física das construções com uma importante presença do regionalismo arquitetônico e do projeto em sintonia com o ambiente. Olgay foi o criador do termo “arquitetura bioclimática”, na década de 1950, e sob muitos aspectos, também pode ser considerado como um importante precursor do que hoje é denominado “arquitetura sustentável” (SZOKOLAY, 2019). Neste gráfico são relacionados dados sobre o clima externo e a zona de conforto do usuário.

Figura 1 – Carta bioclimática elaborada por Olgay.



Fonte: Lamberts, 2014.

O segundo estudo, desenvolvido por Givoni, que aprofundou o trabalho de Olgay focando nas trocas térmicas entre o ambiente e o homem e a relação entre a envoltória e os efeitos das variáveis climáticas e elaborou um gráfico com os elementos característicos dos climas e os limites de conforto humano. Posteriormente, Givoni adequou sua carta bioclimática para países em desenvolvimento cujos limites da zona de conforto são mais amplos.

A carta bioclimática de Givoni serviu como referência para a elaboração do Zoneamento Bioclimático Brasileiro (ZB), constante da NBR 15.220-3 (ABNT, 2005) que classifica o clima de cada região do país conforme suas particularidades (Figura 2). Vale ressaltar que, embora essa norma tenha sido desenvolvida para as habitações, ela tem sido usada como referência em outros tipos de edifícios.

Figura 2 – Carta bioclimática para o Brasil.



Fonte: Lamberts, 2014.

Pode-se dizer que três diferentes classes de variáveis influenciam no conforto térmico das edificações: as variáveis arquitetônicas, as climáticas e as humanas. As principais variáveis arquitetônicas a serem consideradas para a melhoria do conforto são a forma do edifício, sua orientação, o dimensionamento de suas aberturas, sua função, os materiais que compõem sua envoltória (opacos e translúcidos), os elementos de sombreamento, sua cor, sua massa térmica, sua carga térmica entre outros. As variáveis climáticas a serem consideradas são a temperatura, a umidade relativa, a radiação solar incidente, os ventos predominantes, a latitude e a longitude (FROTA e SCHIFFER, 2007). As variáveis humanas estão associadas às atividades desenvolvidas (taxa metabólica), ao vestuário e a aclimação (SZOKOLAY, 2019).

Por sua vez, aspectos como as características físicas dos materiais que compõem a envoltória também são importantes para a consolidação da melhor ambiência interna possível. As propriedades térmicas destes materiais relacionados ao conforto são: resistência térmica, transmitância térmica, capacidade térmica, atraso térmico, amortecimento térmico, fator de ganho de calor solar, absorvância, refletância, emissividade e a condutividade térmica (Quadro 1). Essas propriedades relacionam-se com as trocas térmicas que ocorrem entre a envoltória e os meios internos e externos do edifício. Os materiais utilizados na envoltória servem como reguladores do seu desempenho térmico, minimizando os gastos com a climatização

artificial e, por consequência, influenciam no conforto de seus usuários (CORBELLA e YANNAS, 2005; CUNHA, 2006).

Quadro 1 – Propriedades térmicas relacionadas aos elementos da envoltória.

Propriedade Térmica	Definição	Símbolo
Resistência térmica	Quociente da diferença de temperatura verificada entre as superfícies de um elemento construtivo pela densidade de fluxo de calor, em regime estacionário.	R
Resistência superficial interna	Resistência térmica da camada de ar adjacente à superfície interna de um componente que transfere calor por radiação e/ou convecção.	R _{si}
Resistência superficial externa	Resistência térmica da camada de ar adjacente à superfície externa de um componente que transfere calor por radiação e/ou convecção.	R _{se}
Resistência térmica total	Somatório do conjunto de resistências térmicas correspondentes às camadas de um elemento ou componente, incluindo as resistências superficiais interna e externa.	R _T
Transmitância Térmica	Inverso da resistência térmica total. Permite avaliar o desempenho de um sistema frente à transmissão de calor.	U
Capacidade Térmica	Quantidade de calor necessária para variar em uma unidade a temperatura de um sistema.	C
Atraso Térmico	Tempo transcorrido entre uma variação térmica em um meio e sua manifestação na superfície oposta de um componente construtivo submetido a um regime periódico de transmissão de calor. O atraso térmico depende da capacidade térmica do componente construtivo e da ordem em que as camadas estão dispostas.	φ
Absortância	Quociente da taxa de radiação solar absorvida por uma superfície pela taxa de radiação solar incidente sobre esta mesma superfície.	α
Refletância	Quociente da taxa de radiação solar refletida por uma superfície pela taxa de radiação solar incidente sobre esta mesma superfície.	ρ
Condutividade térmica	Propriedade física de um material homogêneo e isótopo, no qual se verifica um fluxo de calor constante, com densidade de $1\text{W}/\text{m}^2$, quando submetido a um gradiente de temperatura uniforme de 1 Kelvin por metro.	λ

Fonte: (ABNT,2005). Adaptado pelo autor.

Embora a teoria de que a compatibilização entre a arquitetura e o clima promova melhores condições de conforto aos usuários, autores como Cunha (2006) e Frota e Schiffer (2011) alertam que apenas a utilização dos recursos naturais pode não ser suficientes para se alcançar níveis satisfatórios de conforto em condições climáticas extremas. Mesmo assim, todos eles insistem na utilização destes elementos naturais com vistas à maximização do desempenho térmico natural, buscando reduzir o uso de equipamentos artificiais de aquecimento e de

resfriamento pois a quantidade de calor ou frio a ser retirada do ambiente seria menor.

Para uma melhor habitabilidade, Jourda (2013) recomenda a implantação de edificações de acordo com a orientação solar mais adequada para cada zona climática. As fachadas devem ser definidas e orientadas com base no estudo da insolação, de acordo com as estações do ano e a movimentação solar. Na maior parte do Brasil a fachada principal do edifício deve estar orientada ao norte, pois esta possui uma insolação mais equilibrada durante todo o ano. Em contrapartida, fachadas orientadas ao sul e ao oeste podem deixar os ambientes mais frios durante os meses de inverno e mais quentes durante os meses de verão respectivamente (OLGYAY, 1998).

Pires *et al* (2015) realizaram um estudo em que foram avaliadas estratégias passivas para ampliar o conforto térmico no período do verão, em projetos de habitação de interesse social nas cidades brasileiras de Porto Alegre, localizada na ZB3, e do Rio de Janeiro, localizada na ZB8. As estratégias utilizadas foram alteração da orientação solar dos edifícios, o sombreamento das janelas e a absorvência das fachadas. Por meio de simulações, os autores mostraram que alternativas de nenhum ou de pouco aumento de custo (absorvência e orientação solar), e facilmente implementadas durante o processo de projeto, garantiram, mesmo que sutil em alguns casos, a ampliação do desempenho térmico da edificação e a redução do gasto energético para manutenção do conforto dos usuários.

2.4 A Utilização de Projetos Padronizados em Obras Públicas

A utilização de projetos padronizados de arquitetura é uma prática comum e frequentemente adotada em obras públicas, especialmente naquelas de interesse social. O conceito por trás deste tipo de projeto é a repetição de um modelo racionalizado que visa otimização dos recursos. Tal prática foi influenciada pela industrialização como uma resposta à crescente demanda por eficiência e controle, com vistas a evitar desperdícios e garantir qualidade. As vantagens associadas ao uso de projetos padronizados costumam ser a economia de recursos pela produção em série, a redução dos custos de projeto, o tempo para a sua elaboração e a possibilidade de melhoria da qualidade final do produto em virtude da especialização

da mão de obra em função da repetição (BARROS, 2012). A utilização da padronização em obras públicas está relacionada, também, com a identificação destes edifícios a uma determinada administração ou momento político, podendo ser reconhecida como uma “assinatura ou um símbolo de uma gestão” (KOWALTOWSKI, 2011, p. 103).

Historicamente, este modelo de construção é utilizado no país em ambientes educacionais. Em geral, o tipo construtivo comumente adotado para a escola pública brasileira ostenta “uma arquitetura bastante padronizada, até muito simples, desprovida, quase sempre de encantamentos” (NETTO, 2013). Esta mesma visão se estende a alguns *campi* universitários, principalmente àqueles construídos recentemente. Pinto e Buffa (2009) comentam que “o período de *campus* ou edifícios mais atraentes, com magnitude e mesmo com qualidades espaciais acabou dando lugar a obras de uma racionalidade pobre, repetitiva e fria”. Esta situação reflete a urgência da demanda e a escassez de recursos e mostra que estes edifícios nem sempre apresentam desempenho satisfatório para abrigarem atividades de ensino.

Um exemplo da utilização desta prática é o *campus* da Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, cujo projeto padrão foi desenvolvido durante a gestão administrativa de 1982 a 1986 e que abriga ambientes como salas de aula, laboratórios, gabinetes de professores e bibliotecas (BARROS, 2002). Outro exemplo é o *campus* Vale da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, cuja proposta predial é convencional, em sua maioria modulados e sem muito significado (PINTO e BUFFA, 2009).

A necessidade de se implantar cursos e a decorrente construção de novos edifícios implica, ... a necessidade de uma acertada racionalização de custos. Embora essa exigência não implique uma normatização rígida de formas e espaços, isso infelizmente acaba acontecendo (PINTO E BUFFA, 2009, p. 102).

O uso do projeto padronizado pode trazer problemas de adaptabilidade das atividades em função de uma configuração espacial fixa, uma vez que nas instituições públicas, especialmente nas universidades, são frequentes as transformações de uso.

Uma dificuldade quanto à utilização de projetos padrão é não se levar em conta as necessidades e especificidades locais, o que resulta em ambientes desfavoráveis e que apresentam algum problema relacionado ao conforto ambiental.

A orientação solar e dos ventos dominantes é peculiar a cada situação e demanda ajustes para a proteção solar das aberturas, sem prejuízo à captação de ventos desejáveis. O formato do lote, a topografia e as condições geológicas nunca são iguais. São necessários ajustes dos acessos à edificação, afastamento de fontes de ruído, sistema estrutural, drenagem e conexões das infraestruturas. A adaptabilidade do projeto a situações variáveis de topografia e formato de lote nem sempre é simples ou eficiente, pois os ajustes, muitas vezes, indicam modificações substanciais, que tiram vantagem da redução do custo do projeto como protótipo (KOWALTOWSKI, 2011, p. 96).

Embora a prática deste tipo de projeto possa ser observada em instituições de ensino pelo país, é importante destacar que cada lugar, cada terreno possui características ambientais (climáticas) e físicas (topográficas) próprias pressupondo adequações ao projeto padrão. Porém, por inúmeras razões ou motivos, estas adequações não são realizadas por impossibilidades “técnicas, econômicas, temporais, vontade política” dentre outras (ALMEIDA, 2018, p. 35).

Outra questão atrelada ao uso de projetos padrão no país é que este modelo construtivo costuma resultar em uma série de falhas pois estes projetos são repetidos, sem uma avaliação pós-ocupacional crítica visando retroalimentar o projeto e melhorar a qualidade final do produto (KOWALTOWSKI, 2011). Pela lógica, deveria acontecer exatamente o contrário uma vez que o processo de repetição permite que correções sejam implementadas após cada obra construída.

De modo geral, o projeto arquitetônico deve ser pautado na escolha de soluções condizentes com o seu contexto de inserção, porém, estas escolhas podem não fazer mais sentido quando o edifício é construído em outros contextos.

2.5 Eficiência Energética

De maneira objetiva, eficiência energética pode ser entendida como a obtenção de um serviço com o menor dispêndio de energia possível (LAMBERTS, et al. 2014). Porém, não significa redução de serviços, mas sim, o uso mais eficiente deles, ou seja, de aparelhos ou equipamentos que possam fornecer os mesmos serviços com um menor consumo de energia, ou de fornecerem mais serviços com a mesma quantidade de energia (CUNHA, 2006).

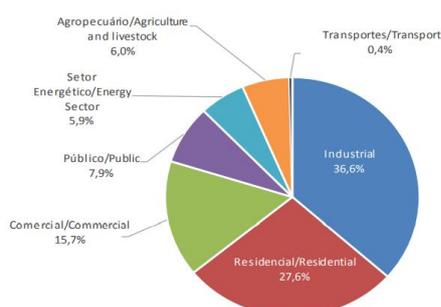
Em edificações, seu conceito de eficiência energética está associado a adoção de medidas de racionalização do consumo de eletricidade sem que haja, contudo, perda da comodidade e do conforto ambiental por parte de seus usuários (ROMERO e REIS, 2012). Um projeto energeticamente eficiente implicaria, portanto, em uma edificação com maior conforto e menor consumo de energia possíveis, sem que haja comprometimento dos serviços, da segurança e da produtividade dos usuários (CARLO, 2008).

A eficiência energética em edifícios é um tema bastante discutido hoje, cujas raízes remontam a primeira crise do petróleo na década de 1970. O aumento repentino do preço do barril provocou uma crise mundial no setor de energia que impactou diretamente o setor de edificações, principalmente na América do Norte e na Europa, pois, naquela época, os grandes edifícios comerciais estadunidenses, por exemplo, chegavam a consumir até 100KWh/m² ao mês, algo entre 8 e 10 vezes mais que os valores praticados atualmente (ROMERO e REIS, 2012).

No Brasil, a derradeira crise do setor elétrico ocorreu no início dos anos 2000 culminando em apagões generalizados pelo país e conseqüente racionamento de energia. Estes eventos trouxeram ao conhecimento e discussão da sociedade as questões relacionadas a racionalização da energia e a eficiência energética. A partir daquela época começaram a ser implementadas estratégias como normas, regulamentos e métodos de avaliação e classificação do consumo visando a racionalização do uso da energia elétrica.

Embora a matriz energética brasileira seja baseada principalmente em fontes limpas e renováveis, algo em torno de 74,6% (EPE, 2021) do total produzido, a construção de usinas hidrelétricas é dispendiosa e provoca impactos ambientais e sociais, além de ser suscetível à escassez de chuvas (AGOPYAN; JOHN, 2011).

Figura 3 – Participação setorial no consumo de energia no Brasil, ano base 2020.

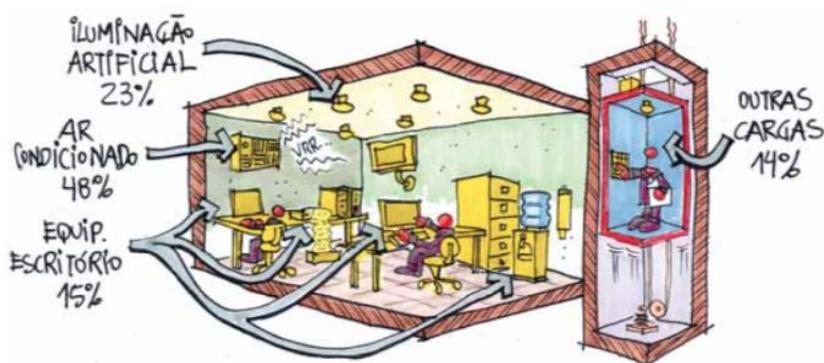


Fonte: EPE, 2021.

O consumo de energia elétrica no país foi de 540,2TWh no ano de 2020, e representa uma redução de 1,0% em relação ao ano anterior. Os edifícios em geral foram responsáveis pelo consumo de 51,2% da energia elétrica produzida naquele ano sendo o setor residencial responsável por 27,6%, o comercial por 15,7% e o Setor Público por 7,9% do consumo total de eletricidade (Figura 3) (EPE, 2021).

Especificamente em relação ao setor público, o consumo final de energia no ano de 2020 foi de $3.976 \cdot 10^3$ TEP, um decréscimo de 7,32% em comparação com 2019, possivelmente provocado pela promoção ou implementação do trabalho remoto em diversos órgãos e entidades públicas como medida de mitigação da pandemia de Covid-19. A eletricidade representa hoje 92,3% de toda a energia consumida pelo setor público, sendo que este percentual era de 82% há dez anos, o que demonstra uma dependência cada vez maior da eletricidade nos prédios públicos (EPE, 2021). Ainda, com relação ao consumo de eletricidade pelos prédios públicos, em média, 48% do total consumido relaciona-se aos equipamentos de ar condicionado, 23% à iluminação artificial, 15% em equipamentos de escritório e 14% com outras cargas (Figura 4) (LAMBERTS, 2014).

Figura 4 – Consumo por uso final em edifícios públicos.



Fonte: LAMBERTS, 2014.

Por outro lado, estudos mostram que existe no país um considerável potencial de conservação de energia elétrica. Dados do PBE-Edifica mostram que este potencial pode chegar a 30% nas edificações existentes que passarem por intervenção do tipo *retrofit* (reforma ou atualização) e um potencial, ainda maior, de cerca de 50% para as edificações a serem construídas. Isso se em ambos os casos, forem adotadas tecnologias energeticamente eficientes ou que possuam atributos ou características bioclimáticas ou sustentáveis (ELETROBRAS/PROCEL, 2019).

Scalco *et al.* (2014) avaliaram este potencial de economia de energia considerando como base de dados o tipo edificações comerciais etiquetadas. Os resultados apontaram para uma economia média de 26% entre os modelos, variando de 21% a 34% conforme a edificação e a zona bioclimática na qual estava inserida em comparação aos modelos de referência.

2.6 Programas Voltados para a Eficiência Energética no Brasil

Estas crises energéticas deflagraram um processo inédito; o surgimento de políticas de incentivo à racionalização do consumo de energia elétrica e, também, à aplicação de regulamentos, alguns com força de lei, com este mesmo intuito.

No Brasil o primeiro esforço neste sentido foi a criação do Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE), nascido em 1985, sob a coordenação do Instituto Brasileiro de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) cujo objetivo foi o de trazer informações aos consumidores a respeito do nível de consumo e eficiência, inicialmente de aparelhos e equipamentos e, mais recentemente, alcançando em seu espectro de classificação até veículos e edifícios. Esta classificação é feita por meio da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia - ENCE que possui níveis que variam de "A", mais eficiente, a "E", menos eficiente (CARDOSO, 2015; LAMBERTS *et al.*, 2015).

Paralelamente, foi criado, naquele mesmo ano, o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica – PROCEL, que teve como objetivo promover a racionalização da produção e do consumo de energia elétrica com vistas a eliminar desperdícios e reduzir custos e os investimentos setoriais. Após ter sido transformado em programa de governo e ter sua abrangência ampliada, em 1997 foi instituído pela Eletrobrás, com o apoio do Ministério de Minas e Energia – MME o Programa Nacional de Eficiência Energética nos Prédios Públicos – PROCEL EPP cujo objetivo foi promover e desenvolver sistemas mais eficientes de iluminação, climatização, envoltória e aquecimento de água em edifícios públicos do país (MMA, 2014). Uma das ações deste programa foi implementar a Etiqueta Nacional de Conservação de Energia – ENCE nas edificações públicas, como mecanismo de avaliação e classificação dos impactos provocados pelas ações empregadas de conservação de energia nos prédios.

Outra importante ação foi a publicação, em 2001, da Lei nº 10.295 de 17 de outubro de 2001, que dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia (BRASIL, 2001), estabelecendo que devam ser desenvolvidos “mecanismos que promovam a eficiência energética nas edificações do país”. Recentemente, o Decreto nº 9.864 de 27 de junho de 2019 (BRASIL, 2019) regulamenta esta Lei e estabelece os níveis máximos de consumo de energia, ou mínimos de eficiência energética, de máquinas e aparelhos consumidores de energia, fabricados ou comercializados no país e de edificações construídas.

Em 2003 foi criado o Programa Nacional de Eficiência Energética em Edificações – PROCEL Edifica com o objetivo de incentivar e promover o uso racional de energia elétrica em edificações. Em 2005 é definido o método para classificação do nível de eficiência energética e obtenção da ENCE para os edifícios que fazem parte do Programa Brasileiro de Etiquetagem em Edificações – PBE Edifica.

Neste mesmo ano, foi publicada a NBR 15.220 (ABNT, 2005) – Norma de desempenho térmico de edificações que apresenta recomendações e diretrizes construtivas aplicáveis na fase de projeto quanto ao desempenho térmico de edificações em diferentes regiões brasileiras por meio do estabelecimento do Zoneamento Brasileiro Bioclimático.

Em 2010 foi publicada a Instrução Normativa nº 1 de 19 de janeiro de 2010 (BRASIL, 2010), que dispõe sobre critérios de sustentabilidade ambiental na aquisição de bens e na contratação de serviços ou obras pela Administração Pública Federal. Por meio desta, exige-se que as especificações e projetos para a contratação de obras e serviços de engenharia pelo Governo sejam elaboradas visando reduzir o consumo de energia e de água contribuindo para a redução dos custos operacionais e de manutenção dos edifícios públicos.

O Plano Nacional de Eficiência Energética foi proposto em 2011 e, em 2013 foi publicada a NBR 15.575 (ABNT, 2013) – Norma de desempenho de edificações residenciais que estabelece exigências de conforto e segurança em edificações de até cinco pavimentos por meio de requisitos mínimos de qualidade. Além de estabelecer parâmetros para o desempenho térmico, acústico, lumínico e de resistência a incêndios.

No ano de 2014 foi publicada a Instrução Normativa nº 2 (BRASIL, 2014), que torna compulsória a obtenção da ENCE para todos os edifícios federais novos ou

que passem por processo de *retrofit* com nível máximo de classificação para os três sistemas avaliados pela etiqueta (envoltória, iluminação e condicionamento de ar). No caso específico de reformas é obrigatória a obtenção da classificação máxima apenas para os sistemas de iluminação e condicionamento de ar. Para o sistema envoltória é vedada a redução do seu nível de eficiência, sendo recomendada a obtenção de nível superior visto que este sistema faz parte da estrutura física permanente da edificação.

Por fim, em 2021 foi publicada a Portaria nº 42 (INMETRO, 2021) que aprova o uso da Instrução Normativa Inmetro para a classificação de eficiência energética de edificações comerciais, de serviços e públicas (INI-C) e emissão da ENCE. Esta instrução normativa aperfeiçoa os requisitos técnicos da qualidade para o nível de eficiência energética de edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C) especificando os critérios e os métodos para a classificação de edificações comerciais, de serviços e públicas quanto a sua eficiência energética, para aprimorar ainda mais os resultados da avaliação do consumo real das edificações. Introduce uma nova abordagem de avaliação com base em tipos de edificações (escritórios, educacionais, hospedagem, estabelecimentos assistenciais de saúde, etc.) implementando a avaliação do consumo por meio da energia primária na análise do desempenho energético da edificação, e de implementar a melhoria do indicador de desempenho, que passa a comparar a edificação com suas características reais à mesma edificação, adotando-se condições de referência, que equivalem à classificação “D”.

2.7 Sistemas de Certificação Ambiental

Os sistemas de certificação ambiental surgiram da necessidade de se verificar e comprovar o grau de eficiência de projetos e de edifícios com características sustentáveis e tem como propósito avaliar quantitativa e qualitativamente, a partir de indicadores de desempenho pré-estabelecidos, os impactos que provocam ao meio ambiente (PINHEIRO, 2006). Os principais critérios avaliados pelos sistemas de certificação ambiental relacionam-se a aspectos construtivos, energéticos, climáticos e ambientais das edificações, de seu entorno e de sua interação com a cidade e a sociedade. Estes sistemas fornecem também orientações e servem como uma ferramenta para a tomada de decisões de projeto (KWOK e GRONDZIG, 2013).

O primeiro sistema de certificação ambiental para edificações foi o BREEM (*Building Research Establishment Environmental Assessment Methodology*) desenvolvido no Reino Unido na década de 1990. Este sistema serviu de inspiração para a criação de outros, como o norte-americano LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*) em 1993, por exemplo. Outros exemplos são o francês HQE, o japonês CASBEE e o português LIDERA.

Embora desenvolvidas para outros contextos climáticos e outras realidades construtivas, algumas destas iniciativas foram adaptadas e se encontram disponíveis para uso no Brasil sendo o LEED e o HQE as que têm maior aceitação no mercado. Por outro lado, algumas ferramentas foram especificamente criadas para o contexto brasileiro como a Etiqueta Nacional de Conservação de Energia – ENCE do Programa Brasileiro de Conservação de Energia, PROCEL-Edifica e o Selo Azul, desenvolvido pela Caixa Econômica Federal e destinado a empreendimentos habitacionais financiados pelo banco. Estes quatro programas dominam o cenário nacional das certificações ambientais com uma participação de 38%, 31%, 28% e 3%, respectivamente, segundo Santos *et al* (2014). Dadas as suas relevâncias para o propósito deste trabalho, serão detalhadas apenas as três primeiras certificações.

2.7.1 LEED

O LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*) é um sistema de certificação desenvolvido pelo USGBC (*United State Green Building Council*), para a avaliação do nível de sustentabilidade de edifícios no sistema de pontuação, por meio do atendimento a critérios pré-estabelecidos para as etapas de projeto, construção e operação de um empreendimento. Visa contribuir para a criação de edifícios mais sustentáveis, saudáveis, eficientes e econômicos (GBC Brasil, 2019).

Figura 5 – Selo LEED.



Fonte: GBC Brasil, 2019.

O sistema LEED dispõe de quatro tipos diferentes de certificação, Novas Construções (BD+C), Design de Interiores (ID+C), Edifícios Existentes (O+M) e Bairros (ND). Possui nove categorias de certificação que são avaliadas (Quadro 2). que contam com pré-requisitos (práticas obrigatórias) e créditos (recomendações que quando atendidas garantem pontos extras) pré-estabelecidos. A classificação final do empreendimento é definida em função da quantidade de pontos adquiridos sendo dividida em quatro classes: certificado, prata, ouro e platina (GBC Brasil, 2019).

Quadro 2 – Categorias da Certificação LEED.

Categorias		Descrição
	Projeto Integrado	Incentiva que o projeto seja desenvolvido por uma equipe multidisciplinar de profissionais, desde a concepção da ideia do projeto.
	Localização e Transporte	Incentiva a escolha de terrenos localizados em áreas urbanas já bem desenvolvidas e adensadas, que oferecem variedade de comércio e transporte alternativos aos carros, como ônibus e ciclovias.
	Espaço Sustentável	Encoraja estratégias que minimizam o impacto no ecossistema durante a implantação da edificação e aborda questões fundamentais de grandes centros urbanos, como permeabilidade do solo e das ilhas de calor.
	Eficiência do Uso da Água	Promove inovações para o uso racional da água, com foco na redução do consumo de água potável e alternativas de tratamento e reuso dos recursos.
	Energia e Atmosfera	Promove eficiência energética nas edificações por meio de estratégias simples e inovadoras, como simulações energéticas, medições, comissionamento de sistemas e utilização de equipamentos e sistemas eficientes.
	Materiais e Recursos	Encoraja o uso de materiais de baixo impacto ambiental (reciclados, regionais, recicláveis, de reuso, etc.) e reduz a geração de resíduos, além de promover o descarte consciente, desviando o volume de resíduos gerados dos aterros sanitários.

Continua

Continua

	Qualidade Ambiental Interna	Promove a qualidade ambiental interna do ar, essencial para ambientes com alta permanência de pessoas, com foco na escolha de materiais com baixa emissão de compostos orgânicos voláteis, controlabilidade de sistemas, conforto térmico e priorização de espaços com vista externa e luz natural.
	Inovação e Processos	Incentiva a busca de conhecimento sobre <i>Green Buildings</i> assim como a criação de medidas projetuais não descritas nas categorias do LEED. Pontos de desempenho exemplar estão habilitados por esta categoria.
	Prioridade Regional	Incentiva os créditos definidos como prioridade regional para cada país, de acordo com as diferenças ambientais, sociais e econômicas existentes para esta categoria.

Fonte: GBC Brasil, 2019. Adaptado pelo autor.

A partir do ano de 2005, os requisitos do LEED para eficiência energética podem ser comprovados por meio do atendimento aos critérios do PROCEL-Edifica para edifícios comerciais, de serviços e públicos quando este tiver sido classificado com a etiqueta “A” do programa.

2.7.2 AQUA-HQE

O Processo AQUA-HQE é uma certificação desenvolvida a partir da certificação francesa *Démarche HQE (Haute Qualité Environnementale)*. No Brasil ela foi lançada em 2008 e é aplicada pela Fundação Vanzolini. Tem como objetivo a busca por condições ideais de conforto e saúde dos usuários do empreendimento e respeito ao meio ambiente e à sociedade por meio da análise do seu local de implantação e de seu programa de necessidades. Esta análise é realizada por meio de um sistema de gestão específico para os empreendimentos, sejam eles novos ou que passem por processo de *retrofit*, por meio do atendimento a 14 categorias pré-estabelecidas (Quadro 3). Ao final, o empreendimento é classificado nos níveis Base (práticas consideradas correntes ou regulares), Boas Práticas (práticas consideradas

como boas, destacadas) ou Melhores Práticas (práticas constatadas de desempenho máximo) (FUNDAÇÃO VANZOLINI, 2019).

Quadro 3 – Categorias da certificação AQUA-HQE

Categorias	
1	Relação do edifício com o seu entorno.
2	Escolha integrada de produtos, sistemas e processos construtivos.
3	Canteiro de obras de baixo impacto ambiental.
4	Gestão da energia.
5	Gestão da água.
6	Gestão de resíduos de uso e operação do edifício.
7	Manutenção – Permanência do desempenho ambiental.
8	Conforto higratérmico
9	Conforto acústico.
10	Conforto visual.
11	Conforto olfativo.
12	Qualidade sanitária dos ambientes.
13	Qualidade sanitária do ar.
14	Qualidade sanitária da água.

Fonte: FUNDAÇÃO VANZOLINI, 2019.

Para a obtenção da certificação AQUA-HQE, o empreendimento precisa alcançar um resultado mínimo de desempenho com três categorias no nível Melhores Práticas, quatro categorias no nível Boas Práticas e sete categorias no nível Base.

2.7.3 PBE-Edifica

Em 1984 iniciaram-se discussões para se criar um programa de avaliação da conformidade com foco no desempenho de equipamentos consumidores de energia com o objetivo de racionalizar o uso da energia no Brasil. Como resultado destas discussões, nasceu o Programa Brasileiro de Etiquetagem – PBE que utiliza a Etiqueta Nacional de Conservação de Energia – ENCE para prestar as informações sobre o desempenho destes produtos. O PBE é composto hoje por 38 subprogramas sendo o PBE-Edifica o correspondente para a avaliação da conformidade de edificações aos conceitos de eficiência energética (PBE-EDIFICA, 2019).

A certificação é outorgada a projetos e edifícios construídos, novos ou existentes que passaram por processo de *retrofit*. A etiqueta do PBE-Edifica evidencia o atendimento a requisitos de desempenho estabelecidos em normas e regulamentos técnicos (RTQ's) e classifica a edificação em cinco níveis de eficiência que vai do “A” - mais eficiente, ao “E” - menos eficiente. A etiqueta pode ser emitida para edificações comerciais, de serviço e públicas (Figura 6) e edificações residenciais. A concessão da etiqueta pode se dar de duas maneiras diferentes, por meio do método prescritivo ou por meio do método de avaliação computacional. Para os edifícios comerciais, de serviço e públicos - foco deste trabalho - são avaliados três sistemas edifícios: a envoltória, iluminação e condicionamento de ar. A etiqueta pode ser concedida parcialmente, desde que sempre contemple a avaliação da envoltória (PBE-EDIFICA, 2019).

Figura 6 – Modelo da ENCE para edifícios comerciais, de serviços e públicos.



Fonte: PBE-Edifica, 2019.

A certificação possui ainda um selo, o Selo PROCEL Edificações que identifica os edifícios mais bem classificados na sua categoria. Para conquista do selo, é necessária a obtenção da classificação “A” para os três sistemas avaliados. Como já dito, este selo pode ser utilizado para a comprovação do atendimento aos pré-requisito de desempenho energético da certificação LEED na categoria Energia e Atmosfera e da certificação AQUA-HQE na categoria Gestão de Energia e Conforto Higrotérmico.

Figura 7 – Selo PROCEL Edificações.



Fonte: PBE-EDIFICA, 2019.

2.8 RTQ-C

O Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos – RTQ-C estabelece os critérios e os procedimentos para a classificação de um edifício com relação à sua eficiência energética, com vistas à obtenção da ENCE. São avaliados os sistemas edíficos envoltória, iluminação e condicionamento de ar para edificações novas ou existentes que passem por processo de *retrofit*, contando que possuam área construída superior a 500 m² ou tensão de abastecimento igual a 2,3 kV ou superior. Para a classificação do edifício, considera-se, ainda uma variável referente à bonificação concedida a mediante inclusão de equipamentos ou sistemas que contribuam para a redução do consumo energético. O regulamento indica duas maneiras diferentes de se analisar o nível de eficiência do edifício: o método prescritivo (que será utilizado neste trabalho) e o método de simulação computacional (ELETROBRAS, 2016).

O método prescritivo é um método simplificado que avalia a eficiência energética da edificação por meio de equações e tabelas em que são calculados equivalentes numéricos (*EqNum*), chamados índices de consumo (*IC*), para cada um dos sistemas edíficos avaliados. A classificação do sistema é feita em cinco níveis de eficiência energética, sendo o nível “A” o mais eficiente, correspondendo a pontuação 5, e o nível “E” o menos eficiente, correspondendo a pontuação 1 (Figura 8).

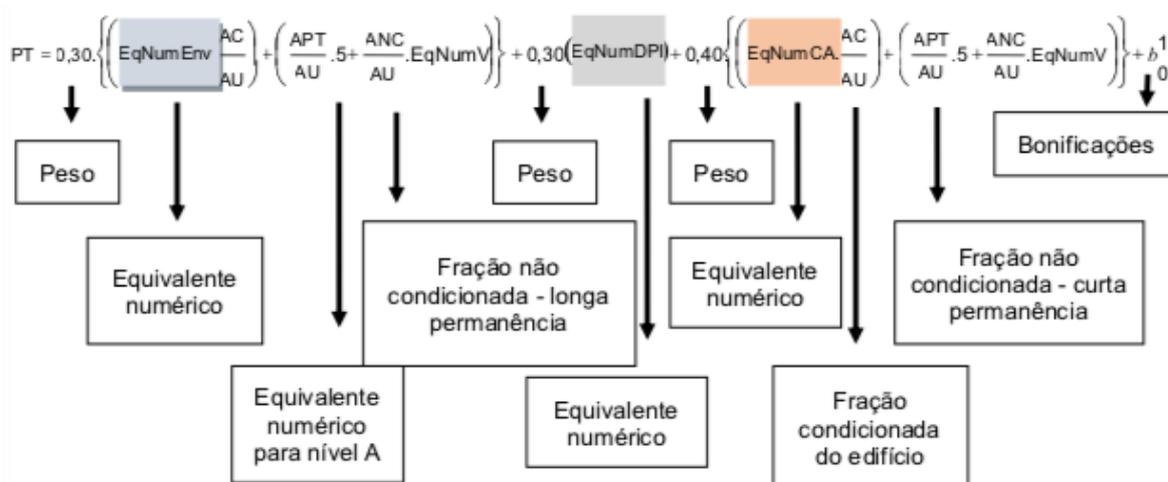
Figura 8 – Equivalente numérico para cada nível de eficiência.

A	5
B	4
C	3
D	2
E	1

Fonte: ELETROBRÁS, 2016.

Cada sistema avaliado recebe uma pontuação submetida a um peso para o resultado final da classificação sendo este peso distribuído 30% para a envoltória, 30% para a iluminação e 40% para o sistema de ar-condicionado. A classificação final do edifício é dada pela sua pontuação total (*PT*) calculada de acordo com a distribuição dos pesos, somada à bonificação. Estes resultados são reunidos em uma equação (Figura 9), de onde se obtém o nível geral de classificação do edifício.

Figura 9 – Equação geral de suas variáveis.



Fonte: ELETROBRÁS, 2016.

Onde:

PT: Pontuação total;

EqNumEnv: Equivalente numérico da envoltória;

EqNumDPI: Equivalente numérico do sistema de iluminação, onde DPI significa Densidade de Potência de Iluminação;

EqNumCA: Equivalente numérico do sistema de condicionamento de ar;

EqNumV: Equivalente numérico de ambientes não condicionados e / ou ventilados naturalmente;

APT: Área útil dos ambientes de permanência transitória, desde que não condicionados;

ANC: Área útil dos ambientes não condicionados de permanência prolongada, com comprovação de percentual de horas ocupadas de conforto por ventilação natural (*POC*) através do método de simulação;

AC: Área útil dos ambientes condicionados;

AU: Área útil;

b: Pontuação obtida pelas bonificações.

Para a classificação geral do nível de eficiência da edificação é necessário cumprir pré-requisitos gerais relacionados aos circuitos elétricos, com separação de circuitos elétricos e de aquecimento de água, para aqueles edifícios que utilizem elevada demanda de água quente, utilizem sistemas eficientes. O não atendimento a estes pré-requisitos não impede as classificações parciais; mas impede a obtenção da etiqueta completa para o nível de eficiência “A”.

Além dos pré-requisitos gerais, para o cálculo do nível de eficiência da envoltória deverão ser atendidos os pré-requisitos específicos de acordo com o nível de eficiência pretendido. São três os pré-requisitos: 1) transmitância térmica da cobertura e paredes externas, 2) cores e absorvância de superfícies e 3) iluminação zenital (Tabela 1).

Tabela 1 – Pré-requisitos específicos da envoltória.

Nível de eficiência	Transmitância térmica da cobertura e paredes exteriores	Cores e absorvância de superfícies	Iluminação zenital
A	X	X	X
B	X	X	X
C e D	X		

Fonte: Manual de aplicação do RTQ-C, 2016.

Descrição dos pré-requisitos específicos para a envoltória segundo o método prescritivo do RTQ-C:

a) Transmitância térmica (U) W/m^2K

Transmitância térmica é a transmissão de calor em unidade de tempo através de uma área unitária de um elemento ou componente construtivo, neste caso, de componentes opacos das fachadas ou coberturas - incluindo as resistências superficiais internas e externas - induzida pela diferença de temperatura entre os dois ambientes. Um dos modelos de cálculo da transmitância térmica adotado pelo RTQ-C é o da NBR 15220-2 (ABNT, 2005). A transmitância térmica de componentes é o inverso da resistência térmica total.

O RTQ-C estipula limites de transmitância térmica das coberturas para cada Zona Bioclimática que são específicos para edifícios com ambientes condicionados artificialmente e ambientes não condicionados (Tabela 2).

Tabela 2 – Transmitância térmica máxima de coberturas para o nível “A”.

Zonas Bioclimáticas	Transmitância térmica máxima	
	Ambientes condicionados artificialmente	Ambientes não condicionados
ZB 1 e 2	0,5 W/m^2K	1,0 W/m^2K
ZB 3 a 8	1,0 W/m^2K	2,0 W/m^2K

Fonte: Manual para aplicação do RTQ-C (ELETROBRÁS, 2016).

O RTQ-C estipula limites de transmitância térmica das paredes exteriores para cada Zona Bioclimática (Tabela 3).

Tabela 3 – Transmitância térmica máxima de paredes exteriores para o nível “A”.

Zonas Bioclimáticas	Transmitância térmica máxima	
ZB 1 e 2	1,0 W/m^2K	
ZB 3 a 6	3,7 W/m^2K	
ZB 7 e 8	2,5 W/m^2K para paredes com capacidade térmica máxima de 80 kJ/m^2K	3,7 W/m^2K para paredes com capacidade térmica superior a 80 kJ/m^2K

Fonte: Manual de aplicação do RTQ-C (ELETROBRÁS, 2016).

a) Cores e absorvância de superfícies (α)

Segundo a NBR 15220-1 (ABNT, 2005) a absorvância térmica é o quociente da taxa de radiação solar absorvida por uma superfície pela taxa de radiação solar incidente sobre esta mesma superfície. O RTQ-C determina uma absorvância máxima de 0,50 para os materiais de revestimento externo das paredes para as Zonas Bioclimáticas de 2 a 8 (Tabela 4). A Zona Bioclimática 1 é excluída deste limite para permitir absorvância elevada que podem aumentar os ganhos térmicos por radiação nos edifícios durante o inverno. Para as coberturas, a absorvância solar máxima também é de 0,50, exceto para coberturas de teto-jardim ou de telhas cerâmicas não esmaltadas pois estas coberturas apresentam bom desempenho térmico independentemente da absorvância solar. O teto-jardim devido a efeitos como a evapo-transpiração e as telhas cerâmicas não esmaltadas devido a suas porosidades.

Tabela 4 – Limites máximos de absorvância de superfícies.

Limite de absorvância térmica de superfícies		
ZB 2 a 8	Paredes externas	$\leq 0,50$
	Coberturas	$\leq 0,50$

Fonte: Manual de aplicação do RTQ-C (ELETROBRÁS, 2016).

a) Iluminação zenital

Segundo o Manual para aplicação do RTQ-C (ELETROBRÁS, 2016), as aberturas zenitais permitem a passagem da luz natural nos ambientes internos possibilitando a redução no consumo de eletricidade em iluminação. No entanto, à primeira vista o RTQ-C parece penalizar esta prática ao exigir percentuais reduzidos de aberturas zenitais para o nível “A” (Tabela 5).

Tabela 5 – Limites de fator solar e de percentual de abertura zenital de coberturas.

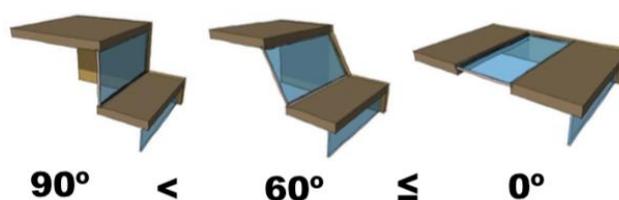
Limites de fator solar (FS) de vidros e de percentual de abertura zenital (PAZ) de coberturas				
PAZ	0 a 2%	2,1 a 3%	3,1 a 4%	4,1 a 5%
FS	0,87	0,67	0,52	0,30

Fonte: Manual de aplicação do RTQ-C (ELETROBRÁS, 2016). Adaptado pelo autor.

Esta exigência garante que a entrada de luz natural no edifício não implique em uma elevação da carga térmica através da radiação solar. Por isso, quanto maior a área de abertura zenital, menores os Fatores Solares. Assim, um menor *PAZ* pode usar vidros ou materiais transparentes ou translúcidos com maior Fator Solar e vice-versa.

Ainda segundo o RTQ-C, o limite máximo de 5% de *PAZ* pode ser ultrapassado caso o método de avaliação do nível de eficiência seja a simulação computacional do desempenho energético da edificação. Outra solução é o aproveitamento de iluminação zenital a partir de aberturas em planos verticais, ou com inclinação superior a 60° com o plano horizontal (Figura 20), aberturas em que a incidência direta da radiação solar, nas horas mais quentes do dia, é menor. Estas aberturas serão contabilizadas como parte do *PAF_T* independentemente da sua localização no edifício.

Figura 10 – Diferença entre *PAF_T* e *PAZ*.



Fonte: Manual de aplicação do RTQ-C (ELETROBRÁS, 2016).

2.8.1 Procedimentos de cálculo pelo método prescritivo

Como o foco deste trabalho é a avaliação da envoltória, para o RTQ-C a sua classificação é feita por meio da determinação de um conjunto de índices referentes às características físicas da edificação. Componentes opacos e dispositivos de iluminação zenital são definidos em pré-requisitos enquanto as aberturas verticais são avaliadas através de equações. Estes parâmetros compõem a “pele” da edificação (cobertura, fachadas e aberturas) e são complementadas com dados referentes ao volume, área de piso e orientação das fachadas.

O Método Prescritivo do RTQ-C para a envoltória classifica a sua eficiência energética com base no Indicador de Consumo (*IC*) obtido por meio de duas equações específicas, definidas de acordo com a Zona Bioclimática e que variam de acordo com a área de projeção da cobertura (*A_{pcob}*) da edificação, sendo a primeira

para edifícios com área menor que 500 m² e a segunda para edifícios com área de projeção maior que 500 m². Além da determinação da A_{pcob} , outras variáveis são necessárias para a determinação da eficiência energética da envoltória segundo o Método Prescritivo e estão listadas a seguir.

a) Fator Altura (FA)

É a razão entre a área de projeção da cobertura e a área total construída (A_{pcob}/A_{tot}), com exceção dos subsolos. A Área de Projeção da Cobertura desconsidera beiras e marquises que estejam fora do alinhamento do edifício. Já a Área Total Construída (A_{tot}) é a soma das áreas de piso dos ambientes fechados, contados a partir da face externa das paredes da envoltória.

b) Fator Forma (FF)

É a razão entre a área da envoltória e o volume total da edificação (A_{env}/V_{tot}). A Área da Envoltória (A_{env}) corresponde à soma das áreas das fachadas da edificação, sejam opacas ou não opacas. O Volume Total (V_{tot}) edificação é determinado pelos fechamentos externos, multiplicando a área de projeção do edifício pela sua altura.

c) Fator Solar (FS)

É a razão entre o ganho de calor que entra num ambiente através de uma abertura e a radiação solar incidente nesta mesma abertura. Inclui o calor radiante transmitido pelo vidro e a radiação solar absorvida, que é re-irradiada ou transmitida, por condução ou convecção, ao ambiente. Segundo a NBR 15220-2 (ABNT, 2005) o fator solar de elementos transparentes ou translúcidos pode ser calculado por meio da Equação 1.

(1)

$$FS_T = U \cdot \alpha \cdot R_{se} + \tau$$

Onde:

FS_T é o fator solar de elementos transparentes ou translúcidos;

U é a transmitância térmica do componente;

α é a absorvância à radiação solar;

R_{se} é a resistência superficial externa;

τ é a transmitância à radiação solar.

a) Ângulo Horizontal de Sombreamento (AHS) e Ângulo Vertical de Sombreamento (AVS)

O sombreamento de aberturas pode ocorrer de forma horizontal, a qual é determinada pelo AHS ou vertical, determinado pelo AVS . O AHS é formado entre dois planos verticais entre uma abertura e, para efeito de cálculo, é considerada a média do ângulo entre eles medido em planta. O AVS é indicado em corte e corresponde às projeções solares horizontais e seu efeito sobre uma determinada abertura. Ambas as medidas são em graus.

Importante destacar que o RTQ-C desconsidera para o cálculo o sombreamento proveniente de edificações vizinhas, elementos de proteção solar como pórticos, telas, chapas e outros elementos paralelos ao plano envidraçado.

b) Percentual de Abertura Zenital (PAZ)

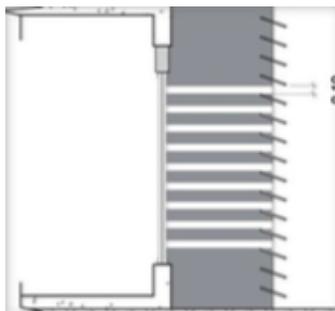
O PAZ corresponde à porcentagem de aberturas zenitais em relação à área da cobertura, desde que o ângulo de abertura seja inferior a 60° .

c) Percentual de Área de Abertura na Fachada Total (PAF_T)

É a razão entre a soma das aberturas envidraçadas de cada fachada pela área total de fachada da edificação. Refere-se exclusivamente a aberturas em paredes verticais com ângulos de inclinação entre 60° e 90° em relação ao plano horizontal. Caso o ângulo seja inferior a 60° será considerado para o cálculo de PAZ . Deverá ser descontada a área dos caixilhos e considerada o tamanho real da abertura em vista.

Para o caso dos *brises*, são considerados fachadas opacas quando a sua abertura não ultrapassa a altura do vão e os mesmos estão conectados ao edifício. O *PAF* considerado nesses casos é apenas o percentual de vidro possível de ser visto ortogonalmente através das aletas em sua abertura máxima, não sendo contabilizado como *AHS* ou *AVS* (Figura 11).

Figura 11 – Parcela de abertura contabilizada para o cálculo do *PAF*.



Fonte: Manual de aplicação do RTQ-C (ELETROBRÁS, 2016).

2.8.2 Procedimentos para determinação da eficiência da envoltória pelo método prescritivo do RTQ-C

Para a determinação do nível de eficiência energética da envoltória o RTQ-C determina duas equações por Zona Bioclimática, uma para edifícios com área de projeção menor que 500 m² e outra para edifícios com área de projeção maior que 500 m². As equações para $A_{pe} > 500$ m² são válidas para um Fator de Forma mínimo permitido (A_{env}/V_{tot}). As equações para $A_{pe} < 500$ m² são válidas para um Fator de Forma máximo permitido. O Indicador de Consumo da envoltória do edifício (IC_{env}) deve ser calculado conforme as equações abaixo:

Equações para a Zona Bioclimática 1:

$$A_{pe} \leq 500 \text{ m}^2$$

$$\text{Limite de forma máximo } (A_{env}/V_{tot}) = 0,60$$

(2)

$$IC_{enc} = -43,0.FA - 316,62.FF + 16,83.PAF_T + 7,39.FS - 0,20.AVS + 0,20.AHS \\ + 132,5.(FA/FF) - 77.FA.FF - 0,92.FF.PAF_T.AHS + 182,66$$

$A_{pe} > 500 \text{ m}^2$

Limite de forma máximo (A_{env}/V_{tot}) = 0,70

(3)

$$IC_{enc} = 10,47.FA + 298,74.FF + 38,41.PAF_T - 1,11.FS - 0,11.AVS + 0,24.AHS - 0,54.PAF_T.AHS + 47,53$$

Equação para as Zonas Bioclimáticas 2 e 3:

$A_{pe} \leq 500 \text{ m}^2$

Limite de forma máximo (A_{env}/V_{tot}) = 0,70

(4)

$$IC_{enc} = -175,30.FA - 212,79.FF + 21,86.PAF_T + 5,59.FS - 0,19.AVS + 0,15.AHS + 275,19.(FA/FF) - 213,35.FA.FF - 0,04.PAF_T.FS.AVS - 0,45.PAF_T.AHS + 190,42$$

$A_{pe} > 500 \text{ m}^2$

Limite de forma máximo (A_{env}/V_{tot}) = 0,15

(5)

$$IC_{enc} = -14,14.FA - 113,94.FF + 50,82.PAF_T + 4,86.FS - 0,32.AVS + 0,26.AHS - 35,75/FF - 0,54.PAF_T.AHS + 277,98$$

Equação para as Zonas Bioclimáticas 4 e 5:

$A_{pe} \leq 500 \text{ m}^2$

Limite de forma máximo (A_{env}/V_{tot}) = 0,75

(6)

$$IC_{enc} = 105,39.FA - 207,12.FF + 4,61.PAF_T + 8,08.FS - 0,31.AVS + 0,07.AHS - 82,34.FA.FF + 3,45.PAF_T.FS - 0,005.PAF_T.FS.AVS.AHS + 171,27$$

$A_{pe} > 500 \text{ m}^2$

Limite de forma máximo (A_{env}/V_{tot}) = livre

(7)

$$IC_{enc} = -511,12.FA + 0,92.FF - 95,71.PAF_T - 99,79.FS - 0,52.AVS - 0,29.AHS - 380,83.FA.FF + 4,27/FF + 729,20.PAF_T.FS + 77,15$$

Após ser determinado o IC_{env} , deverá ser calculado o IC_{maxD} segundo os dados da Tabela X. O IC_{maxD} representa o indicador máximo que a edificação deve atingir para obter a classificação “D” sendo que os resultados acima deste valor, classifica a edificação com o nível “E”.

Tabela 6 – Parâmetros do IC_{maxD}

Parâmetros			
PAFT	FS	AVS	AHS
0,60	0,61	0	0

Fonte: Manual de aplicação do RTQ-C (ELETROBRÁS, 2016).

Deverá ser calculado o IC_{min} segundo os dados da Tabela X. O IC_{min} representa o indicador mínimo para aquela volumetria.

Tabela 7 – Parâmetros do IC_{min}

Parâmetros			
PAFT	FS	AVS	AHS
0,05	0,87	0	0

Fonte: Manual de aplicação do RTQ-C (ELETROBRÁS, 2016).

Os limites do IC_{maxD} e IC_{min} representam o intervalo dentro do qual a edificação deve se inserir. O intervalo é dividido em 4 partes (i) e cada parte se refere a um nível de classificação na escala de desempenho que varia de “A” a “E”.

(8)

$$i = (IC_{maxD} - IC_{min}) / 4$$

Por fim, após serem determinados os limites de intervalo (i), os resultados são aplicados segundo a equação para cada nível da etiqueta apresentadas na Tabela x. Ao se comparar os resultados do IC_{env} obtido com os dados do projeto, chega-se ao nível de eficiência da envoltória da edificação.

Quadro 4 – Limites dos intervalos dos níveis de eficiência

Eficiência	A	B	C	D	E
Lim. Mín.	-	$IC_{maxD} - 3i + 0,01$	$IC_{maxD} - 2i + 0,01$	$IC_{maxD} - i + 0,01$	$IC_{maxD} + 0,01$
Lim. Máx.	$IC_{maxD} - 3i$	$IC_{maxD} - 2i$	$IC_{maxD} - i$	IC_{maxD}	-

Fonte: Manual de aplicação do RTQ-C (ELETROBRÁS, 2016).

2.8.3 Estudos que envolveram a aplicação do método prescritivo do RTQ-C

Barreto (2016) avaliou a eficiência energética dos terminais de passageiros do Aeroporto Internacional Salgado Filho em Posto Alegre por meio do método prescritivo do RTQ-C, com uso da ferramenta webprescritivo. Composto por dois blocos de terminais distintos TPS 1 e TPS 2 (Terminal de Passageiros), esses edifícios juntos somam mais de 51 mil metros quadrados de área construída. Foram avaliados, separadamente, os sistemas de envoltória, iluminação e condicionamento de ar para os dois terminais. Os dados obtidos das avaliações mostram que para o sistema envoltória, ambos os terminais alcançaram a classificação “A”, estando os principais parâmetros como absorvância solar e transmitância térmica, tanto das paredes quanto da cobertura, dentro dos limites exigidos para a classificação máxima. Contribuíram, ainda, para a classificação obtida elementos de sombreamento instalados em todas as fachadas dos edifícios. Para o sistema de iluminação, ambos os terminais receberam a classificação “B” e são compostos por iluminação dos tipos LED, fluorescentes, vapor metálico, também vapor de sódio e halógena. A autora observa que a potência total instalada para ambos os terminais está abaixo da densidade de potência limite o que classificaria o sistema com a maior pontuação, porém, o não atendimento ao pré-requisito desligamento automático, penaliza os edifícios, diminuindo a sua classe de eficiência. Como solução para se alcançar a classificação máxima, foi proposto o atendimento ao pré-requisito mencionado. O sistema de condicionamento de ar, por sua vez, é composto por uma sorte de equipamentos como Resfriadores de líquido, Torre de arrefecimento, Ar-condicionado tipo janela, Multi *split*, *Self a ar* e *Split system* e obteve, após ponderadas suas capacidades totais a classificação “E” para o TPS 1 e “A” para o TPS 2. Ao final e com vistas a obtenção da classe “A” para o sistema de condicionamento de ar, a autora propõe melhorá-lo por meio da implantação de um sistema de automação, que implicaria em ganhos de eficiência superiores a 20%,

sendo este, um percentual significativo haja vista que os sistemas de condicionamento de ar representam, em termos de carga, 48% do total dos terminais. A taxa de retorno para a implantação deste sistema foi calculada entre 15 meses e 17 meses considerando a aplicação de três índices diferentes (IGP-M, INPC e IPCA) e dois cenários de tarifa de energia (bandeiras verde e vermelha).

Prado (2018), por sua vez, avaliou o impacto de medidas de eficiência energética no projeto modelo de um edifício público para o Poder Judiciário Alagoano utilizando o método prescritivo do RTQ-C, com vistas à obtenção da classe “A” da ENCE. Por tratar-se de um modelo, dez edifícios haviam sido construídos no estado de Alagoas, em diferentes localidades, utilizando-se o mesmo projeto. A autora, para o seu estudo, adotou quatro possibilidades de implantação, variando a orientação solar em relação à fachada principal da edificação e adotou a zona bioclimática 8 como padrão uma vez que essa zona contempla quase a totalidade dos municípios do estado. Foram avaliados os sistemas envoltória, iluminação e condicionamento de ar. Os resultados mostram que, para a envoltória, a classificação do nível de eficiência para todas as quatro situações propostas foi “E”, em função do alto valor da transmitância térmica da cobertura ($2,38 \text{ W/m}^2\text{K}$). Para o sistema de iluminação, a classificação foi “C” e está vinculada ao atendimento ou não dos pré-requisitos para o sistema. Para o sistema de condicionamento de ar, a classificação foi “C” em função da etiquetagem dos equipamentos. Como medida de eficiência energética para melhoria desses sistemas e obtenção da classificação “A” para a envoltória foi utilizada uma combinação de uma camada de 5cm de poliestireno estendido – EPS na laje de cobertura e a substituição da argamassa de acabamento por gesso projetado na parte interna da mesma laje, o que fez reduzir o valor da transmitância térmica para $0,59 \text{ W/m}^2\text{K}$. Para o sistema de iluminação, bastou apenas uma alteração do projeto luminotécnico, com a inclusão de um circuito independente para a linha de luminárias mais próximas das janelas para que a classificação desse sistema alcançasse o nível “A”. Já para o sistema de condicionamento de ar, a proposta é a compra de equipamentos cuja etiqueta de eficiência energética seja “A” e por consequência, o sistema terá esta mesma classificação. A autora avaliou, ainda, o custo de implantação das medidas propostas que resultaram num acréscimo de 1,5% no valor total da obra.

Queiroz, Silva e Rodrigues (2019) analisaram o atendimento ao RTQ-C, quanto aos pré-requisitos da envoltória, de um prédio público universitário, destinado às salas dos professores, na Universidade Federal Rural do Semi-árido, localizada na cidade de Mossoró, RN, na zona bioclimática 7, por meio do método prescritivo. Primeiramente foram levantados os dados referentes à envoltória do prédio bem como o atendimento aos pré-requisitos iluminação zenital, absorvância e transmitância de acordo com os valores estabelecidos para a zona climática que o edifício está inserido. Para o pré-requisito absorvância das paredes externas, foi levantada a área e a sua cor, a fim de se calcular a média ponderada. O valor médio ponderado encontrado para a absorvância foi de $\alpha = 0,34$, valor menor que o estabelecido pelo regulamento ($\alpha \leq 0,5$). Para a transmitância das paredes externas foi levantado o valor de $3,12 \text{ W/m}^2\text{K}$. Esse valor está de acordo com os índices estabelecidos para a transmitância térmica para paredes com capacidade térmica superior a $80\text{kJ/m}^2\text{K}$ ($3,7 \text{ W/m}^2\text{K}$). Num segundo momento levantou-se os dados referentes ao sistema de cobertura com absorvância de $\alpha = 0,61$ e transmitância de $1,79 \text{ W/m}^2\text{K}$. Ambos os valores excedem os limites máximos aceitos pelo regulamento para ambientes condicionados artificialmente ($\alpha = 0,5$ e $1,00 \text{ W/m}^2\text{K}$, respectivamente). Os autores concluíram que, mediante as diretrizes estabelecidas para a zona estudada, somente a cobertura não atendeu aos parâmetros do regulamento, possivelmente pela forma do edifício, predominantemente horizontal, o que torna a cobertura uma das principais fontes de carga térmica proveniente da radiação solar. Por fim, sugerem a adoção de cores mais claras no telhado ou o uso de telhados verdes.

2.9 INI-C

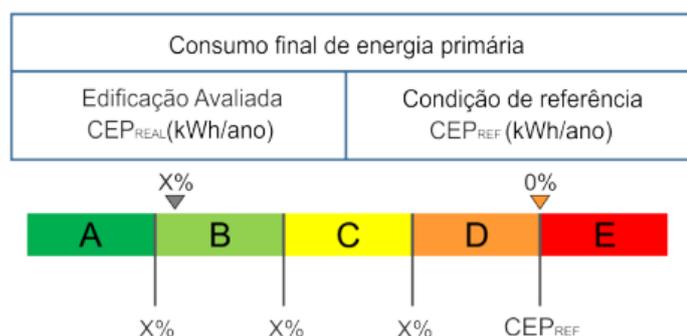
A partir das limitações apresentadas pelo RTQ-C o PROCEL e o Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações – CB3E desenvolveram um novo método de avaliação do nível de eficiência energética de edificações comerciais, de serviços e públicas com base no consumo estimado de energia primária, ou seja, é a energia disponível na natureza e não submetida a nenhum processo de conversão ou transformação, como a contida nos combustíveis ainda brutos (primários) podendo ser provenientes de fontes primárias renováveis ou não renováveis. Esta

energia quando não utilizada diretamente, pode ser transformada em fontes de energia secundárias como a eletricidade ou calor (CB3E, 2017).

No ano de 2021, esse novo método de avaliação passa ao status de Instrução Normativa por meio da publicação da Portaria nº 42 que aprova a Instrução Normativa Inmetro para a classificação de eficiência energética de edificações Comerciais, de Serviços e Públicas – INI-C. Essa Instrução aperfeiçoa os requisitos técnicos da qualidade para o nível de eficiência energética de edifícios comerciais, de serviços e públicos (RTQ-C) e especifica novos critérios e métodos para a classificação de edificações comerciais, de serviços e públicas quanto à sua eficiência energética. A partir de fevereiro de 2023, a ENCE de projeto para edificações comerciais, de serviços e públicas novas e a ENCE de edificação construída para edificações existentes somente serão emitidas com base na INI-C. São avaliados os sistemas de envoltória, iluminação, condicionamento de ar e aquecimento de água.

Nesse método são comparados os dados de uma edificação real, levantados através de projetos, com os valores do modelo de referência, por meio de um metamodelo baseado em redes neurais artificiais - RNA. A classificação da eficiência energética das edificações para a obtenção da ENCE é efetivada por meio do percentual de redução do consumo estimado de energia primária, comparando-se a edificação real com a edificação em sua condição de referência, equivalente à classificação “D”. Como resultado do processamento dos dados, obtém-se a estimativa do consumo de energia elétrica de cada sistema avaliado com sua respectiva escala de eficiência energética, podendo receber as classes de “A” para o mais eficiente e “E” para o menos eficiente. Desta forma é possível comparar o consumo energético da edificação avaliada de forma quantitativa.

Figura 12 – Escala para classificação do nível de eficiência da envoltória.



Fonte: CB3E, 2017.

A avaliação da eficiência energética pode ser feita por dois métodos distintos: o simplificado e o de simulação computacional.

Para a utilização do método simplificado na envoltória faz-se necessário, primeiramente, verificar sua aplicabilidade pois ele é restrito a edificações que tenham os seus parâmetros construtivos compreendidos entre os intervalos apresentados no item 6.1 da INI-C conforme Tabela 8.

Tabela 8 – Limites dos parâmetros de avaliação da envoltória atendidos pelo método simplificado.

Parâmetros	Limites (unidade) Valor mínimo	Limites (unidade) Valor máximo
Absortância solar da cobertura (α_{cob})	0,2	0,8
Absortância solar das paredes externas (α_{par})	0,2	0,8
Ângulo de obstrução vizinha (AOV)	0°	80°
Ângulo horizontal de sombreamento (AHS)	0°	80°
Ângulo vertical de sombreamento (AVS)	0°	90°
Capacidade térmica da cobertura (CTcob)	0,22 kJ/(m ² .K)	450 kJ/(m ² .K)
Capacidade térmica das paredes externas (CTpar)	0,22 kJ/(m ² .K)	450 kJ/(m ² .K)
Densidade de potência de equipamentos (DPE)	4 W/m ²	40 W/m ²
Densidade de potência de iluminação (DPI)	4 W/m ²	40 W/m ²
Fator solar do vidro (FS)	0,21	0,87
Pé-direito (PD)	2,6 m	6,6 m
Percentual de área de abertura na fachada (PAF)	0%	80%
Transmitância térmica da cobertura (Ucob)	0,51 W/(m ² .K)	5,07 W/(m ² .K)
Transmitância térmica da parede externa (Upar)	0,50 W/(m ² .K)	4,40 W/(m ² .K)
Transmitância térmica do vidro (Uvid)	1,9 W/m ²	5,7 W/m ²

Fonte: INMETRO, 2021.

Para a avaliação de edificações ventiladas naturalmente ou híbridas deve-se utilizar uma interface específica denominada *Natural Comfort*, baseada no metamodelo proposto por Rackes et al. (2016) e disponível em: <http://pbedifica.com.br/naturalcomfort>. Contudo, a aplicação deste método está restrita às edificações escolares e de escritório desse que tenham geometria quadrada ou retangular, possuam espaços internos com divisão e metragem quadrada similares e aberturas para ventilação em todas as áreas de permanência prolongada.

2.9.1 Procedimentos para a determinação da classificação de eficiência energética da envoltória pelo método simplificado da INI-C

A classificação da envoltória é dada a partir do percentual de redução da carga térmica total anual da edificação real em comparação com a mesma edificação em sua condição de referência (RedCgTT). Para elaborar a escala, primeiramente calcula-se o fator forma (FF) da edificação e com a ajuda de tabelas de referência presentes na INI-C e em seguida obtém-se o coeficiente de redução de carga térmica total anual da classificação “D” para a “A” (CRCgTT_{D-A}) considerando o grupo climático (GC) que a edificação pertence e o seu tipo. A escala relativa à classificação da eficiência energética da envoltória é construída definindo-se o intervalo (i) a partir da carga térmica total anual da edificação em sua condição de referência (CgTT_{ref}) e do coeficiente de redução da carga térmica total anual da classificação “D” para a “A” (CRCgTT_{D-A}) conforme Equação 9. A classificação final será “E” caso a carga térmica total anual da edificação real seja superior à condição de referência.

(9)

$$i = (CgTT_{ref} \cdot CRCgTT_{D-A}) / 3$$

Onde:

i é o coeficiente que representa os intervalos entre as classes;

CgTT_{ref} é a carga térmica total da edificação em sua condição de referência (kWh/ano);

CRCgTT_{D-A} é o coeficiente de redução de carga térmica total anual da classificação “D” para a “A”.

Quadro 5 – Limites dos intervalos das classificações de eficiência da envoltória

Classificação da eficiência	A	B	C	D	E
Limite superior	-	> CgTT _{ref} – 3i	> CgTT _{ref} – 2i	> CgTT _{ref} – i	> CgTT _{ref}
Limite inferior	≤ CgTT _{ref} – 3i	≤ CgTT _{ref} – 2i	≤ CgTT _{ref} – i	≤ CgTT _{ref}	-

Fonte: INMETRO, 2021. Adaptado pelo autor.

2.9.2 Estudos que envolveram a aplicação do método simplificado da INI-C

Rodrigues (2020) analisou a aplicabilidade da INI-C em comparação com o RTQ-C para um edifício público universitário – Edifício CAD 1, da Universidade Federal de Minas Gerais, localizado na cidade de Belo Horizonte. A autora realizou um extenso trabalho bibliográfico mapeando as principais considerações e limitações apresentadas pelo método prescritivo do RTQ-C. Analisou, também, se a INI-C atua nas principais limitações observadas e como as resolve. Os procedimentos para a determinação do nível de eficiência energética da edificação seguiram os métodos prescritivo e simplificado conforme apresentados pelos regulamentos estudados e obtiveram a mesma classificação para os sistemas envoltória – “A” e condicionamento de ar considerando equipamentos etiquetados – “B” e não apresentou diferenças significativas para o sistema de iluminação – “C”. De forma geral a escala de eficiência energética do edifício estudado alcançou a Classe “B”. A determinação da classe energética pelo RTQ-C é realizada por meio de uma equação e os sistemas recebem pesos. Já na avaliação pela INI-C a classificação é feita considerando o consumo individual de cada sistema avaliado podendo se determinar qual dos sistemas demanda mais energia e utilizar esta informação para a tomada de decisões quanto a possíveis ajustes no projeto ou em suas variáveis. Para a realização dessas análises, a autora levou um tempo 41% maior na aplicação da INI-C em relação ao método de avaliação do RTQ-C. Ela destaca que a interface web disponibilizada para a avaliação do método simplificado da INI-C não possuía, à época, salvamento dos dados inseridos nem dos resultados, o que gera retrabalho e possivelmente contribuiu para o acréscimo de tempo da análise pois, se quisesse analisar uma situação distinta, por meio da alteração de uma ou outra variável, não seria necessária a inserção dos dados novamente. Foi identificada uma discrepância quanto o consumo real da edificação e o consumo previsto pela INI-C possivelmente pelo fato do método considerar a edificação em pleno funcionamento, durante todo o tempo informado, contudo, não é o que ocorre de fato com a edificação em seu dia a dia. Por fim, a autora enumera as principais mudanças ocorridas entre os dois métodos de avaliação apontando o sistema de envoltórias como o que mais sofreu modificações. Para a avaliação deste sistema o metamodelo passou a ser dividido em diferentes zonas térmicas, cada qual com seus próprios parâmetros, ao contrário da utilização de valores ponderados como ocorria

com o método de avaliação do RTQ-C. A diferenciação da edificação por tipos (escritórios, educacionais, hospedagem, hospitalar e comercial) trouxe maior representatividade ao modelo analisado uma vez que o regulamento apresenta informações singulares para cada um destes tipos como a densidade de potência de equipamentos e de iluminação, número de horas e dias de ocupação e outras características próprias de cada tipo. O fato das redes neurais presentes no metamodelo calcularem a carga térmica anual gerada por cada uma das diferentes propriedades termo físicas da edificação impossibilitando que o modelo seja penalizado pelo aumento de valor de uma variável que não gera consumo energético significativo, dispensando, assim, os controversos pré-requisitos específicos para cada sistema cuja ausência levava a penalização da classificação final do prédio. O entorno da edificação e o clima onde ela se localiza ganham maior relevância por meio da variável do ângulo de obstrução vizinha e, também, dos novos grupos climáticos, ao número de 24, tendo substituídos as 8 zonas bioclimáticas utilizadas anteriormente.

Pimentel e Barbosa (2020) compararam os resultados da etiquetagem geral de um pavilhão administrativo localizado no grupo climático 10, cidade de campo Grande, MS, pertencente ao Exército Brasileiro, por meio da INI-C e do RTQ-C. Foram analisados os sistemas de envoltória, iluminação, condicionamento de ar e aquecimento de água. Os autores destacam que este último sistema entrava apenas como bonificação no método do RTQ-C. Foram calculadas a carga térmica de resfriamento e os consumos de energia elétrica dos sistemas de condicionamento de ar, de iluminação, de equipamentos e de aquecimento de água para a condição real e para a condição de referência. As ENCE's obtidas foram semelhantes para os dois métodos utilizados alcançando-se a Classe "A" para a etiqueta geral de projeto. Segundo os autores, o método simplificado da INI-C é mais completo que o prescritivo do RTQ-C por trazer o cálculo da carga térmica anual de resfriamento e o consumo energético estimado da edificação enquanto o método mais antigo trazia apenas índices de consumo.

Leite e Hackenberg (2020), por sua vez, compararam as classificações obtidas pela avaliação parcial da envoltória de um prédio público que abriga a Subprefeitura Sudeste da cidade de Joinville – SC em relação aos métodos prescritivo do RTQ-C e simplificado da INI-C. A avaliação pelo RTQ-C considerou a inserção do edifício na Zona Bioclimática 05 bem como as suas características

físicas. A avaliação pela INI-C considerou o tipo “escritórios” e seus valores de referência para a construção do metamodelo de referência e suas características para a construção do metamodelo correspondente ao edifício real e para tanto, foram criadas 8 zonas térmicas e levantados os dados de desempenho dos materiais e variáveis da edificação. Os resultados encontrados foram diferentes para cada método sendo que a edificação recebeu Classe C pelo RTQ-C ao passo que pelo INI-C, recebeu a Classe B. Segundos as autoras, a justificativa para essa diferença pode apontar para o maior detalhamento de informações necessárias para o uso do segundo método que precisa de mais informações e parâmetros de entrada para sua avaliação.

Pimentel, et al (2021) compararam os resultados obtidos da aplicação dos métodos simplificado e de simulação da INI-C em um edifício público na cidade de Campo Grande, MS por meio da incorporação de diferentes cenários com vistas a subsidiar a escolha pela aplicação de um ou outro método para a avaliação energética de outras edificações. Foram utilizados o metamodelo baseado em RNA do CB3E (2022) para o método simplificado e os softwares *EnergyPlus* e *DesingBuilder* para o método de simulação computacional com o uso de arquivos climáticos SWERA e INMET 2016 e dois tipos de objetos de modelagem do sistema de condicionamento de ar, PTAC e o *IdealLoads*, obtendo-se resultados de consumo energético, carga térmica anual e etiqueta geral de projeto. Os resultados obtidos pelo *EnergyPlus* e pelo *DesingBuilder* para a simulação da envoltória apontaram para uma diferença média de 2,39%, por conta de pequenas distinções no processo de modelagem de cada zona térmica da edificação. Para o *EnergyPlus* foram modeladas versões no *SketchUp* e no *OpenStudio* enquanto que para o *DesingBuilder* toda a envoltória foi modelada primeiramente e as zonas térmicas depois. Para a simulação computacional do sistema de iluminação e dos equipamentos foi utilizado o valor absoluto da potência instalada para cada zona, embora tenham sido identificadas diferenças de consumo energético desses sistemas em relação aos obtidos pelo método simplificado. Quanto ao sistema de condicionamento de ar foi observada uma diferença média de 3,65% entre os métodos simplificado e de simulação com o uso do PTAC e de 4,25% com o uso do *IdealLoads*. Os autores concluíram que os resultados obtidos dos métodos simplificado e de simulação computacional, embora apresentem variações, foram considerados compatíveis, podendo ambos ser aplicados sem diferenças

significativas. O cenário que gerou a menor diferença entre os métodos, média de 1,37%, foi com o uso do objeto PTAC de condicionamento de ar e o arquivo climático SWERA. Por outro lado, o cenário que gerou a maior diferença entre os métodos avaliados, média de 9,82%, foi com o uso do objeto PTAC e o arquivo climático INMET 2016. Apesar dessa diferença entre os cenários, a classificação energética da edificação não foi modificada, obtendo-se para todas as avaliações, a Classe “A” da etiqueta, com média de 58,08% de economia do edifício em relação a condição de referência.

3 MÉTODO

O capítulo trata do método a serem utilizados para se alcançar os objetivos propostos para este trabalho com a descrição do delineamento da pesquisa, a caracterização do edifício avaliado e os procedimentos que foram utilizados para a classificação do nível de eficiência energética do objeto de estudo.

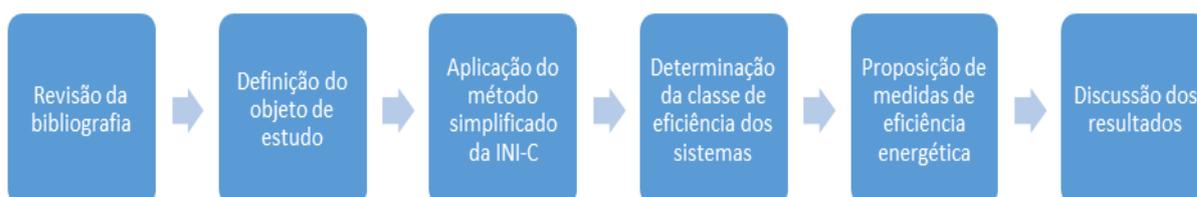
3.1 Delineamento da Pesquisa

Trata-se de uma pesquisa aplicada, de natureza quantitativa e procedimentos que a caracterizam como um estudo de caso, com simulação, para avaliação da classificação de eficiência energética da envoltória de uma edificação pública, por meio do método simplificado, proposto pela INI-C.

A pesquisa realizada pode ser considerada aplicada pois envolve a aplicação prática da ciência, por meio de conhecimentos e técnicas acumuladas de pesquisas acadêmicas para um propósito específico de se encontrar soluções para problemas cotidianos. Ela é de natureza quantitativa pois aponta o comportamento da edificação, codificado de forma numérica. A pesquisa caracteriza-se como um estudo de caso uma vez que foi trabalhada uma unidade de análise, no caso, um metamodelo adaptado e desenvolvido tendo como base os parâmetros construtivos empregados nos prédios da UNIFAL-MG.

Para Gil (2002), este método consiste no estudo aprofundado de um ou poucos objetos, de maneira a permitir seu amplo e detalhado conhecimento. Por sua vez, Yin (2001) considera o estudo de caso como um método de pesquisa abrangente, pois comporta o uso de casos únicos ou múltiplos, além de abordagens qualitativas ou quantitativas.

Figura 13 – Fluxograma de aplicação do método.

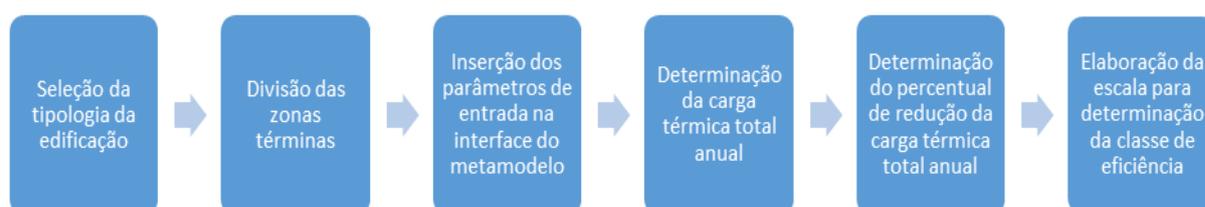


Fonte: Autor, 2022.

3.2 Aplicação do Método Simplificado da INI-C para classificação da eficiência energética da envoltória

Segundo a INI-C, os critérios para a avaliação da eficiência energética da envoltória devem obedecer às etapas apresentadas na Figura 14.

Figura 14 – Fluxograma das etapas de avaliação da envoltória para edificações condicionadas artificialmente.



Fonte: Autor, 2022.

A definição do tipo da edificação é feita a partir de tabelas constantes do Anexo A da Portaria INMETRO nº 42/2021 (INMETRO, 2021), que determinam os parâmetros a serem empregados para a construção do metamodelo de referência. Os tipos de edificações comerciais, de serviços e públicas constantes da INI-C são:

- a) Edificações de escritório;
- b) Edificações educacionais: ensino médio, fundamental e superior;
- c) Edificações de hospedagem: pequenas, médias e grandes;
- d) Edificações assistenciais de saúde, exceto hospitais;
- e) Edificações de varejo: lojas, lojas de departamento e shopping center;
- f) Edificações de varejo: mercados; e
- g) Edificações de alimentação: restaurantes e praças de alimentação.

Para este estudo utilizou-se os valores de referência para edificações educacionais.

Primeiramente a edificação avaliada deve atender aos critérios definidos na Tabela 8. Atendidos esses critérios, passa-se à avaliação das duas condições: sua condição real (metamodelo base), com suas características reais; e a sua condição de referência, com as características listadas na Tabela 9.

Tabela 9 – Valores de referência para edificações educacionais.

Parâmetros	Condições de referência para edificações educacionais do ensino superior
Geometria	
Área (m ²)	Condição real
Orientação solar	Condição real
Pé-direito (piso a teto) (m)	Condição real
Aberturas	
PAF – Percentual de área de abertura da fachada (%)	40 (0,40)
Componentes construtivos	
Argamassa interna (2,5cm), bloco cerâmico furado (9cm), argamassa externa (2,5cm)	
Parede	
U _{par} – Transmitância da parede externa (W/m ² K)	2,39
α _{PAR} – Absortância da parede (adimensional)	0,5
CT _{par} – Capacidade térmica da parede externa (KJ/m ² K)	150
Telha de fibrocimento, câmara de ar (>5cm) e laje maciça de concreto (10cm)	
Cobertura	
U _{cob} – Transmitância da cobertura (W/m ² K)	2,06
α _{COB} – Absortância da cobertura (adimensional)	0,8
CT _{cob} – Capacidade térmica da cobertura (KJ/m ² K)	233
Vidro	
Vidro simples incolor 6mm	
FS – Fator solar do vidro (adimensional)	0,82
U _{vid} – Transmitância térmica do vidro (W/m ² K)	5,7
AHS – Ângulo horizontal de sombreamento (°)	0
AVS – Ângulo vertical de sombreamento (°)	0
AOV – Ângulo de obstrução da vizinhança (°)	0
Iluminação e ganhos	
DPI – Densidade de potência de iluminação (W/m ²)	15,5
DPE – Densidade de potência de equipamentos (W/m ²)	Condição real
Ocupação (m ² /pessoa)	1,5
Horas de ocupação (h)	8
Dias de ocupação (ano)	200
Situação do piso	Condição real
Situação da cobertura	Condição real
Isolamento do piso	Sem isolamento

Fonte: INMETRO, 2021. Adaptado pelo autor.

Algumas condições devem ser observadas como no caso de a edificação constituir-se de um único bloco, porém com dois ou mais tipos contidos nele: a avaliação deve ser realizada separadamente para cada tipo, e no caso de a edificação ser constituída por vários blocos conectados: a avaliação deve ser realizada para cada bloco deve ser analisado separadamente, o que gerará uma ENCE para cada um dos blocos.

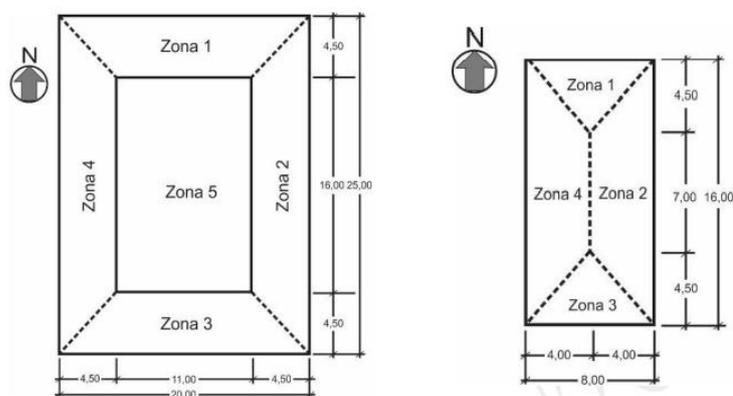
As zonas térmicas devem ser separadas de acordo com:

- Tipo da edificação;
- Tipo e/ou especificações técnicas do sistema de condicionamento de ar;
- Pé-direito da edificação;
- Espaços com pisos em contato com o solo ou em contato com o exterior;
- Espaços com cobertura em contato com o exterior.

Para edificações com áreas de permanência prolongadas 100% condicionadas, como é o caso em estudo, as áreas de permanência transitórias não condicionadas devem ser desconsideradas da avaliação.

As zonas térmicas devem ser separadas considerando as áreas perimetrais da edificação e as áreas internas sendo as áreas perimetrais limitadas em espaços de 4,50 m de profundidade em relação à face da parede externa. A área térmica abrange todos os ambientes internos relacionados com a orientação geográfica da parede externa em questão, não sendo necessário descontar das áreas de paredes internas. Para edificações cuja largura ou comprimento for inferior a 9,00 m, têm-se apenas zonas perimetrais. A Figura 15 ilustra as possíveis situações de separação das zonas térmicas.

Figura 15 – Processo de separação das zonas térmicas segundo a INI-C



Fonte: INMETRO, 2021.

Os parâmetros de entrada se referem às propriedades térmicas e geométricas da envoltória e devem ser calculadas conforme orienta a NBR 15200. Esses parâmetros devem ser referentes à cada zona térmica de análise e são:

- a) Área da zona térmica (m^2);
- b) Tipo de zona térmica (perimetral ou interna);
- c) Se existe contato com o solo (sim – se houver contato; não – se não houver contato, como nos casos de pilotis ou balanços);
- d) Se a cobertura é voltada para o exterior (sim/não);
- e) Existência de isolamento térmico no piso (sim – se houver isolamento e a espessura for > 5 mm; não – se não houver isolamento ou se a espessura do isolante for < 5 mm);
- f) Orientação solar (N, NE, L, SE, S, SO, O e NO) seguindo a orientação da Figura 15;
- g) Horas de ocupação por dia (horas) – valor definido conforme o tipo;
- h) Densidade de potência de equipamento (W/m^2);
- i) Densidade de potência de iluminação (W/m^2) ou densidade de potência em uso;
- j) Percentual de área de abertura de fachada;
- k) Fator solar do vidro;
- l) Transmitância térmica do vidro, cobertura e paredes externas (W/m^2K);
- m) Absortância solar da cobertura e das paredes externas (W/m^2K);
- n) Pé-direito do pavimento (m);
- o) Ângulos de sombreamento: ângulo horizontal de sombreamento (AHS), ângulo vertical de sombreamento (AVS) e ângulo de obstrução vizinha (AOV) e;
- p) Capacidade térmica da cobertura e das paredes externas (kJ/m^2K).

A densidade de potência de equipamento (DPE) deve ser adotada conforme o tipo da edificação ou definida conforme valores de projeto ou por levantamento físico e em cada ambiente da edificação a ser avaliada. Assumindo-se que o edifício não possui projeto com a especificação dos equipamentos, memorial de cálculo ou declaração de responsabilidade técnica, deve-se adotar o valor definido para o tipo. Definido esse valor, ele deverá ser igual para a condição real e a condição de referência.

A densidade de potência de iluminação (DPI) deve ser definida conforme o projeto elétrico ou por levantamento físico nas áreas avaliadas e é calculada pela divisão da potência de iluminação instalada pela área da zona térmica.

A absorvância solar a ser considerada para cada zona térmica deve ser definida por meio de um valor médio referente às absorvâncias de cada parcela das paredes externas, ou cobertura, ponderadas pelas áreas que ocupam devendo-se utilizar os valores da NBR 15200 (ABNT, 2013) ou conforme o Anexo V do RAC (INMETRO, 2021), ou ainda aqueles fornecidos pelos fabricantes.

Os ângulos de sombreamento horizontal e vertical (AHS e AVS) devem ser definidos por meio da ponderação do ângulo em função da área de abertura de cada zona térmica a ser analisada. O ângulo horizontal de sombreamento deve ser calculado como a média entre os dois ângulos encontrados para cada abertura e no caso de zonas com mais de uma abertura, esses ângulos devem ser calculados para cada abertura e depois ponderados pela área total das aberturas. O autossombreamento deve ser considerado para a edificação em sua condição real e os ângulos de sombreamento superiores a 10° formados pelo recuo da abertura na parede devem ser considerados.

A determinação da estimativa da carga térmica total anual da envoltória ($C_{gTT_{real}}$) é feita com base no metamodelo de análise que utiliza redes neurais artificiais para as diferentes realidades climáticas brasileiras. Os valores definidos para cada um dos parâmetros de entrada e para cada zona térmica de análise, devem ser inseridos na interface do metamodelo. A interface do metamodelo está disponível em: http://pbeedifica.com.br/redes/comercial/index_with_angular.html#. Os dados de entrada deverão ser inseridos tanto para a condição real quanto para a condição de referência. Os dados de saída da interface correspondem à estimativa da carga térmica total anual da envoltória para cada zona térmica avaliada.

Para a definição do grupo climático deverá ser consultada a Tabela constante do Anexo G da INI-C. Nessa tabela estão listados 154 municípios brasileiros. Caso o município buscado não esteja na tabela, deverá ser consultada lista disponível em: http://www.pbeedifica.com.br/sites/default/files/all5564_with_subgroups_interface_2018.csv.

Figura 16 – Interface do metamodelo web para estimativa da carga térmica total anual.

	Zona 1		Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5
		Copiar?				
Área ^{m²} ?	<input type="text"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Contato com o solo? ?	<input type="text"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Zona sobre pilotis? ?	<input type="text"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Possui cobertura exposta? ?	<input type="text"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Possui isolamento do piso? ?	<input type="text"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Tipo de zona? ?	<input type="text"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Orientação solar ?	<input type="text"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Densidade de potência de equipamentos (W/m²) ?	<input type="text"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Densidade de potência de iluminação (W/m²) ?	<input type="text"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Fator Solar do vidro ?	<input type="text"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Transmitância térmica do vidro (W/m²K) ?	<input type="text"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Absortância solar de cobertura ?	<input type="text"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Absortância solar da parede ?	<input type="text"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Pé-direito (m) ?	<input type="text"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Fonte: PBE-Edifica, 2022.

A determinação do percentual de redução da carga térmica total anual da envoltória (RedCgTT) é dado a partir dos valores de carga térmica total anual da envoltória para a edificação em sua condição real ($CgTT_{real}$) e sua condição de referência ($CgTT_{ref}$) conforme a Equação 10.

(10)

$$RedCGTT = ((CgTT_{ref} - CgTT_{real}) / CgTT_{ref}) \cdot 100\%$$

Onde:

RedCGTT é a carga térmica total anual da edificação real;

$CgTT_{ref}$ é a carga térmica total anual da envoltória da edificação na sua condição de referência (kW/ano); e

$CgTT_{real}$ é a carga térmica total anual da edificação real (kWh/ano).

A classificação da envoltória é dada a partir do percentual de redução da carga térmica total anual da edificação real em comparação com a mesma edificação em sua condição de referência (RedCgTT). Para elaborar a escala, primeiramente calcula-se o fator forma (FF) da edificação que é dado pela relação entre a área da envolvente pela área total da edificação e, com a ajuda de tabelas

de referência presentes na INI-C, obtém-se o coeficiente de redução de carga térmica total anual da classificação “D” para a “A” ($CRCgTT_{D-A}$) considerando o grupo climático (GC) que a edificação pertence e o seu tipo. A escala relativa à classificação da eficiência energética da envoltória é construída definindo-se o intervalo (i) a partir da carga térmica total anual da edificação em sua condição de referência ($CgTT_{ref}$) e do coeficiente de redução da carga térmica total anual da classificação “D” para a “A” ($CRCgTT_{D-A}$) conforme Equação 9. A classificação final será “E” caso a carga térmica total anual da edificação real seja superior à condição de referência.

3.3 Estratégias para a Melhoria da Eficiência Energética

Como ações para a redução da carga térmica total anual da envoltória foram avaliadas 15 estratégias para a melhoria da eficiência energética relacionadas com aspectos e materiais construtivos referentes ao envidraçamento das aberturas, cobertura, paredes externas e elementos de sombreamento vertical, somando-se 9 parâmetros a serem avaliados: fator solar do vidro (FS), transmitância térmica do vidro (U_{vid}), transmitância térmica da cobertura (U_{cob}), capacidade térmica da cobertura (CT_{cob}), absorptância solar da cobertura (α_{cob}), transmitância térmica da parede externa (U_{par}), capacidade térmica da parede externa (CT_{par}), absorptância solar da parede externa (α_{par}) e ângulo vertical de sombreamento.

As propriedades consideradas para as estratégias de melhoria da eficiência energética estão descritas na Tabela 10 e foram baseadas nas informações do Anexo V da Portaria INMETRO nº 50/2013 e na página eletrônica <http://projeteee.mma.gov.br/componentes-construtivos/>. Os parâmetros avaliados se enquadram nos limites estipulados pelo método simplificado para avaliação da envoltória como apresentado na Tabela 8.

As medidas avaliadas foram escolhidas considerando a edificação em uso, portanto não se avaliou elementos ou características que modifiquem a estrutura física da edificação. Os elementos propostos podem ser substituídos ou instalados, considerando o menor impacto no uso da edificação.

Tabela 10 – Parâmetros das estratégias de melhoria da eficiência energética.

Parâmetros
Envidraçamento das aberturas
Fator solar do vidro (FS)
Transmitância térmica do vidro (U_{vid})
Cobertura
Transmitância térmica da cobertura (U_{cob})
Capacidade térmica da cobertura (CT_{cob})
Absortância solar da cobertura (α_{cob})
Paredes
Transmitância térmica da parede (U_{par})
Capacidade térmica da parede (CT_{par})
Absortância solar da parede (α_{par})
Elemento de sombreamento
Ângulo de sombreamento vertical ($^\circ$)

Fonte: Autor, 2022.

4 ESTUDO DE CASO

Este capítulo apresenta o metamodelo que foi utilizado como estudo de caso para o desenvolvimento deste trabalho. Este metamodelo foi elaborado a partir das características e propriedades físicas usualmente adotados pela Unifal-MG em um edifício padrão, replicado nas cidades de Alfenas e Varginha, ambas localizadas na região Sul do Estado de Minas Gerais. O metamodelo serviu como referência para a avaliação da classificação da eficiência energética da envoltória segundo preconiza o método simplificado da INI-C e também para a avaliação das estratégias de melhoria da eficiência energética da envoltória.

Os edifícios que serviram como referência para a elaboração do metamodelo são o Prédio V, localizado no Campus Sede da Unifal-MG, na cidade de Alfenas, o Prédio B, localizado na Unidade Educacional Santa Clara, também na cidade de Alfenas e o Prédio D, localizado no Campus de Varginha, na cidade de Varginha (Figura 17). A seleção destes edifícios foi realizada por amostra não probabilística por julgamento, ou intencional, tendo sido consideradas sua importância na dinâmica dos *campi* da unidade educacional em que estão inseridos, o fato de serem a maior edificação com a maior área construída dentro da Universidade, por terem sido replicados e constituírem o protótipo arquitetônico mais difundido na Instituição e, também, por possuírem o formato retangular que se adequa aos critérios de avaliação estipulados pelo método simplificado da INI-C.

Figura 17 – Vista dos Prédios V, B e D dos *campi* da Unifal-MG.



Fonte: Autor, 2019.

A inserção climática dos 3 edifícios tomados como base para a elaboração do metamodelo é o grupo climático GC2 (Roriz, 2014). Vale ressaltar que o clima da região Sul do Estado de Minas Gerais é classificado, segundo os critérios de classificação climática de Köppen, como mesotérmico ou temperado quente, com seca no inverno e verão quente (Cwa) e chuvoso, fortemente influenciado pelo relevo, formado por muitas montanhas, o que contribui para a formação de microclimas (MARTINS *et al*, 2018), cujas altitudes das cidades de Alfenas, Poços de Caldas e Varginha são de 890, 1.200 metros e 980 metros sobre o nível do mar, respectivamente.

As edificações de referência apresentam o mesmo formato retangular (57,9 x 22,8 m), mas variam quanto ao número de pavimentos, de 3 a 4. Suas orientações geográficas também variam. Contam ainda com um pavimento técnico (volume), que abriga a casa de máquina do elevador e as caixas d'água. Cada pavimento tipo possui área livre de 1.320 m², e o volume possui área 22,8 m². O pé-direito é de 3,5 m, sendo igual para todos os pavimentos, em todas as edificações. O Prédio V está orientado no sentido Leste-Oeste, com as maiores fachadas orientadas para o Norte e para o Sul. Os Prédio B e D estão orientados no sentido Noroeste-Sudeste, com suas as maiores fachadas orientadas para o Sudoeste e Nordeste. Seus usos também diferem, mas no geral, contam com salas de aula e laboratórios de ensino, salas para professores, áreas administrativas, biblioteca, área de convivência e cantina. Em todos os casos, os prédios operam nos períodos matutino, vespertino e noturno, com atividades a partir das 07hs:00 da manhã até as 23hs:00.

Embora estejam localizados em *campi* diferentes, com entornos diferentes, suas fachadas não recebem influência significativa do sombreamento provocado por edificações vizinhas.

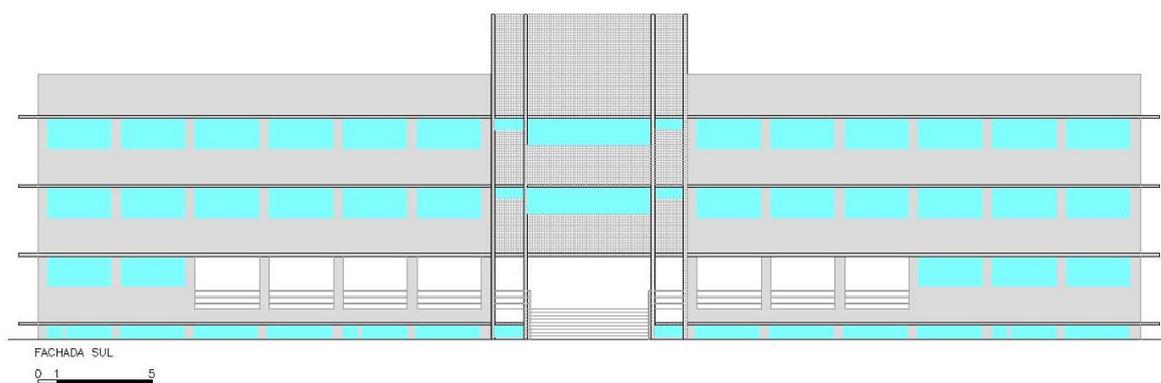
Figura 18 – Vista aérea do entorno dos Prédios V, B e D dos *campi* da Unifal-MG.



Fonte: Google Earth, 2022. Alterado pelo autor.

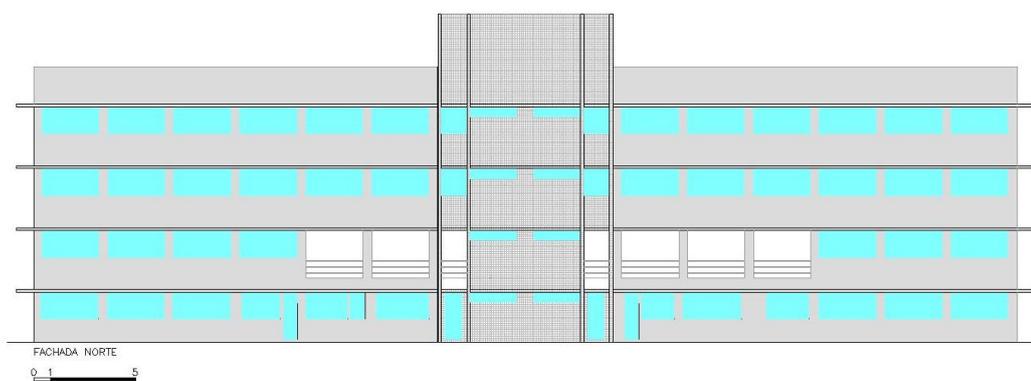
A estrutura do edifício base é de concreto armado, com fechamento externo em paredes de alvenaria de bloco cerâmico de 14x19x39cm revestidos externamente por argamassa de cimento e areia com 2,5cm de espessura e pintura e internamente revestida com argamassa de cimento e areia com 2,5cm de espessura e gesso projetado com 0,5cm de espessura. Apenas na parede do bloco central do edifício, onde estão localizados os banheiros, utilizou-se pastilha cerâmica como revestimento externo. A cobertura do edifício é composta por uma laje pré-moldada com enchimento em EPS e espessura total de 12cm e argamassa de revestimento com 2cm e telha de fibrocimento de 8mm de espessura. As janelas estão compostas por estrutura em alumínio na cor natural e vidros transparentes 4mm de espessura. Em todo o perímetro do edifício, existe uma marquise com 1,0m de largura, exceto na parte central das fachadas sul e norte, justamente onde estão os localizados os banheiros.

Figura 19 – Fachada frontal do edifício base com 4 pavimentos.



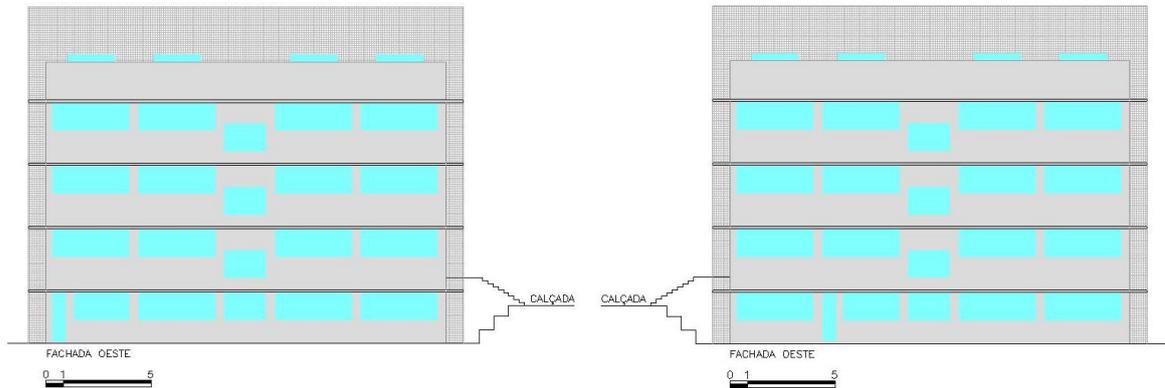
Fonte: Autor (2022).

Figura 20 – Fachada posterior do edifício base com 4 pavimentos.



Fonte: Autor (2022)

Figura 21 – Fachadas laterais do edifício base com 4 pavimentos.



Fonte: Autor (2022).

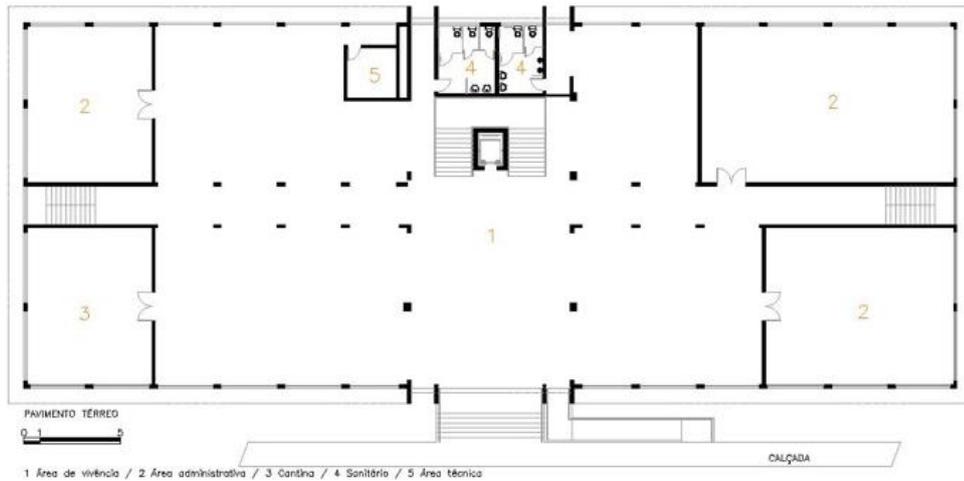
As imagens apresentadas correspondem ao projeto do Prédio V. O desenho das fachadas se repete nos demais edifícios embora o número de pavimentos seja três. Os ambientes internos de cada prédio apresentam variação na sua disposição embora sejam majoritariamente compostos por salas de aula e laboratórios didáticos.

Figura 22 – Planta baixa do pavimento inferior do Prédio V.



Fonte: Autor (2019).

Figura 23 – Planta baixa do pavimento térreo do Prédio V.



Fonte: Autor (2019).

Figura 24 – Planta baixa do primeiro pavimento do Prédio V.



Fonte: Autor (2019).

Figura 25 – Planta baixa do segundo pavimento do Prédio V.



Fonte: Autor (2019).

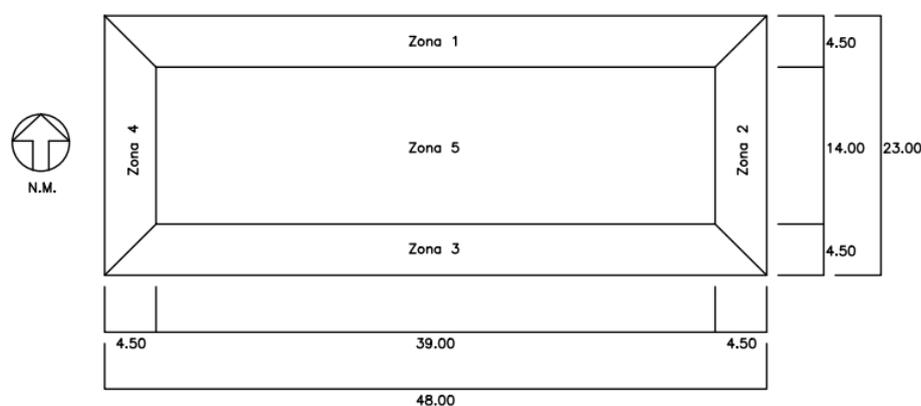
As imagens apresentadas correspondem ao projeto do Prédio V. A distribuição interna dos prédios respeita a disposição de salas e ambientes de permanência dispostos ao longo da edificação com circulação interna.

4.1 Elaboração do Metamodelo Base – Condição Real

O metamodelo base para a análise da condição real foi desenhado pelo autor a partir de um modelo arquitetônico, das características físicas e das propriedades térmicas levantadas para o tipo construtivo comumente adotada pela Unifal-MG, conforme edificado nos prédios “V”, da Sede, em Alfenas - MG, “B” da Unidade Educacional Santa Clara em Alfenas – MG e “D”, Campus de Varginha – MG. O modelo foi adaptado para a situação de edificação condicionada artificialmente, uma vez que as áreas de permanência prolongadas dos edifícios tomados como base são 100% condicionadas.

Neste caso em estudo, segundo a INI-C, as áreas de permanência transitórias e não condicionadas devem ser desconsideradas. Desta maneira foram formatadas 5 zonas climáticas por pavimento: Zona 1, Zona 2, Zona 3, Zona 4 perimetrais, correspondendo, respectivamente, às orientações Norte, Leste, Sul e Oeste e, também, Zona 5, interna, correspondendo ao núcleo central do modelo. A Figura 26 apresenta esquematicamente a separação das zonas térmicas do metamodelo.

Figura 26 – Divisão das zonas térmicas do metamodelo base.



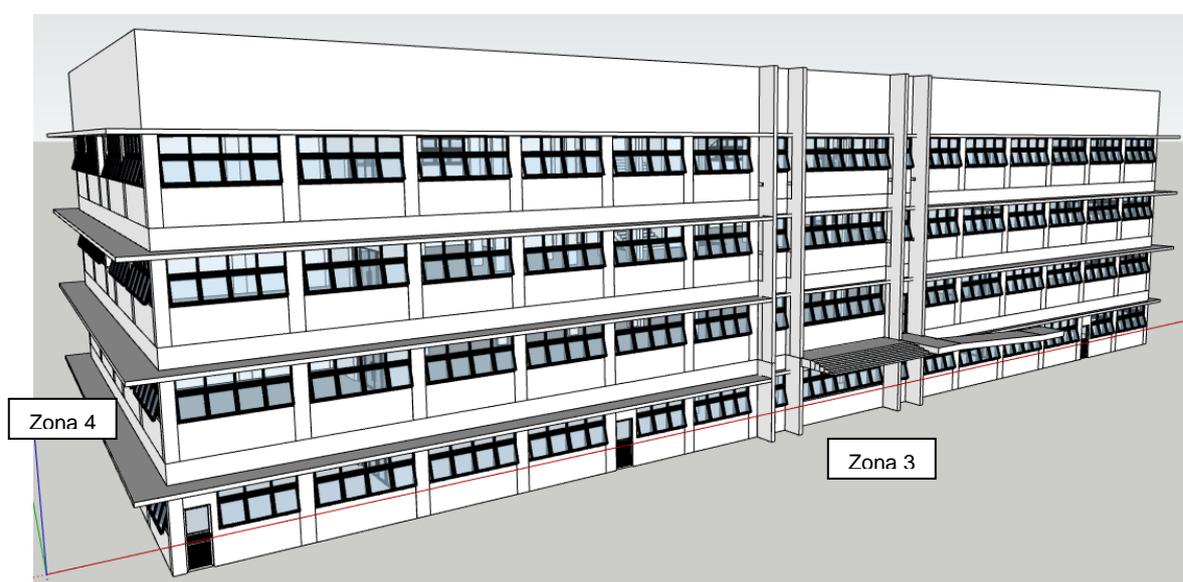
Fonte: Autor, 2022.

O metamodelo foi desenhado pelo autor com 4 pavimentos, sendo classificados como Pavimento Térreo, àquele em contato direto com o solo,

Pavimentos Intermediários, no caso em número de 2 e Pavimento Cobertura, àquele com a cobertura exposta ao ambiente externo. A interface do metamodelo computa os Pavimentos Intermediários tipo como um único grupo.

As propriedades térmicas da envoltória devem ser calculadas considerando a NBR 15.220 ou definidas conforme o Anexo V da Portaria INMETRO nº 50/2013 (INMETRO, 2013). Para esses cálculos pode ser utilizada a ferramenta *on line* disponível em: <http://projeteee.mma.gov.br/componentes-construtivos/>.

Figura 27 – Imagem do metamodelo base



Fonte: Autor, 2022.

Os parâmetros térmicos e geométricos utilizados na construção do metamodelo para a condição real se encontram, pormenorizados por pavimento e por zona térmica, nas Tabelas 21, 22 e 23 nos Anexos deste trabalho.

Tabela 11 – Parâmetros de entrada adotados para o metamodelo em sua condição real.

Parâmetros	Pavimento Térreo	Pavimento Intermediário (2)	Pavimento Cobertura
Pé-direito (piso a teto) (m)	3,5	3,5	3,5
PAF – Percentual de área de abertura da fachada (%)	0,37	0,37	0,37
Upar – Transmitância da parede externa (W/m ² K)	1,9	1,9	1,9
αPAR – Absortância da parede (adimensional)	0,38	0,38	0,38
CTpar – Capacidade térmica da parede externa (KJ/m ² K)	1,9	1,9	1,9
Ucob – Transmitância da cobertura (W/m ² K)	-	-	1,3
αCOB – Absortância da cobertura (adimensional)	-	-	0,8
CTcob – Capacidade térmica da cobertura (KJ/m ² K)	-	-	237,1
FS – Fator solar do vidro (adimensional)	0,82	0,82	0,82
Uvid – Transmitância térmica do vidro (W/m ² K)	5,7	5,7	5,7
AHS – Ângulo horizontal de sombreamento (°)	0	0	0
AVS – Ângulo vertical de sombreamento (°)	32	32	32
AOV – Ângulo de obstrução da vizinhança (°)	0	0	0
DPI – Densidade de potência de iluminação (W/m ²)	5,4	5,3	5,5
DPE – Densidade de potência de equipamentos (W/m ²)	15,0	15,0	15,0
Horas de ocupação (h)	8	8	8
Dias de ocupação (ano)	200	200	200

Fonte: Autor, 2022.

As estratégias para a melhoria da eficiência energética referentes ao envidraçamento das aberturas foram: VID1 – Vidro monolítico 6mm – Guardian Silver 32 clear; VID2 – Vidro monolítico 8mm – Cebrace Cool-Kite STB-420; VID3 – Vidro laminado 8mm (4+4) – Guardian SNL 37 clear e VID4 – Vidro monolítico 6mm – Cebrace Cool-Lite SKN144 II. As estratégias para a melhoria da eficiência energética referentes à cobertura foram: COB1 – Cobertura com pintura da telha cimentícia na cor branca; COB26 – Cobertura com telha sanduiche na cor metálica; COB3 – Cobertura com telha sanduiche na cor branca e COB4 - Cobertura com instalação de isolante térmico sob a telha cimentícia. As estratégias para a melhoria da eficiência energética referentes à parede externa foram: PAR1 – Parede externa com pintura na cor branca; PAR2 – Parede externa com placa cimentícia na cor natural; PAR3 – Parede externa com placa cimentícia na cor branca e PAR4 –

Parede externa com placa de alumínio composto na cor branca com isolamento térmico. As estratégias para a melhoria da eficiência energética referentes aos ângulos de sombreamento vertical foram: SOM1 – ângulo vertical de sombreamento a 35°; SOM2 – Ângulo vertical de sombreamento a 40° e SOM3 – Ângulo vertical de sombreamento a 45°.

Tabela 12 – Parâmetros das estratégias de melhoria da eficiência energética.

Parâmetros	Estratégias de melhoria da eficiência energética (E)			
Envidraçamento das aberturas	VID1	VID2	VID3	VID4
Fator solar do vidro (FS)	0,41	0,31	0,29	0,27
Transmitância térmica do vidro (Uvid)	5,2	5,2	5,67	3,22
Cobertura	COB1	COB2	COB3	COB4
Transmitância térmica da cobertura (Ucob)	1,3	0,51	0,51	0,6
Capacidade térmica da cobertura (CTcob)	237,1	233,8	233,8	239
Absortância solar da cobertura (α_{cob})	0,3	0,36	0,3	0,8
Paredes	PAR1	PAR2	PAR3	PAR4
Transmitância térmica da parede (Upar)	1,9	1,5	1,5	0,5
Capacidade térmica da parede (CTpar)	152,7	168,7	168,7	155,7
Absortância solar da parede (α_{par})	0,2	0,6	0,2	0,2
Elemento de sombreamento	SOM1	SOM2	SOM3	
Ângulo de sombreamento vertical (°)	35	40	45	

Fonte: Autor, 2022.

4.2 Resultados

4.2.1 Classificação da envoltória

Para a aplicação do método simplificado da INI-C, primeiramente, foi verificada a aplicabilidade das características físicas de entrada do metamodelo aos parâmetros limite de avaliação para o tipo edificação educacional, conforme demonstrado na Tabela 8. Todos os parâmetros aplicados ao metamodelo respeitam os limites estabelecidos.

Inseridos os dados das características físicas de entrada do metamodelo em sua condição de referência na interface web foram obtidos os valores correspondentes às cargas térmicas de cada pavimento da edificação e de cada zona térmica determinada, conforme apresentado na Tabela 13, tendo sido obtido o valor de 615.744,49 (kWh/ano) para a carga térmica total do edifício (C_{gTTref}) para a situação de referência.

Tabela 13 – Valores obtidos para a condição de referência.

	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Σ
Pavimento Térreo	23.704,38	7.781,12	20.339,57	7.441,39	31.695,98	90.962,44
Pavimentos Intermediários (x2)	37.643,78	12.176,49	31.566,64	11.605,74	87.670,47	180.663,12
Pavimento Cobertura	34.696,96	11.411,06	30.220,98	11.076,36	76.050,45	163.455,81
C_{gTTref}	615.744,49					

Fonte: autor, 2022.

De posse do valor da carga térmica total da edificação para a condição de referência, buscou-se o coeficiente de redução da carga térmica anual da classificação D para a A (CRC_{gTTD-A}) na sua respectiva tabela da INI-C, com base no fator de forma (FF) da edificação e do grupo climático correspondente.

Tabela 14 – Variáveis para a determinação da escala de eficiência energética da envoltória.

Grupo Climático	Fator Forma	CRC_{gTTD-A}	i
GC 2	0,277	0,26	53.364,52

Fonte: Autor, 2022.

Inseridos dados das características físicas de entrada do metamodelo em sua condição real na interface web foram obtidos os valores correspondentes às cargas térmicas de cada pavimento da edificação e de cada zona térmica determinada, conforme apresentado na Tabela 15, tendo sido obtido o valor de 451.431,93 (kWh/ano) para a carga térmica total do edifício (CgTTref) para a condição real.

Tabela 15 – Valores obtidos para a condição real.

Pavimento Térreo	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Σ Pav.
	16.110,02	5.478,10	14.550,68	5.323,13	23.141,70	64.603,63
Pavimentos Intermediários (x2)	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Σ Pav.
	25.821,72	8.738,67	23.096,99	8.476,26	68.340,59	134.474,23
Pavimento Cobertura	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Σ Pav.
	23.540,22	7.996,86	21.484,81	7.841,76	57.016,19	117.879,84
CgTTreal	451.431,93					

Fonte: Autor, 2022.

Com os dados das variáveis e os valores da carga térmica total anual da condição real, pôde-se definir os intervalos para cada classe de eficiência e, por fim, determinar qual a classificação do sistema de envoltória para a condição real. A classificação final alcançou o nível A de eficiência energética, conforme apresentado no Quadro 7. A diferença percentual da redução da carga térmica total anual da condição real para a condição de referência foi de 26,68%.

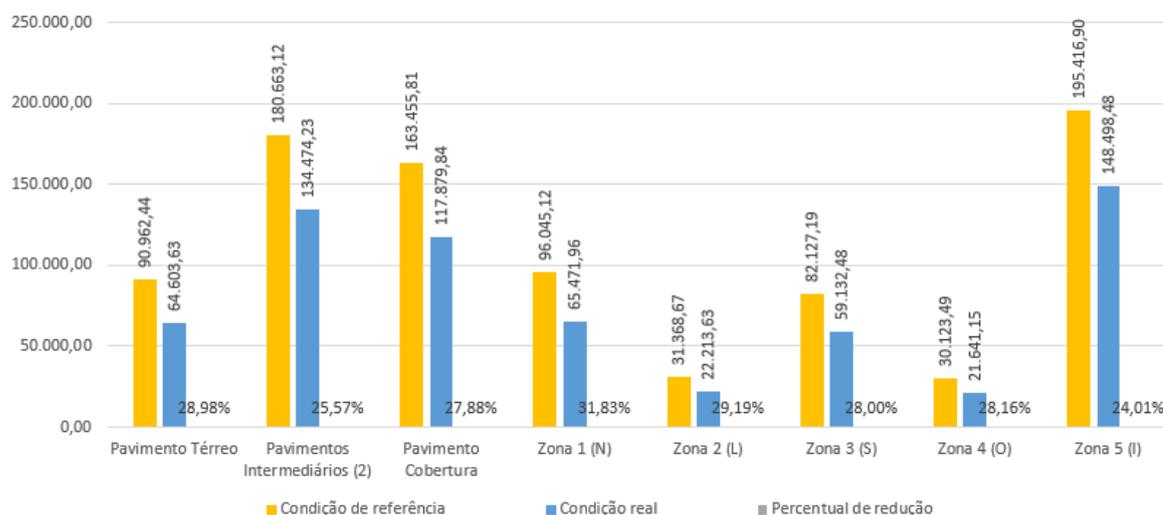
Quadro 6 – Limites dos intervalos dos níveis de eficiência e classificação final do sistema de envoltória pela INI-C.

Classificação da eficiência	A	B	C	D	E
Limite superior	-	> 455.650,92	> 509.015,45	> 562.379,97	> 615.744,49
Limite inferior	\leq 455.650,92	\leq 509.015,45	\leq 562.379,97	\leq 615.744,49	-
CgTTreal				451.431,93	
Classificação da envoltória				A	
Percentual de redução para a referência D				26,68%	

Fonte: Autor, 2022.

Os pavimentos com a carga térmica mais elevada foram os Pavimentos Intermediários, com valor, unitário, de 134.474,23 (kWh/ano). Cada pavimento alcançou percentualmente 29,78% do total de carga térmica do modelo. A interface web não traz a informação pormenorizada para cada Pavimento Intermediário, informando o mesmo valor para ambos. O Pavimento Cobertura alcançou o valor de 117.879,84 (kWh/ano), percentualmente 26,11% em comparação com o total da carga térmica do modelo e valor ligeiramente inferior aos anotados para os Pavimentos Intermediários. Vale ressaltar que o Pavimento Cobertura recebe uma grande incidência de radiação solar durante o dia. O Pavimento Térreo foi o que alcançou a menor carga térmica entre todos, com valor de 64.603,63 (kWh/ano), percentualmente 14,33% do total, possivelmente em função das perdas térmicas para o solo. A zona térmica com maior carga térmica é a Zona 1, com 65.471,96 (kWh/ano), voltada para o Norte o que favorece a maior incidência de radiação solar, seguida pela Zona 3, com 59.132,48 (kWh/ano), correspondente à localização junto a fachada sul. Estas são as fachadas de maior dimensão do metamodelo (48,0m), correspondendo a um pouco mais que o dobro do comprimento das fachadas leste e oeste (23,0m), respectivamente junto às Zonas 2 e 4, com 29.213,63 (kWh/ano) e 21.641,15 (kWh/ano), também, respectivamente. Estes valores são comparados, por local, no Gráfico 2.

Gráfico 1 –Valores obtidos da carga térmica anual para a condição de referência e para a condição real com respectivo percentual de redução, por local (kWh/ano).



Fonte: Autor, 2022.

Por sua vez, a redução da carga térmica dos pavimentos e das zonas climáticas, em comparação com a condição real, não aconteceu linearmente. Entre os pavimentos, o que obteve maior índice de redução foi o Pavimento Térreo, com 28,98%. Os Pavimentos Intermediários e Cobertura obtiveram índices de redução da carga térmica na casa dos 25,5% e 27,88%, respectivamente. A zona térmica com o maior índice de redução da carga térmica total foi a Zona 1, com valor de 31,83%, seguido da Zona 2, com 29,19%, da Zona 3 com 28,00%, da Zona 4 com 28,16% e, por fim da Zona 5 com 24,01%.

4.2.2 Resultado das estratégias de eficiência energética para a envoltória relacionadas ao envidraçamento das aberturas

A adoção de estratégias relacionadas ao envidraçamento das aberturas com baixo fator solar (FS) contribuiu para a redução da carga térmica da envoltória. A adoção de valores de transmitância térmica do vidro (Uvid) abaixo do valor da condição real ou mesmo próximo do valor da condição real indicam uma limitada influência desta propriedade nas cargas térmicas do modelo. A aplicação da VID1 - Vidro monolítico 6mm – Guardian Silver 32 *clear*, com FS de 0,41 e Uvid de 5,2 W/m²K reduziu a carga térmica do modelo em 8,15% em comparação com a condição real. A aplicação da VID2 - Vidro monolítico 8mm – Cebrace Cool-Kite STB-420, com FS 0,31 e Uvid de 5,2 W/m²K reduziu a carga térmica do modelo em 9,83% em comparação com a condição real. A aplicação da VID3 - Vidro laminado 8mm (4+4) – Guardian SNL 37 *clear*, com FS 0,29 e Uvid de 5,67 W/m²K reduziu a carga térmica do modelo em 9,88% em comparação com a condição real. Por sua vez, a aplicação da VID4 - Vidro monolítico 6mm – Cebrace Cool-Lite SKN144 II, com FS de 0,27 e Uvid de 3,22 W/m²K reduziu significativamente a carga térmica do modelo em 11,17% em comparação com a condição real. Embora todas as estratégias adotadas possuam fator solar baixo, a redução da E4 se destaca por se tratar de um produto de alta performance. A redução proporcionada pela utilização desse produto chega a ser 37% superior se comparada com a VID1, que obteve a menor redução entre as estratégias avaliadas.

De maneira geral todas essas estratégias se comportaram similarmente quanto a redução das cargas térmicas dos pavimentos e, também, das zonas térmicas, resguardadas suas proporcionalidades. Em todas as estratégias avaliadas

o pavimento com a maior redução da carga térmica foi o Térreo, variando em 11,85% para a aplicação da VID1, 14,20% para a aplicação da VID2, 13,9% para a aplicação da VID3 e de 17,78% para a aplicação da VID4. Por sua vez, o pavimento que obteve menor redução da carga térmica em todas as estratégias avaliadas foi a Cobertura, com redução de 6,86% para a VID1, 8,31% para a VID2, 8,36% para a VID3 e 9,36% para a VID4. A Tabela 16 sistematiza o efeito das estratégias de eficiência relacionadas ao envidraçamento nas cargas térmicas da envoltória.

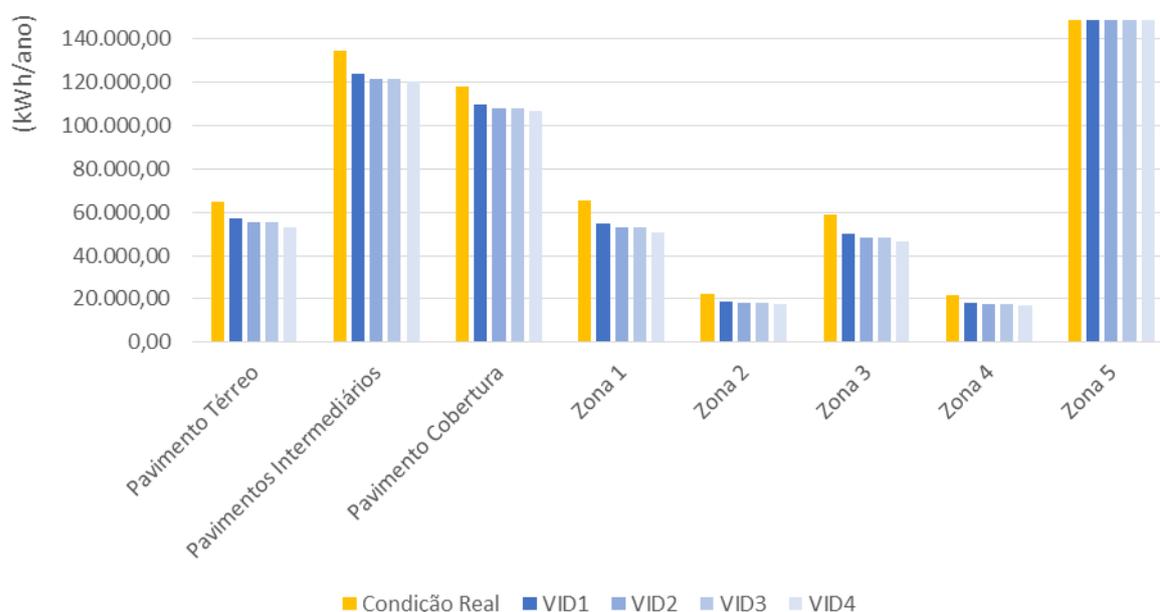
Tabela 16 – Efeito das estratégias de eficiência energética relacionadas ao envidraçamento nas cargas térmicas da envoltória.

Local		Metamodelo Real	VID1	VID2	VID3	VID4
Modelo	Carga térmica (kWh/ ano)	451.431,93	414.655,66	407.049,08	406.830,64	401.016,20
Completo	Percentual de Redução	-	8,15%	9,83%	9,88%	11,17%
Pavimento	Carga térmica (kWh/ ano)	64.603,63	56.945,21	55.426,91	55.602,29	53.117,30
Térreo	Percentual de Redução	-	11,85%	14,20%	13,93%	17,78%
Pavimentos Intermediários	Carga térmica (kWh/ ano)	134.474,23	123.961,00	121.769,76	121.599,16	120.526,22
	Percentual de Redução	-	7,82%	9,45%	9,57%	10,37%
Pavimento Cobertura	Carga térmica (kWh/ ano)	117.879,84	109.788,45	108.082,65	108.030,03	106.846,46
	Percentual de Redução	-	6,86%	8,31%	8,36%	9,36%
Zona 1	Carga térmica (kWh/ ano)	65.471,96	54.991,99	52.841,57	52.834,04	50.863,50
	Percentual de Redução	-	16,00%	19,29%	19,30%	22,31%
Zona 2	Carga térmica (kWh/ ano)	22.213,63	18.670,41	17.940,55	17.935,00	17.287,11
	Percentual de Redução	-	15,95%	19,24%	19,26%	22,18%
Zona 3	Carga térmica (kWh/ ano)	59.132,48	50.220,61	48.377,01	48.355,66	46.793,44
	Percentual de Redução	-	15,07%	18,19%	18,22%	20,87%
Zona 4	Carga térmica (kWh/ ano)	21.641,15	18.313,17	17.621,71	17.608,30	17.047,45
	Percentual de Redução	-	15,38%	18,57%	18,64%	21,23%
Zona 5	Carga térmica (kWh/ ano)	148.498,48	148.498,48	148.498,48	148.498,48	148.498,48
	Percentual de Redução	-	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Fonte: Autor, 2022.

Das zonas térmicas, a maior redução ocorreu na Zona 1, fachada Norte, com valor de 16,00% para a aplicação da VID1, 19,29% para a aplicação da VID2, 19,30% para a aplicação da VID3 e 22,31% para a aplicação da VID4. Nas demais zonas térmicas os valores de redução estiveram próprios entre si, com variação média de aproximadamente 1%. A hipótese para este comportamento é o fato de que toda a extensão de fachadas do modelo possui um elemento de proteção solar com ângulo de sombreamento vertical de 32° (marquise), o que reduz a incidência solar sobre o envidraçamento das aberturas. O Gráfico 2 traz a comparação dos efeitos das estratégias de melhoria da eficiência energética relacionadas ao envidraçamento nas cargas térmicas da envoltória. Percebe-se que não houve redução da carga térmica relacionada à Zona 5, interna à edificação, pois esta zona não possui contato direto com o ambiente externo por meio de aberturas envidraçadas.

Gráfico 2 – Comparação dos efeitos das estratégias de melhoria da eficiência energética relacionadas ao envidraçamento nas cargas térmicas do modelo.



Fonte: Autor, 2022.

Das 4 estratégias relacionadas ao envidraçamento das aberturas avaliadas para a promoção da melhoria da eficiência energética, a que obteve a maior redução percentual foi a VID4, com ganhos de 11,17% em relação à condição real.

4.2.3 Resultado das estratégias de eficiência energética para a envoltória relacionadas à cobertura

A adoção de estratégias relacionadas à cobertura apresentou comportamentos diferentes entre si, tendo havido redução da carga térmica em 2 das 4 situações propostas e aumento da carga térmica nas outras 2. Uma vez que a interface web realiza seus cálculos de forma independente entre cada situação analisada, as estratégias adotadas para a cobertura não resultaram alteração da carga térmica dos Pavimentos Intermediários e do Pavimento Térreo. A aplicação da COB1 – Cobertura com pintura da telha cimentícia na cor branca, com U_{cob} de 1,3 W/m²K, CT_{cob} de 237,1 kJ/(m².K) e α_{cob} de 0,3 reduziu a carga térmica do modelo em 5,44% em comparação com a condição real. Esse decréscimo foi influenciado pelo valor mais baixo referente à absorvância solar da telha já que os demais parâmetros permaneceram inalterados em comparação com a condição real. A redução da carga térmica no Pavimento Cobertura alcançou 20,85% em relação à condição real. A aplicação da COB2 – Cobertura com telha sanduiche na cor metálica, com U_{cob} de 0,51 W/m²K, CT_{cob} de 233,8 kJ/(m².K) e α_{cob} de 0,36 aumentou a carga térmica do modelo em 0,04% em comparação à condição real. Embora tenham sido adotados valores inferiores ao da condição real para todos os parâmetros físicos da estratégia avaliada, observou-se um discreto aumento no valor da carga térmica. A aplicação da COB3 – Cobertura com telha sanduiche na cor branca, com U_{cob} de 0,51 W/m²K, CT_{cob} de 233,8 kJ/(m².K) e α_{cob} de 0,30 reduziu a carga térmica do modelo em 0,61% em comparação com a condição real. Como ocorreu na estratégia anterior, foram adotados valores inferiores para todos os parâmetros físicos da estratégia com um decréscimo mais acentuado no parâmetro absorvância solar da cobertura. Para este caso, observou-se uma discreta redução da carga térmica, mostrando que para o metamodelo em estudo o fator absorvância solar possui significativa influência na redução da carga térmica total. Por sua vez, a aplicação da COB4 – Cobertura com instalação de isolante térmico sob a telha cimentícia, com U_{cob} de 0,6 W/m²K, CT_{cob} de 239,0 kJ/(m².K) e α_{cob} de 0,8 aumentou a carga térmica do modelo em 2,36% em comparação com a condição real. Esta estratégia possui o valor da absorvância solar da cobertura muito elevada, igual ao da condição real e no limite superior admitido pela INI-C, tendo variado os parâmetros transmitância térmica da cobertura e capacidade térmica da cobertura.

Nesse caso a hipótese é que o uso de material isolante conjugado com o uso de material com alta absorvência provocou um acúmulo de calor interno, impedindo que se dissipasse para a atmosfera, o que teria resultado em cargas térmicas mais elevadas. O ganho de carga térmica no Pavimento Cobertura alcançou 9,05% em relação à condição real. A Tabela 17 sistematiza o efeito das estratégias de eficiência relacionadas à cobertura nas cargas térmicas da envoltória.

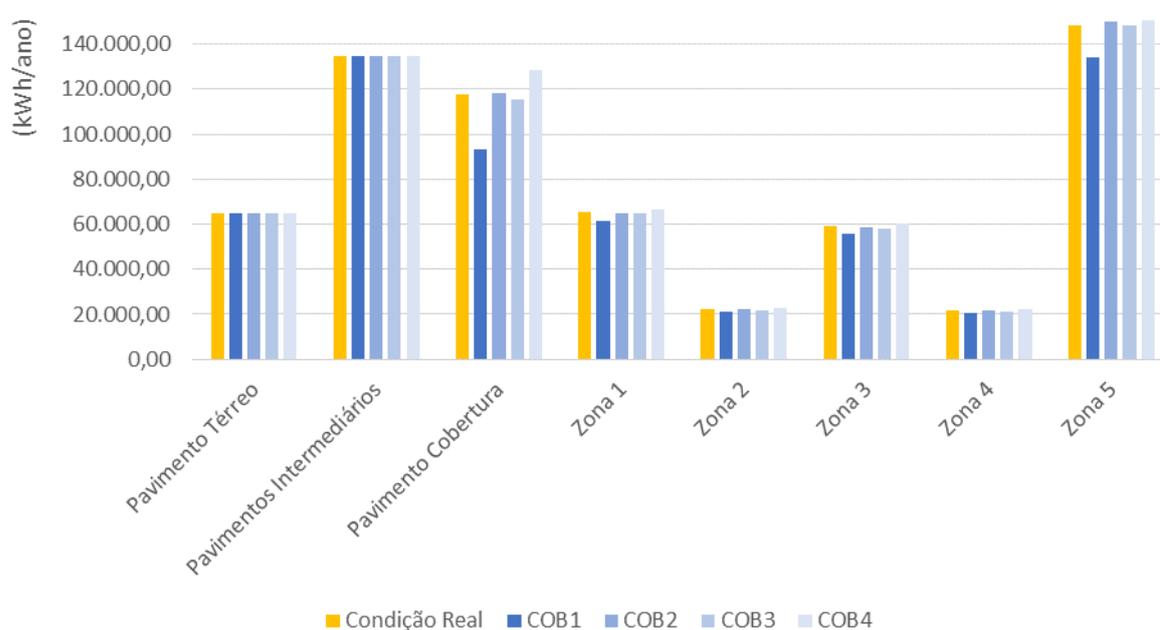
Tabela 17 – Efeito das estratégias de eficiência energética relacionadas a cobertura nas cargas térmicas da envoltória.

Local		Metamodelo Real	COB1	COB2	COB3	COB4
Modelo	Carga térmica (kWh/ ano)	451.431,93	426.852,52	451.601,40	448.677,30	462.096,20
Completo	Percentual de Redução	-	5,44%	-0,04%	0,61%	-2,36%
Pavimento	Carga térmica (kWh/ ano)	64.603,63	64.603,63	64.603,63	64.603,63	64.603,63
Térreo	Percentual de Redução	-	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Pavimentos Intermediários	Carga térmica (kWh/ ano)	134.474,23	134.474,23	134.474,23	134.474,23	134.474,23
	Percentual de Redução	-	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Pavimento Cobertura	Carga térmica (kWh/ ano)	117.879,84	93.300,45	118.049,31	115.125,21	128.544,11
	Percentual de Redução	-	20,85%	-0,14%	2,34%	-9,05%
Zona 1	Carga térmica (kWh/ ano)	65.471,96	61.660,37	65.068,08	64.625,85	66.774,99
	Percentual de Redução	-	5,82%	0,62%	1,29%	-1,99%
Zona 2	Carga térmica (kWh/ ano)	22.213,63	20.908,04	22.052,98	21.902,43	22.642,06
	Percentual de Redução	-	5,88%	0,72%	1,40%	-1,93%
Zona 3	Carga térmica (kWh/ ano)	59.132,48	55.529,36	58.564,48	58.152,10	60.230,94
	Percentual de Redução	-	6,09%	0,96%	1,66%	-1,86%
Zona 4	Carga térmica (kWh/ ano)	21.641,15	20.332,79	21.434,50	21.285,41	22.034,08
	Percentual de Redução	-	6,05%	0,95%	1,64%	-1,82%
Zona 5	Carga térmica (kWh/ ano)	148.498,48	133.947,75	150.007,13	148.237,28	155.939,90
	Percentual de Redução	-	9,80%	-1,02%	0,18%	-1,82%

Fonte: Autor, 2022.

Quanto aos impactos da adoção dessas estratégias nas zonas térmicas, observa-se que a COB1 proporcionou redução em todas elas, tendo sido mais acentuada na Zona 5, interna, justo a que recebe maior quantidade de radiação solar. Por outro lado, as estratégias COB2 e COB4 se comportaram de maneira contrária, com aumento da carga térmica associada a essa zona, cujos valores foram 1,02% e 1,82%, respectivamente.

Gráfico 3 – Comparação dos efeitos das estratégias de melhoria da eficiência energética relacionadas à cobertura nas cargas térmicas do modelo.



Fonte: Autor, 2022.

Das 4 estratégias relacionadas à cobertura avaliadas para a promoção da melhoria da eficiência energética, a que obteve a maior redução percentual foi a COB1, com ganhos de 5,44% em relação à condição real.

4.2.4 Resultado das estratégias de eficiência energética para a envoltória relacionadas às paredes externas

A aplicação da PAR1 – Parede externa com pintura na cor branca, com U_{par} de $1,9 \text{ W/m}^2\text{K}$, CT_{par} de $152,7 \text{ kJ/(m}^2\text{.K)}$ e α_{par} de $0,38$ reduziu a carga térmica do modelo em 1,99% em comparação com a condição real. Essa estratégia alterou apenas o parâmetro absorvância da parede, tendo sido adotado um valor baixo,

correspondente a cores claras que resultaram na maior reflexão da absorção da radiação solar para o ambiente. A aplicação da PAR2 – Parede externa com placa cimentícia na cor natural, com U_{par} de $1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$, CT_{par} de $168,7 \text{ kJ}/(\text{m}^2.\text{K})$ e α_{par} de $0,60$ aumentou a carga térmica do modelo em $2,30\%$ em comparação com a condição real. A aplicação da PAR3 – Parede externa com placa cimentícia na cor branca, com U_{par} de $1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$, CT_{par} de $168,7 \text{ kJ}/(\text{m}^2.\text{K})$ e α_{par} de $0,20$ reduziu a carga térmica do modelo em $1,58\%$ em comparação com a condição real. As estratégias PAR2 e PAR3 adotaram o mesmo material, porém com diferentes valores para a absorvância. A primeira estratégia utilizou um valor de absorvância mais alto que o da condição real correspondendo a cores escuras, enquanto a segunda estratégia utilizou um valor para a absorvância mais baixo que o da condição real, correspondente a cores claras e igualmente à estratégia PAR1. Embora em ambos os casos a adoção de valores para a transmitância térmica da parede e para a capacidade térmica da parede tenham sido favoráveis no sentido da redução da carga térmica, na estratégia PAR2 o efeito foi oposto e na estratégia PAR3 o efeito foi ligeiramente como esperado o que indica que para o metamodelo estudado o parâmetro absorvância solar possui influência significativa na redução das cargas térmicas. Por sua vez, a aplicação da PAR4 – Parede externa com placa de alumínio composto na cor branca com isolamento térmico, com U_{par} de $0,5 \text{ W/m}^2\text{K}$, CT_{par} de $155,7 \text{ kJ}/(\text{m}^2.\text{K})$ e α_{par} de $0,20$ aumentou a carga térmica do modelo em $0,98\%$ em comparação com a condição real. O efeito produzido pela utilização de isolamento na composição da estratégia se assemelha ao ocorrido na estratégia COB4, cobertura, situação em que há um estoque de calor no interior do modelo embora tenha sido adotado valor baixo para a absorvância solar da parede.

O comportamento das estratégias de melhoria nos pavimentos do modelo foi bastante heterogêneo. Para a PAR1 a maior redução da carga térmica ocorreu no Pavimento Térreo, enquanto a menor redução ocorreu no Pavimento Cobertura. Na PAR2, todos os pavimentos aumentaram suas cargas térmicas em relação à condição de referência, contudo, o Pavimento Intermediário foi o que registrou o maior aumento percentual. Já a PAR4, embora sua carga térmica final tenha aumentado em relação à condição de referência, o Pavimento Térreo reduziu sua carga térmica em $3,51\%$.

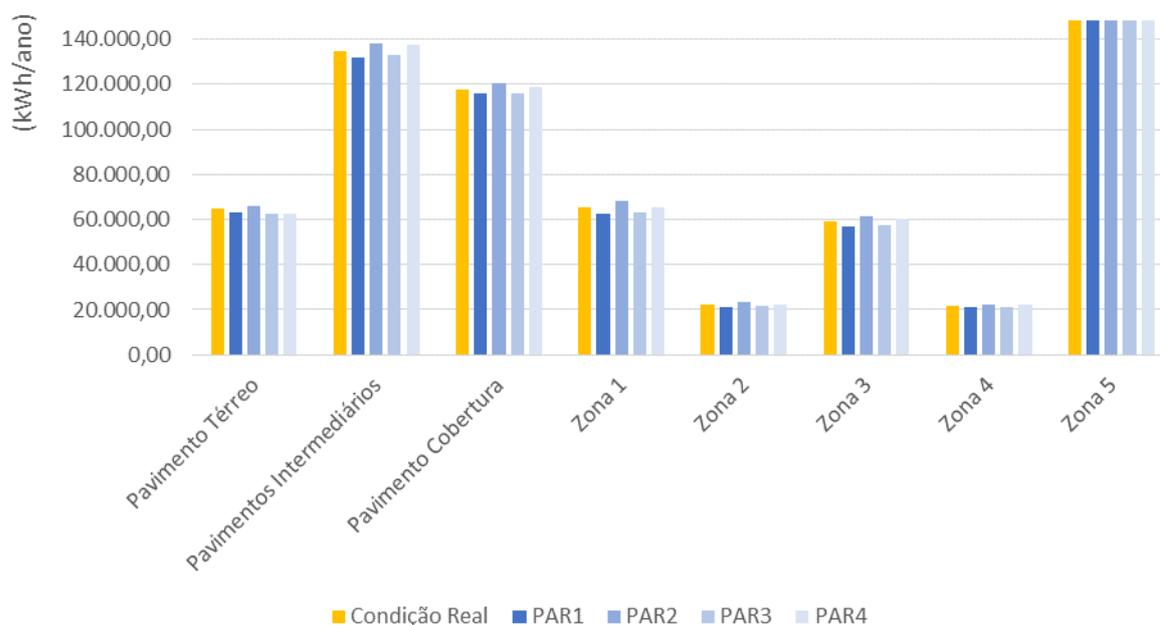
Tabela 18 – Efeito das estratégias de eficiência energética relacionadas às paredes externas nas cargas térmicas da envoltória.

Local		Metamodelo Real	PAR1	PAR2	PAR3	PAR4
Modelo	Carga térmica (kWh/ ano)	451.431,93	442.453,47	461.820,32	444.32,73	455.850,28
Completo	Percentual de Redução	-	1,99%	-2,30%	1,58%	-0,98%
Pavimento Térreo	Carga térmica (kWh/ ano)	64.603,63	62.839,03	65.765,26	62.318,77	62.338,79
	Percentual de Redução	-	2,73%	-1,80%	3,54%	3,51%
Pavimentos Intermediários	Carga térmica (kWh/ ano)	134.474,23	131.946,38	137.842,61	132.917,68	137.484,29
	Percentual de Redução	-	1,88%	-2,50%	1,16%	-2,24%
Pavimento Cobertura	Carga térmica (kWh/ ano)	117.879,84	115.721,68	120.369,84	116.167,60	118.542,91
	Percentual de Redução	-	1,83%	-2,11%	1,45%	-0,56%
Zona 1	Carga térmica (kWh/ ano)	65.471,96	62.806,97	68.265,48	63.034,06	65.454,77
	Percentual de Redução	-	4,07%	-4,27%	3,72%	0,03%
Zona 2	Carga térmica (kWh/ ano)	22.213,63	21.332,41	23.166,06	21.436,24	22.301,67
	Percentual de Redução	-	3,97%	-4,29%	3,50%	-0,40%
Zona 3	Carga térmica (kWh/ ano)	59.132,48	57.002,81	61.550,37	57.430,72	60.130,76
	Percentual de Redução	-	3,60%	-4,09%	2,88%	-1,69%
Zona 4	Carga térmica (kWh/ ano)	21.641,15	20.866,42	22.497,32	21.004,55	21.980,31
	Percentual de Redução	-	3,58%	-3,96%	2,94%	-1,57%
Zona 5	Carga térmica (kWh/ ano)	148.498,48	148.498,48	148.498,48	148.498,48	148.498,48
	Percentual de Redução	-	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Fonte: Autor, 2022.

As estratégias relacionadas às paredes não resultaram em alteração dos valores das cargas térmicas do Zona 5, interna.

Gráfico 4 - Comparação dos efeitos das estratégias de melhoria da eficiência energética relacionadas às paredes externas nas cargas térmicas do modelo.



Fonte: autor, 2022.

Das 4 estratégias relacionadas às paredes externas avaliadas para a promoção da melhoria da eficiência energética a que obteve a maior redução percentual foi a PAR1, com ganhos de 1,99% em relação à condição real.

4.2.5 Resultado das estratégias de eficiência energética para a envoltória relacionadas ao ângulo de sombreamento

De maneira geral as estratégias selecionadas para o sombreamento vertical da envoltória produziram efeitos similares em todo o conjunto avaliado – pavimentos e zonas térmicas. A aplicação da SOM1 – ângulo vertical de sombreamento a 35° reduziu a carga térmica do modelo em 0,50% em comparação com a condição real. A aplicação da SOM2 – Ângulo vertical de sombreamento a 40° reduziu a carga térmica do modelo em 1,25% em comparação com a condição de referência. Por sua vez, a aplicação da SOM3 – Ângulo vertical de sombreamento a 45° reduziu a carga térmica do modelo em 1,90% em comparação com a condição de referência. Nas 3 estratégias avaliadas o pavimento que alcançou as maiores reduções da carga térmica foi o Térreo com valores de 0,64% para a SOM1, 1,60% para a SOM2 e de 2,45% para a SOM3. Da mesma forma, o pavimento que alcançou as menores

reduções da carga térmica para as 3 estratégias avaliadas foi a Cobertura, com valores de 0,43% para a SOM1, 1,05% para a SOM2 e de 1,59% para a SOM3.

Assim como acontece com os pavimentos, os efeitos da aplicação dessas medidas de sombreamento são semelhantes para todas as zonas térmicas. A zona térmica com maior redução percentual da carga térmica foi a Zona 1, Norte, e a zona térmica com a menor redução foi a Zona 3, Sul, para os 3 casos avaliados. Embora tenha havido essa diferença, o percentual de redução da carga térmica entre todas as zonas térmicas foi discretíssimo, variando menos de 0,5% em todas as estratégias avaliadas. Este comportamento pode ser explicado pelo fato de que a proporção de sombreamento sempre permanece a mesma para todas as zonas térmicas.

Tabela 19 – Efeito das estratégias de eficiência energética relacionadas a cobertura nas cargas térmicas da envoltória.

Local		Metamodelo Real	SOM1	SOM2	SOM3
Modelo Completo	Carga térmica (kWh/ ano)	451.431,93	449.167,33	445.782,99	442.839,28
	Percentual de Redução	-	0,50%	1,25%	1,90%
Pavimento Térreo	Carga térmica (kWh/ ano)	64.603,63	64.191,76	63.569,83	63.020,90
	Percentual de Redução	-	0,64%	1,60%	2,45%
Pavimentos Intermediários	Carga térmica (kWh/ ano)	134.474,23	133.798,41	132.788,07	131.908,65
	Percentual de Redução	-	0,50%	1,25%	1,91%
Pavimento Cobertura	Carga térmica (kWh/ ano)	117.879,84	117.378,75	116.637,02	116.001,08
	Percentual de Redução	-	0,43%	1,05%	1,59%
Zona 1	Carga térmica (kWh/ ano)	65.471,96	64.813,65	63.835,88	62.988,46
	Percentual de Redução	-	1,01%	2,50%	3,79
Zona 2	Carga térmica (kWh/ ano)	22.213,63	21.998,34	21.674,36	21.390,03
	Percentual de Redução	-	0,97%	2,43%	3,71%
Zona 3	Carga térmica (kWh/ ano)	59.132,48	58.626,91	57.871,97	57.219,37
	Percentual de Redução	-	0,85%	2,13%	3,24%

Continua

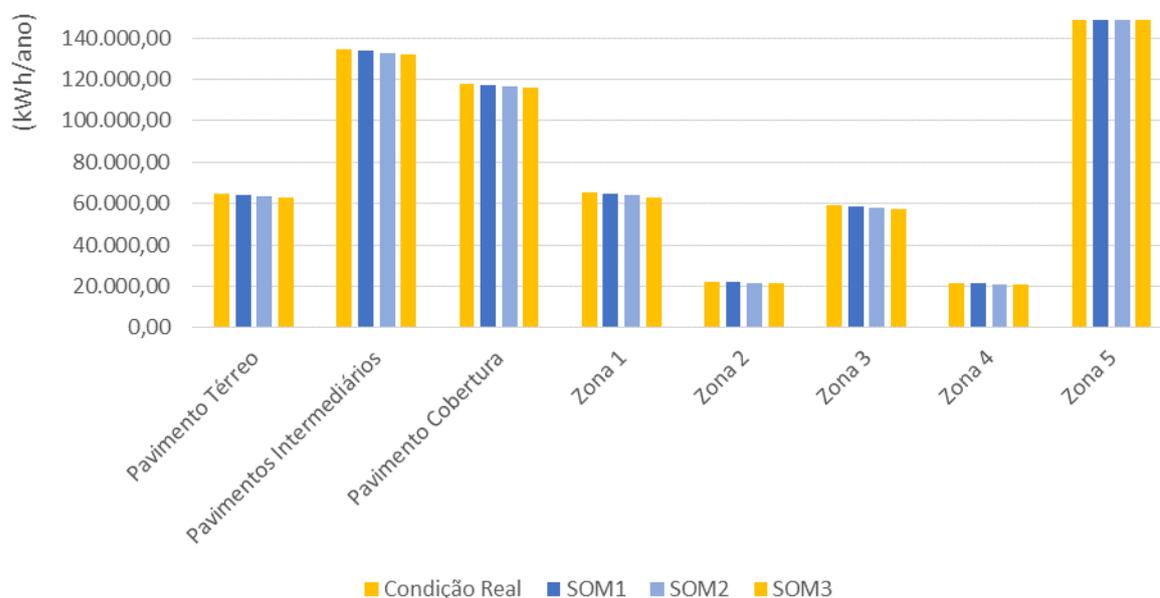
Continua

Zona 4	Carga térmica (kWh/ ano)	21.641,15	21.431,54	21.114,23	20.834,29
	Percentual de Redução	-	0,97%	2,43%	3,73%
Zona 5	Carga térmica (kWh/ ano)	148.498,48	148.498,48	148.498,48	148.498,48
	Percentual de Redução	-	0,0%	0,0%	0,0%

Fonte: Autor, 2022.

Vale ressaltar que a interface web não faz a análise do percentual de perda da iluminação natural do modelo. Ângulos de sombreamento vertical altos podem prejudicar a iluminação natural de um determinado ambiente provocando um efeito colateral negativo de aumento do consumo de energia elétrica pela necessidade de uso da iluminação artificial como medida compensatória desta perda da iluminação natural.

Gráfico 5 - Comparação dos efeitos das estratégias de melhoria da eficiência energética relacionadas ao ângulo vertical de sombreamento nas cargas térmicas do modelo.

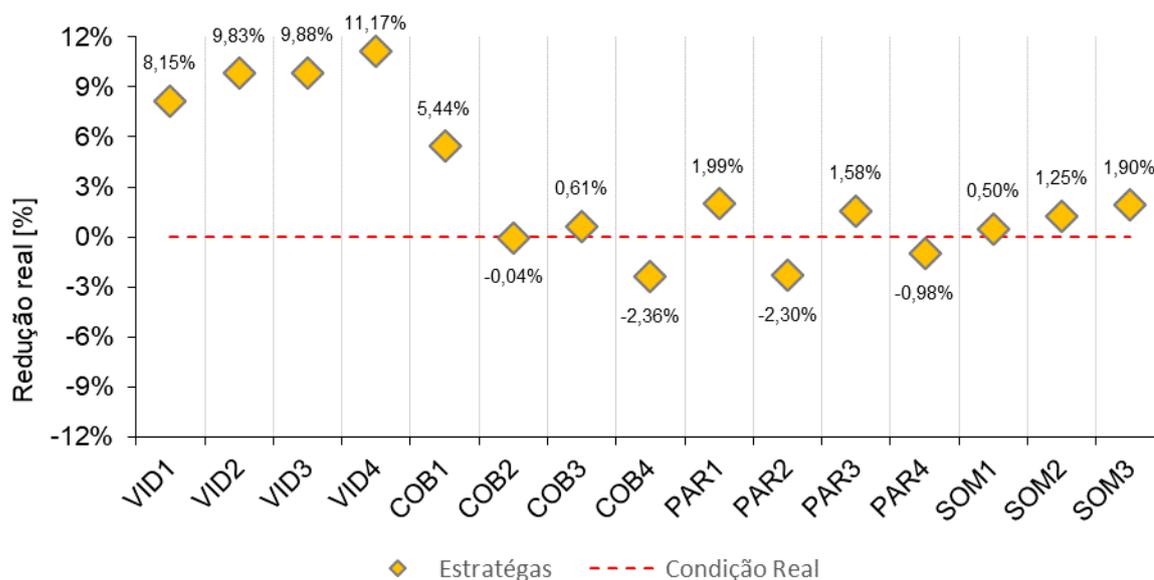


Fonte: Autor, 2022.

Das 3 estratégias relacionadas aos ângulos de sombreamento avaliados para a promoção da melhoria da eficiência energética a que obteve a maior redução percentual foi a SOM3, com ganhos de 1,90% em relação à condição real.

O Gráfico 6 traz o comparativo entre os valores obtidos pelas 15 estratégias adotadas, em relação à condição real.

Gráfico 6 – Comparação dos valores alcançados pela aplicação das estratégias de melhoria da eficiência energética à condição real.



Fonte: Autor, 2022.

4.2.6 Conjunto de estratégias para a melhoria da eficiência energética

Partindo-se dos resultados obtidos após a aplicação das 15 estratégias para a melhoria da eficiência energética da envoltória do modelo real foram selecionadas apenas aquelas que alcançaram os melhores índices de redução da carga térmica para cada um dos grupos avaliados. A estratégia selecionada do grupo referente ao envidraçamento das aberturas foi a VID4 - Vidro monolítico 6mm – Cebrace Cool-Lite SKN144 II, que alcançou reduzir a carga térmica do modelo em 11,17% em comparação com a condição real. A estratégia selecionada do grupo referente à cobertura foi a COB1 – Cobertura com pintura da telha cimentícia na cor branca, que alcançou reduzir a carga térmica do modelo em 5,44% em comparação com a condição real. A estratégia selecionada do grupo referente às paredes foi a PAR1 – Parede externa com pintura na cor branca, que alcançou reduzir a carga térmica do modelo em 1,99% em comparação com a condição real. Por fim, a estratégia selecionada do grupo referente ao ângulo de sombreamento foi a SOM3 – Ângulo

vertical de sombreamento a 45°, que alcançou reduzir a carga térmica do modelo em 1,90% em comparação com a condição real.

Os conjuntos de estratégias foram agrupados considerando a semelhança entre os serviços a serem executados. Desta maneira o primeiro conjunto – CE1 agrupou a estratégia referente à cobertura e às paredes externas haja vista tratarem de serviços de pintura. O segundo conjunto – CE2 somou ao primeiro grupo a estratégia referente ao ângulo de sombreamento vertical, pois pode ser contemplada instalando junto à fachada, *brises-soleil*, por exemplo. Por último, a CE3 somou ao conjunto anterior a estratégia referente ao envidraçamento das aberturas. Outras configurações de conjuntos podem ser elaboradas resultando em índices de redução diferentes dos apresentados neste trabalho.

Tabela 20 – Efeito do conjunto de estratégias de eficiência energética nas cargas térmicas da envoltória.

Local		Metamodelo Real	CE1	CE2	CE3
Modelo Completo	Carga térmica (kWh/ ano)	451.431,93	419.245,20	410.159,41	368.535,58
	Percentual de Redução	-	7,13%	9,14%	18,36%
Pavimento Térreo	Carga térmica (kWh/ ano)	64.603,63	62.839,03	61.346,35	51.309,32
	Percentual de Redução	-	2,73%	5,04%	20,58%
Pavimentos Intermediários	Carga térmica (kWh/ ano)	134.474,23	131.946,38	129.515,15	117.670,72
	Percentual de Redução	-	1,88%	3,69%	12,50%
Pavimento Cobertura	Carga térmica (kWh/ ano)	117.879,84	92.513,41	89.782,76	81.884,82
	Percentual de Redução	-	21,52%	23,84%	30,54%
Zona 1	Carga térmica (kWh/ ano)	65.471,96	59.097,79	56.870,76	44.381,39
	Percentual de Redução	-	9,74%	13,14%	32,21%
Zona 2	Carga térmica (kWh/ ano)	22.213,63	20.321,50	19.252,64	15.414,74
	Percentual de Redução	-	8,52%	13,33%	30,61%
Zona 3	Carga térmica (kWh/ ano)	59.132,48	54.108,66	51.775,50	41.900,89
	Percentual de Redução	-	8,50%	12,44%	29,14%

Continua

Continua

Zona 4	Carga térmica (kWh/ ano)	21.641,15	19.823,12	18.797,61	15.220,09
	Percentual de Redução	-	8,40%	13,14%	29,67%
Zona 5	Carga térmica (kWh/ ano)	148.498,48	133.947,75	133.947,75	133.947,75
	Percentual de Redução	-	9,80%	9,80%	9,80%

Fonte: Autor, 2022.

Ao acrescer-se estratégias ao conjunto inicial era esperada a ampliação da redução de cargas térmicas gerais da edificação. Este movimento pode ser observado nos resultados para o modelo completo cujas reduções alcançaram 7,13% para o CE1, 9, 14% para o CE2 e 18,36% para o CE3, todos em comparação com o modelo real, conforme demonstrado na Tabela 20.

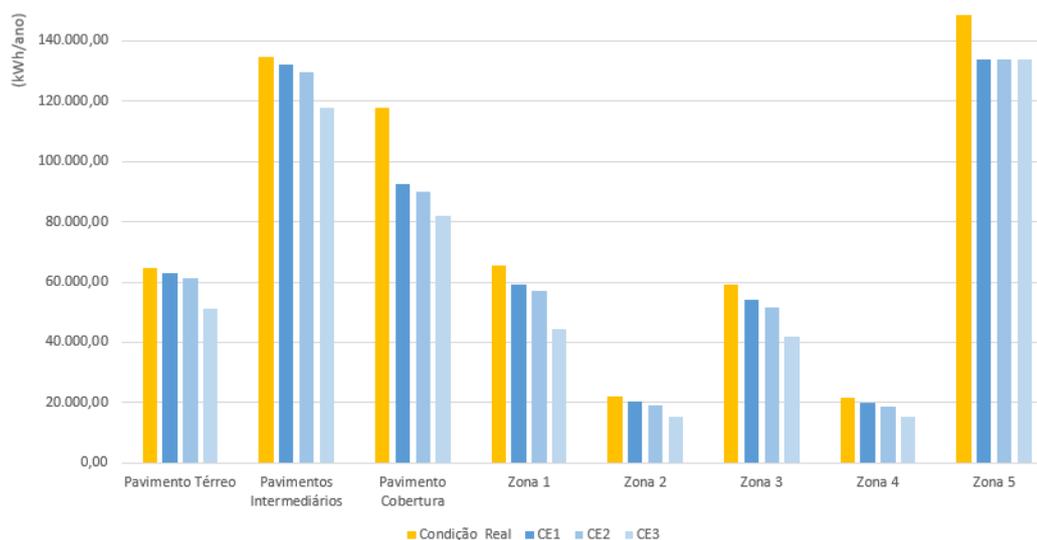
Para o conjunto CE1, que traz estratégias relacionadas à cobertura e às paredes externas, a maior redução foi observada no Pavimento Cobertura com percentual de 21,52%. O impacto da implantação deste conjunto foi sentido discretamente nos Pavimentos Intermediários e térreo. Nas zonas térmicas a redução aconteceu de maneira homogênea, apresentando valores entre 9,80% para a Zona 5, interna, com maior redução da carga térmica e 8,40% para a Zona 4, Oeste, com a menor redução da carga térmica.

Para o conjunto CE2, que traz estratégias relacionadas à cobertura, paredes externas e ângulo de sombreamento vertical, a maior redução da carga térmica foi observada no Pavimento Cobertura com percentual de 23,84%. Quanto a redução da carga térmica de resfriamento para as zonas térmicas o maior percentual foi observado na Zona 1, correspondente a fachada Norte.

Para o conjunto CE3, que trouxe o somatório de todas as melhores estratégias, por sua vez, a redução de carga térmica de resfriamento aconteceu de maneira mais pronunciada com percentuais de redução dos pavimentos entre 30,54%, para o Pavimento Cobertura, 20,58% para o Pavimento Térreo, e 12,50% para os Pavimentos Intermediários em comparação com o modelo real. O percentual de redução alcançado para as demais zonas térmicas foi semelhante ao da Zona 1, com valores entre 30, 61% para a Zona 2, correspondente a fachada Leste e 29,67% para a Zona 4, correspondente a fachada Oeste. Precebeu-se que em todos os conjuntos de estratégias propostos os valores da carga térmica para a Zona 5

permaneceram iguais. Isso deve-se ao fato do único parâmetro a alterar a zona interna do modelo é o relacionado a cobertura.

Gráfico 7 – Comparação dos efeitos dos conjuntos de estratégias nas cargas térmicas da modelo.



Fonte: Autor, 2022.

4.2.7 Consolidação das análises.

O resultado apresentado pela classificação final do sistema de envoltória pela interface web sinalizou que as características aplicadas ao metramodelo - retiradas de características construtivas reais dos Prédios V, B e D dos *campi* da Unifal-MG - alcançou o melhor nível de classificação “A” para a INI-C, tendo reduzido em 26,68% a carga térmica de resfriamento em comparação com a condição de referência – “D”. O pavimento que alcançou a maior redução percentual da carga térmica de resfriamento foi o Térreo atingindo 28,98%, enquanto a Zona térmica com a maior redução foi a de número 1 – Norte – com 31,83%, ambas em relação à condição de referência. Estas reduções ocorreram, possivelmente, pela perda da calor do Pavimento Térreo para o solo e, também, pela inserção do ângulo de sombreamento na fachada Norte, reduzindo a incidência solar direta na fachada mais exposta às ações da radiação solar para a latitude adotada neste trabalho.

Das estratégias adotadas para a redução da carga térmica da condição real, àquelas relacionadas ao envidraçamento das aberturas foram as que, isoladamente, alcançaram os melhores resultados percentuais. Embora na estratégia de

melhoramento tenham sido utilizados vidros especiais, com grande capacidade de isolamento, uma redução da carga térmica de resfriamento já era esperada pois os vidros empregados na condição real possuíam as mesmas características dos vidros adotados na condição de referência. A estratégia VID4, que utilizou o vidro monolítico de 6mm Cebrace Cool-Lite SKN144 II foi a que se destacou alcançando uma redução, isolada, de 11,17% em comparação com a condição real. Das estratégias relacionadas à cobertura a que se destacou foi a COB1 que consistiu na pintura da telha cimentícia na cor branca e que reduziu a carga térmica do modelo em 5,44% em relação à condição real tendo as demais estratégias variado percentualmente pouco, com exceção da COB4 - Cobertura com instalação de isolante térmico sob a telha cimentícia a estratégia que pior desempenho teve dentre todas as adotadas pois o isolamento impediu que o calor gerado sob a cobertura se dissipasse para a atmosfera colaborando para o aumento da carga térmica de resfriamento do modelo em 2,36% em comparação com a condição real. As estratégias relacionadas às paredes externas obtiveram variações da redução da carga térmica de pouco significativas em comparação com a condição real, tendo variado de 1,99% de redução no melhor resultado – PAR1 – Parede externa com pintura na cor branca e aumentado e, 2,30% no pior resultado – PAR2 - Parede externa com placa cimentícia na cor natural. As estratégias relacionadas aos ângulos de sombreamento reduziram a carga térmica da edificação a medida em que se aumentou esse ângulo e conseqüentemente, a área sombreada alcançando até 1,90% de redução em comparação com a condição real para a estratégia SOM3 - Ângulo vertical de sombreamento a 45°. Por fim, a adoção de estratégias conjugadas potencializou a redução da carga térmica do modelo em até 18,36% se comparadas à condição real quando utilizadas as estratégias que alcançaram os melhores índices de redução, no caso, a CE3, que compilou a melhor estratégia para cada uma das propriedades da envoltória.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho conseguiu responder à pergunta problema planteada que buscava identificar o potencial de variação da eficiência energética de um metamodelo elaborado com base nas características e propriedades físicas dos elementos construtivos comumente adotados pela Unifal-MG em seus prédios, a partir da implementação de estratégias para a melhoria da eficiência energética da envoltória. Por meio da utilização do método simplificado da INI-C, pôde-se determinar a classificação da envoltória do metamodelo usado como estudo de caso que obteve o nível A da normativa, tendo sido alcançado um percentual de 26,68% de redução do consumo de energia elétrica anual em comparação com a referência. Apesar de ter alcançado o nível mais elevado da classificação, o trabalho avaliou estratégias de melhoria da eficiência energética que alcançaram, em conjunto, 18,36% de redução da carga térmica de refrigeração em relação ao modelo inicial e, o percentual de redução total do modelo melhorado foi de 45,04% em relação à referência. Os percentuais obtidos são próximos aos encontrados por pesquisas similares.

Foram adotadas apenas estratégias com base em materiais e propriedades físicas elencadas no Anexo V da Portaria INMETRO nº 50/2013 e àquelas que trariam menor impacto de instalação considerando a edificação em uso pleno. As análises mostraram que é possível expandir esses ganhos na eficiência, em situações de *retrofit* da edificação ou, ainda, em caso de construção de novas edificações considerando as características e propriedades físicas dos elementos construtivos utilizados pela Unifal-MG e estudados neste trabalho. A adoção de apenas uma estratégia isolada resultou em um efeito limitado na melhoria da eficiência energética da envoltória, contudo, a adoção de um conjunto com diferentes estratégias pode amplificar seus efeitos individuais e alcançar percentuais significativos de redução das cargas térmicas de refrigeração do modelo completo. A adoção de estratégias diferentes às usadas neste trabalho poderão trazer reduções ainda mais representativas, dependendo do caso.

De maneira geral, observou-se valores de carga térmica muito elevados como resposta à avaliação do metamodelo pelo fato da interface web considerar o modelo em análise na situação de pleno uso, ou seja, como se todos os sistemas e equipamentos alocados estivessem em funcionamento na carga máxima, durante

todo o período do dia, o que não ocorre no dia a dia de uma edificação. Desta maneira, a interface web poderia, em atualizações futuras, prever períodos de uso para determinados equipamentos e sistemas e, ainda, fornecer valores diferentes de carga térmica das zonas térmicas por período do ano.

Por fim, a adoção de ações, algumas delas simples, de pouco ou nenhum impacto financeiro, durante a fase de projeto, como por exemplo a escolha adequada da cor da fachada ou da cobertura do edifício para o contexto climático ao qual ele está inserido, podem gerar ganhos significativos no aumento do grau de conforto do usuário e na eficiência energética do edifício com consequente redução dos gastos com energia elétrica.

REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15220: Desempenho Térmico de edificações**. Rio de Janeiro. ABNT, 2005.

_____. **NBR 15575: Edificações de até cinco pavimentos – Desempenho**. Rio de Janeiro. ABNT, 2008.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Edital da Chamada 001/2016 do Projeto Prioritário de Eficiência Energética e Estratégico de P&D: EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E MINIGERAÇÃO EM INSTITUIÇÕES PÚBLICAS DE EDUCAÇÃO SUPERIOR**. Brasília. ANEEL, 2016. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/documents/656831/14930433/Priorit%C3%A1rio+e+Estrat%C3%A9gico+%28Edital+final%29/7817f2ab-0f65-42b8-b8d4-e91a2b61239f>. Acessado em outubro de 2019.

AGOPYAN, Vahan; JOHN, Vanderley M. **O desafio da sustentabilidade na construção civil**. São Paulo, Blucher, 2011. 141p.

ALMEIDA, Mariana Barbosa Carlos de. **Uma análise da implantação e da funcionalidade dos projetos padrão do FNDE: a experiência das escolas infantis tipo “B” do proinfância em Natal/RN**. 2018. 219 f. Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN, Natal, RN, 2018.

AMORIM, Cláudia Naves David; BAFFI, Basílio; SILVA, Caio Frederico. Simulação computacional da envoltória de edifício público. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído – ENTAC, 2016, São Paulo. **Anais [...]**. Porto Alegre: ANTAC, 2016.

BARRETO, Talita de Albuquerque. **Estudo da eficiência energética dos terminais de passageiros do Aeroporto Internacional Porto Alegre/Salgado Filho pelo método PROCEL Edifica**. 2016. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS. São Leopoldo, RS, 2016.

BARROS, Lia Affonso Ferreira. **Avaliação de projeto padrão de creche em conjuntos habitacionais de interesse social: o aspecto da implantação**. 2002. 208 f. Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Civil. Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP. Campinas, SP, 2002.

BORGSTEIN, Edwards. **Edifícios de baixo carbono no Brasil**. Instituto Clima e Sociedade – iCS. São Paulo, 2017. 108 p.

BRASIL. Lei nº 10.295 de 17 de outubro de 2001. **Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia**. Brasília, DF, 2001a.

_____. **Decreto nº 4.059 de 19 de dezembro de 2001**. Regulamenta a Lei nº 10.295 de 17 de outubro de 2001 que dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia. Brasília, DF, 2001b.

_____. **Decreto nº 9864 de 27 de junho 2019.** Regulamenta a Lei 10.295 de 17 de outubro de 2001, que dispõe sobre a política nacional de conservação e uso racional de energia. Brasília, DF, 2019.

_____. **Instrução Normativa MPOG/SLTI nº 1, de 19 de janeiro de 2010.** Dispõe sobre os critérios de sustentabilidade ambiental na aquisição de bens, contratação de serviços ou obras pela Administração Pública Federal direta, autárquica e fundacional e dá outras providências. D.O.U., Brasília, DF, 13.jan.2010.

_____. **Instrução Normativa MPOG/SLTI nº 2, de 04 de junho de 2014.** Dispõe sobre regras para a aquisição ou locação de máquinas e aparelhos consumidores de energia pela Administração Pública Federal direta, autárquica e fundacional, e uso da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) nos projetos e respectivas edificações públicas federais novas ou que recebam retrofit. D.O.U., Brasília, DF, 05.jun,2014.

BRUNDTLAND, Gro Harlem. **Our common future – The world commission on environment and development.** Oxford University. Oxford University Press, 1987.

CARDOSO, Rafael Balbino. **Etiquetagem e eficiência energética.** Curitiba, Appris, 2015. 143 p.

CARLO, Joyce C. **Desenvolvimento de metodologia de avaliação de eficiência energética do envoltório de edificações não residenciais.** 2008. Tese (Doutorado) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFSC, 2008.

CB3E, Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações. **Metamodelo on line baseado em RNA para cálculo de carga térmica anual de uma edificação.** 2021. Disponível em: https://pbeedifica.com.br/redes/comercial/index_with_angular.html#. Acesso em: 05 de março de 2022.

CORBELLA, Oscar; YANNAS, Simos. **Em busca de uma arquitetura sustentável para os trópicos: conforto ambiental.** Rio de Janeiro, Revan, 2005. 305p.

CORBELLA, Oscar; CORNER, Viviane. **Manual de arquitetura bioclimática tropical.** Rio de Janeiro, Revan, 2011. 111 p.

CORTESE, Tatiana T. P. **Cidades inteligentes e sustentáveis.** São Paulo, Editora Manole, 2017. 176p.

CUNHA, Eduardo Grala. **Elementos de arquitetura de climatização natural: método projetual buscando a eficiência nas edificações.** Porto Alegre, Marquatro Editora, 2006. 188p.

EDWARDS, Brian. **O guia básico para a sustentabilidade.** Barcelona, Gustavo Gili, 2005. 226p.

ELETROBRÁS; PBE EDIFICA; INMETRO. **Manual para a aplicação do RTQ-C: Requisitos técnicos da qualidade para o nível de eficiência energética de edifícios comerciais, de serviços e públicos.** Volume 4.1, versão 4, 2016.

Disponível em: <http://www.pbeedifica.com.br/etiquetagem/publica/manuais>. Acesso em: 25 de julho de 2019.

ELETROBRÁS; CB3E. **Manual de aplicação da INI-C: Edificações comerciais, de serviços e públicas.** Versão 1, 2021. Disponível em: <http://www.pbeedifica.com.br/inic>. Acesso em: 11 de junho de 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE (Brasil). **Balanço Energético Nacional 2018: Ano Base 2017.** Rio de Janeiro, EPE. 2017. 292 p.

FOSSATI, Michele; LAMBERTS, Roberto. Metodologia para avaliação da sustentabilidade de projetos de edifícios: O caso de escritórios em Florianópolis. XII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído – ENTAC. **Anais [...]**. Fortaleza, 2008.

FROTA, Anésia Barros; SCHIFFER, Sueli Ramos. **Manual de conforto térmico.** São Paulo, Studio Nobel, 2003. 243 p.

FUNDAÇÃO VANZOLINI. **Certificação AQUA-HQE em detalhes.** 2019. Disponível em: <https://vanzolini.org.br/aqua/certificacao-aqua-em-detalhes/>. Acesso em: 25 de julho de 2019.

GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projeto de pesquisa.** 4ª ed. São Paulo, Atlas, 2002. 176 p.

GOLDEMBERG, José. **Energia e desenvolvimento sustentável.** São Paulo, Blucher, 2010. 94 p.

GONÇALVES, J. C. S.; DUARTE, D. H. S. Arquitetura sustentável: uma integração entre ambiente, projeto e tecnologia em experiências de pesquisa, prática e ensino. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 6, n. 4, p. 51-81, out./dez. 2006.

GURGEL, Miriam. **Design passivo - baixo consumo energético: um guia para conhecer, entender e aplicar os princípios do design passivo em residências.** São Paulo, Editora Senac, 2012. 175 p.

INMETRO. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia – INMETRO. **Portaria nº 163 de 08 de junho de 2009.** Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C). Rio de Janeiro, 2009.

_____. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia – INMETRO. **Portaria INMETRO nº 42 de 24 de fevereiro 2021.** Aprova a Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de eficiência Energética de edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (INI-C) que aperfeiçoa os Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C), especificando os critérios e os métodos para a classificação de edificações comerciais, de serviços e públicas quanto à sua eficiência energética. Rio de Janeiro, 2021.

_____. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia – INMETRO. **Histórico PBE. 2018**. Disponível em: <http://inmetro.gov.br/pbe/historico.php>. Acesso em: 05 de julho de 2019.

JOURDA, Françoise-Hélène. **Pequeno manual do projeto sustentável**. Barcelona, Gustavo Gili, 2012. 96p.

KEELER, Marian; BURKE, Bill. **Fundamentos de projeto de edificações sustentáveis**. Porto Alegre, Bookman, 2010. 362p.

KOWALTOWSKI, Doris C. C. K. **Arquitetura escolar: o projeto do ambiente de ensino**. São Paulo, Oficina de Textos, 2011. 272 p.

KWOK, Alison G.; GRONDZIK, Walter T. **Manual de arquitetura ecológica**. 2. ed. Porto Alegre, Bookman, 2013. 422 p.

LABAKI, Lucila C.; BUENO-BARTHOLOMEI, Carolina L. Avaliação do conforto térmico e luminoso de prédios escolares da rede pública, Campinas – SP. In VII Encontro Nacional e III Encontro Latino-Americano sobre Conforto no Ambiente Construído – ENCAC 2001. **Anais [...]**. São Pedro, SP. 2001.

LAMBERTS, R.; TRIANA, M.A. **Levantamento do estado da arte: Energia**. São Paulo, 2007. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/317880741_Levantamento_do_estado_da_arte_Energia_Projeto_Tecnologias_para_construcao_habitacional_mais_sustentavel. Acesso em: 03 de agosto de 2022.

LAMBERTS, Roberto; DUTRA, Luciano; PEREIRA, Fernando O. R. **Eficiência energética na arquitetura**. 3ª edição. Rio de Janeiro, Eletrobrás/Procel, 2014. 366p.

LAMBERTS, Roberto; SCALCO, Veridiana Atanásio; FOSSATI, Michele; MONTES, Maria Andrea Triana; VERSAGE, Rogério de Souza. Brasil, Plano Nacional de Eficiência Energética, etiquetagem e o selo Casa Azul da Caixa. In GONÇALVES, J. C. S.; BODE, K. **Edifício ambiental**. São Paulo, Oficina de Textos, 2015. Cap. 22. 543-571 p.

LEITE, Ellen Flávia Weis; HACKENBERG, Ana Mirthes. Eficiência energética de envoltória: Comparação dos métodos de avaliação RTQ-C e INI-C através de estudo de caso. **Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental**, Florianópolis, v. 9, n. esp, p. 532-552, fev. 2020.

MARTINS, F. B.; GONZAGA, G.; SANTOS, D. F.; REBOITA, M. S. Classificação climatológica de Köppen e de Thornthwaite para Minas Gerais: Cenário atual e projeções futuras. **Revista Brasileira de Climatologia**. Ano 1, nov. 2018. Disponível em: <https://ojs.ufgd.edu.br/index.php/rbclima/article/view/14064/7305>. Acesso em: 03 de agosto de 2022.

MASCARÓ, Juan Luis. **O custo das decisões arquitetônicas**. 5. Ed. Porto Alegre, Masquatro Editora, 2010. 192p.

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO. **Análise sobre a expansão das universidades federais 2003 a 2012**. Brasília, MEC, 2012. Disponível em:

http://portal.mec.gov.br/index.php?option=com_docman&view=download&alias=12386-analise-expansao-universidade-federais-2003-2012-pdf&Itemid=30192. Acesso em: 25 de julho de 2019.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Guia prático de eficiência energética: reunindo a experiência prática do programa de etiquetagem**: Ministério do Meio Ambiente e Ministério da Cultura. Brasília, MMA, 2014. 93 p.

NETTO, Carmo G. Um olhar sobre a arquitetura escolar. **Jornal da UNICAMP**. Campinas, n. 586, dez. 2013. Disponível em: <http://www.unicamp.br/unicamp/ju/586/um-olhar-sobre-arquitetura-escolar>. Acesso em: 25/07/2019.

OLGYAY, Victor. **Arquitectura y clima: manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas**. Barcelona, Gustavo Gili, 1998. 203p.

PAULSE, Pablo de Caldas. **Análise do desempenho termo energético de escolas públicas segundo aplicação do RTQ-C para a envoltória**. 2016. 129 f. Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-Graduação em Projeto e Cidade. Universidade Federal de Goiás – UFG, Goiânia, GO, 2016.

PBE-EDIFICA. **PBE-EDIFICA**. Etiquetagem de edificações comerciais e de serviços. 2019. Disponível em: <http://www.pbeedifica.com.br>. Acesso em: 25 de julho de 2019.

PIMENTEL, Breno Pontes; BARBOSA, Andréa Teresa Riccio. Etiquetagem energética de uma edificação militar pelas metodologias dos regulamentos brasileiros RTQ-C e INI-C. **Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental**, Florianópolis, v. 9, n. esp, p. 631-647, mai. 2020.

PIMENTEL, Breno Pontes; SILVA, Arthur Santos; BARBOSA, Andréa Teresa Riccio; REIS, Marcelo de Miranda. Comparação dos métodos simplificado e de simulação propostos no novo regulamento brasileiro de etiquetagem de edificações públicas. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 21, n. 4, p. 179-200, out./dez. 2021.

PINHEIRO, Manuel Duarte. **Ambiente e construção sustentável**. Zambujal, Instituto do ambiente, 2006. 241 p.

PINTO, Gelson de Almeida; BUFFA, Ester. **Arquitetura e educação: campus universitários brasileiros**. São Carlos, EdUFSCar, 2009. 151 p.

PIRES, Josiane Reschke *et al.* Norma de desempenho 15.575/2013: Análise de casos das exigências de conforto térmico em projetos de habitação de interesse social. In: Euro ELECS 2015. Guimarães, Portugal. **Anais [...]**. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/286777730_Euro-ELECS_2015_-_Book_of_Proceedings_-_Volumes_1_2_and_3/citations. Acessado em: 08 de março de 2019.

PRADO, Clarice Gavazza dos Santos. **Eficiência energética em edificações públicas: aplicação em projeto padrão de fóruns do poder judiciário alagoano**. 2018. 122 f. Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-Graduação em Dinâmica do espaço Habitado. Universidade Federal de Alagoas. Maceió, AL, 2018.

QUEIROZ, Francisco Caio Bezerra; SILVA, Wiriany Kátia Ferreira; RODRIGUES, Clara Ovídio de Medeiros. Análise de pré-requisitos da etiqueta PBE-Edifica do Bloco dos Professores da Universidade Federal Rural do semi-árido. Simpósio Brasileiro Online de Gestão Urbana. **Anais [...]**. Disponível em: <https://www.eventoanap.org.br/data/inscricoes/4360/form251815970.pdf>. Acesso em: 28/03/2022.

ROAF, Sue; CRICHTON, David; NICOL, Fergus. **A adaptação de edificações e cidades às mudanças climáticas**. Porto Alegre, Bookman, 2009. 384 p.

ROAF, Sue; FUENTES, Manuel; THOMAS-REES. **ECOHOUSE: a casa ambientalmente sustentável**. Porto Alegre, Bookman, 2014. 456 p.

RODRIGUES, Gêssica Mara. **Análise de metodologias para avaliação da eficiência energética de edificações públicas**. 2020. 130 f. Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG, 2020.

ROMERO, Marcelo de Andrade; REIS, Lineu Belico dos. **Eficiência energética em edifícios**. Barueri, Manole, 2012. 195 p.

ROMERO, Marta Adriana Bustos. **A arquitetura bioclimática do espaço público**. Brasília, Editora Universidade de Brasília, 2015. 226 p.

RORIZ, Maurício. **Classificação de climas no Brasil – Versão 3.0**. ANTAC. Grupo de Trabalho sobre conforto ambiental e eficiência energética de edificações. São Carlos, 2014.

SANTOS, Ruani Burock dos; COSTA, Camila Manzano; BRASIL, Paula de Castro. Sustentabilidade nas edificações comerciais: Uma abordagem da certificação AQUA – Alta Qualidade Ambiental. In: 3º Seminário Nacional de Construções Sustentáveis. **Anais [...]**. Paço Fundo, 2014.

SCALCO, Veridiana A. et al. Análise do potencial de economia baseado em edificações comerciais etiquetadas. In: XV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. **Anais [...]**. Maceió, 2014.

SILVA, Vanessa Gomes. Indicadores de sustentabilidade de edifícios: estudo da arte e desafios para o desenvolvimento no Brasil. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 7, n. 1, p. 47-66, jan./mar. 2007.

SILVA, Vanessa Gomes; SILVA, Maristela Gomes; AGOPYAN, Vahan. Avaliação de edifícios no Brasil: da avaliação ambiental para avaliação de sustentabilidade. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 3, n. 3, p. 7-18, jul./set. 2003.

SMITH, Peter F. **La arquitectura en un clima de cambio: una guía para el diseño sostenible**. Barcelona, Reverté, 2017. 322 p.

SZOKOLAY, Steven V. **Introdução à ciência arquitetônica: a base do projeto sustentável**. São Paulo, Editora Perspectiva, 2019. 400p.

UNIFAL-MG – UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS. **UNIFAL-MG em números**. Pró-Reitoria de Planejamento, Orçamento e Desenvolvimento Institucional. Alfenas: UNIFAL-MG, 2015. Disponível em: <http://www.unifal-mg.edu.br/planejamento/unifal-em-numeros>. Acesso em: 25 de julho de 2019.

VERAS, Mariana R. **Sustentabilidade na habitação de interesse social na cidade de São Paulo: análise de obras**. 2013. 127 f. Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo. Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, SP, 2013.

YIN, Robert K. **Estudo de caso: planejamento e método**. Porto Alegre, Bookman, 2001. 205 p.

APÊNDICE A – TABELAS

Tabela 21 – Parâmetros usados no metamodelo – Pavimento Térreo.

Parâmetros	Pavimento Térreo				
	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5
Área (m ²)	240,30	82,50	240,30	82,50	674,80
Contato com o solo?	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Zona sobre pilotis?	Não	Não	Não	Não	Não
Possui cobertura exposta?	Não	Não	Não	Não	Não
Possui isolamento do piso?	Não	Não	Não	Não	Não
Tipo de zona?	Perimetr al	Perimetr al	Perimetr al	Perimetr al	Interna
Orientação solar	N	L	S	O	-
DPE – Densidade de potência de equipamentos (W/m ²)	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0
DPI – Densidade de potência de iluminação (W/m ²)	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4
FS – Fator solar do vidro (adimensional)	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82
Uvid – Transmitância térmica do vidro (W/m ² K)	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7
αCOB – Absortância da cobertura (adimensional)	-	-	-	-	-
αPAR – Absortância da parede (adimensional)	38	38	38	38	-
Pé-direito (m)	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
PAF – Percentual de área de abertura da fachada (%)	0,37	0,38	0,37	0,38	-
AHS – Ângulo horizontal de sombreamento (°)	0	0	0	0	-
AVS – Ângulo vertical de sombreamento (°)	32	32	32	32	-
AOV – Ângulo de obstrução da vizinhança (°)	0	0	0	0	-
Horas de ocupação (h)	8	8	8	8	8
Ucob – Transmitância térmica da cobertura (W/m ² K)	-	-	-	-	-
Upar – Transmitância térmica da parede externa (W/m ² K)	1,9	1,9	1,9	1,9	-
CTcob – Capacidade térmica da cobertura (KJ/m ² K)	-	-	-	-	-
CTpar – Capacidade térmica da parede externa (KJ/m ² K)	152,7	152,7	152,7	152,7	-

Fonte: autor, 2022.

Tabela 22 – Parâmetros usados no metamodelo – Pavimentos Intermediários.

Parâmetros	Pavimentos Intermediários				
	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5
Área (m ²)	240,30	82,50	240,30	82,50	674,80
Contato com o solo?	Não	Não	Não	Não	Não
Zona sobre pilotis?	Não	Não	Não	Não	Não
Possui cobertura exposta?	Não	Não	Não	Não	Não
Possui isolamento do piso?	Não	Não	Não	Não	Não
Tipo de zona?	Perimetr al	Perimetr al	Perimetr al	Perimetr al	Interna
Orientação solar	N	L	S	O	-
DPE – Densidade de potência de equipamentos (W/m ²)	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0
DPI – Densidade de potência de iluminação (W/m ²)	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3
FS – Fator solar do vidro (adimensional)	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82
Uvid – Transmitância térmica do vidro (W/m ² K)	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7
α COB – Absortância da cobertura (adimensional)	-	-	-	-	-
α PAR – Absortância da parede (adimensional)	38	38	38	38	-
Pé-direito (m)	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
PAF – Percentual de área de abertura da fachada (%)	0,37	0,38	0,37	0,38	-
AHS – Ângulo horizontal de sombreamento (°)	0	0	0	0	-
AVS – Ângulo vertical de sombreamento (°)	32	32	32	32	-
AOV – Ângulo de obstrução da vizinhança (°)	0	0	0	0	-
Horas de ocupação (h)	8	8	8	8	8
Ucob – Transmitância térmica da cobertura (W/m ² K)	-	-	-	-	-
Upar – Transmitância térmica da parede externa (W/m ² K)	1,9	1,9	1,9	1,9	-
CTcob – Capacidade térmica da cobertura (KJ/m ² K)	-	-	-	-	-
CTpar – Capacidade térmica da parede externa (KJ/m ² K)	152,7	152,7	152,7	152,7	-

Fonte: Autor, 2022.

Tabela 23 – Parâmetros usados no metamodelo – Pavimento Cobertura.

Parâmetros	Pavimento Cobertura				
	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5
Área (m ²)	240,30	82,50	240,30	82,50	674,80
Contato com o solo?	Não	Não	Não	Não	Não
Zona sobre pilotis?	Não	Não	Não	Não	Não
Possui cobertura exposta?	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Possui isolamento do piso?	Não	Não	Não	Não	Não
Tipo de zona?	Perimetr al	Perimetr al	Perimetr al	Perimetr al	Interna
Orientação solar	N	L	S	O	-
DPE – Densidade de potência de equipamentos (W/m ²)	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0
DPI – Densidade de potência de iluminação (W/m ²)	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5
FS – Fator solar do vidro (adimensional)	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82
Uvid – Transmitância térmica do vidro (W/m ² K)	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7
α COB – Absortância da cobertura (adimensional)	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
α PAR – Absortância da parede (adimensional)	38	38	38	38	-
Pé-direito (m)	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
PAF – Percentual de área de abertura da fachada (%)	0,37	0,38	0,37	0,38	-
AHS – Ângulo horizontal de sombreamento (°)	0	0	0	0	-
AVS – Ângulo vertical de sombreamento (°)	32	32	32	32	-
AOV – Ângulo de obstrução da vizinhança (°)	0	0	0	0	-
Horas de ocupação (h)	8	8	8	8	8
Ucob – Transmitância térmica da cobertura (W/m ² K)	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
Upar – Transmitância térmica da parede externa (W/m ² K)	1,9	1,9	1,9	1,9	-
CTcob – Capacidade térmica da cobertura (KJ/m ² K)	237,1	237,1	237,1	237,1	237,1
CTpar – Capacidade térmica da parede externa (KJ/m ² K)	152,7	152,7	152,7	152,7	-

Fonte: Autor, 2022.