



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO

Fabíola Deckert Arndt

**MÉTODO PARA ANÁLISE E CLASSIFICAÇÃO DE VIDROS COM BASE NO
DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS**

Florianópolis
2021

Fabiola Deckert Arndt

**MÉTODO PARA ANÁLISE E CLASSIFICAÇÃO DE VIDROS COM BASE NO
DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Orientador: Prof. Fernando Simon Westphal, Dr.

Coorientador: Prof. Martin Ordenes Mizgier, Dr.

Florianópolis

2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Arndt, Fabíola Deckert

Método para análise e classificação de vidros com base no desempenho térmico de edificações residenciais / Fabíola Deckert Arndt ; orientador, Fernando Simon Westphal, coorientador, Martin Ordenes Mizgier, 2021.

125 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Florianópolis, 2021.

Inclui referências.

1. Arquitetura e Urbanismo. 2. Regressão multivariada.. 3. Simulação paramétrica.. 4. Desempenho térmico.. 5. Classificação de vidros.. I. Westphal, Fernando Simon . II. Mizgier, Martin Ordenes. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós Graduação em Arquitetura e Urbanismo. IV. Título.

Fabíola Deckert Arndt

Método para análise e classificação de vidros com base no desempenho térmico de edificações residenciais

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. José Ripper Kós, Dr.

UFSC

Prof. Saulo Güths, Dr.

UFSC

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Prof. Fernando Simon Westphal, Dr.

Orientador

Florianópolis, 2021.

A mente que se abre a uma nova ideia
jamais voltará ao seu tamanho original.

(Albert Einstein)

Dedico este trabalho a minha mãe, Magali Deckert Arndt.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, que me capacitou e permitiu que tudo fosse realizado.

Ao professor Fernando Simon Westphal, pela sua dedicada orientação, paciência e ensinamentos. Além disso, também o agradeço pela imersão e incentivo à pesquisa, que era algo completamente novo para mim.

Ao professor Martin Ordenes Mizgier pelas suas contribuições. Aos professores Saulo Güts e José Ripper Kós pelas críticas e sugestões na fase de qualificação desta pesquisa e também por aceitarem prontamente o convite para participar da avaliação final deste trabalho.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de estudos concedida durante o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos meus colegas e amigos do LabCon – UFSC, por toda a ajuda e companhia durante esta caminhada. As amigas que o mestrado me trouxe, pela parceria que fez com que o desenvolvimento desta dissertação se tornasse mais leve.

A toda a minha família, que sempre esteve ao meu lado, apoiando em todas as decisões da minha vida. Ao meu pai Carlo Leandro Mousquer Arndt, e também ao meu avô e bisavô, que foram os exemplos que me inspiraram a escolher a minha profissão. A minha mãe, Magali Deckert Arndt, professora apaixonada e dedicada, que me incentivou a sempre buscar conhecimento e educação.

E finalmente, eu agradeço ao meu marido e amigo Gilberto da Silva Falk, que me encorajou a entrar no mundo acadêmico, pelas suas contribuições para esta pesquisa e também pelo apoio e compreensão ao longo de todo o trabalho. Seu amparo nas horas difíceis foi essencial nessa jornada.

RESUMO

O objetivo geral desta pesquisa é propor um método para classificação do desempenho de vidros considerando o consumo de energia resultante para resfriamento e aquecimento de edificações residenciais para os climas brasileiros. O mundo está enfrentando uma "crise fria" iminente. Políticas para melhorar o desempenho térmico dos edifícios devem ser desenvolvidas para trazer economia de energia, pois o consumo energético para resfriamento do espaço está crescendo mais rapidamente do que para qualquer outro uso final nas edificações. No Brasil, o setor de edificações composto por residências, comércio e edifícios públicos representou 51% do consumo total de energia elétrica em 2017. Além disso, foi observado que o consumo de energia elétrica do setor residencial dispôs um crescimento de 61% entre 2005 e 2017. Tal crescimento foi influenciado pela elevação do uso de aparelhos de condicionamento de ar. Ademais, o uso de equipamentos de condicionamento de ar pode mais que dobrar até 2035. Sabe-se que as esquadrias são responsáveis pelo aumento das perdas e ganhos de calor entre a edificação e o ambiente externo, fator que impacta diretamente no desempenho térmico. Sendo assim, esta pesquisa busca classificar os vidros quanto ao consumo de energia para condicionamento de ar, e para isso, o método proposto seguiu alguns passos. Inicialmente realizou-se uma relação de 15 cidades características dos climas do país. Logo após foram definidas 3 tipologias representativas das residências brasileiras, para então selecionar e caracterizar uma amostra de 28 vidros a serem simulados, escolhidos a partir de diferentes valores de fator solar e transmitância térmica. A partir de uma série de simulações paramétricas no programa *EnergyPlus*, foram estudados e definidos indicadores e padrões de referência de desempenho térmico de edificações residenciais em função do tipo de vidro. Equações de regressão foram desenvolvidas para permitir a classificação dos vidros com base nas suas características, a fim de comparar qualquer tipo de produto. Ao analisar a variação de consumo de energia com climatização, foi possível observar um comportamento análogo entre as cidades, as tipologias e os tipos de vidros. Após inúmeros testes, uma equação para prever o consumo por resfriamento e outra para prever o consumo por aquecimento foram obtidas. As equações apresentaram resultados satisfatórios: R^2 de 0,94 para a equação da estimativa do consumo para resfriamento e 0,98 para a equação da estimativa do consumo para aquecimento. Por fim, propôs-se uma classificação do nível de desempenho térmico dos vidros em função das suas propriedades físicas e o conseqüente consumo de energia em climatização.

Palavras-chave: Vidro. Edificações residenciais. Regressão multivariada. Simulação paramétrica.

ABSTRACT

The general goal of this research is to propose a method for classifying the performance of fenestration glazing, considering the energy consumption for cooling and heating residential buildings for Brazilian climates. The world is facing an imminent "cold crisis". Policies to improve the thermal performance of buildings must be developed to bring about energy savings, as energy consumption for space cooling is growing faster than for any other energy use in buildings. In Brazil, residential, commercial and public buildings represents 51% of total electricity consumption in 2017. Furthermore, it was observed that the consumption of electricity in the residential sector had a growth of 61% between 2005 and 2017. This growth was influenced by the increase in the use of air conditioning devices. Furthermore, the use of air conditioning equipment can double by 2035. It is known that fenestration frames are responsible for the increase in heat loss and gain between buildings and the external environment, a factor that directly impacts thermal performance. Thus, this research seeks to classify the fenestration glazing in terms of energy consumption for air conditioning, and for that, the proposed method followed certain steps. Initially, a list of 15 cities characteristic of the country's climates was carried out. Soon after, 3 representative typologies of Brazilian homes were defined, to then select and characterize a sample of 28 glazing to be simulated, chosen from different values of solar heat gain coefficient and thermal transmittance. From a series of parametric simulations in the EnergyPlus program, indicators and benchmarks for the thermal performance of residential buildings were defined as a function of the type of glazing. Regression equations were developed to allow the classification of glazing based on their characteristics, in order to compare any type of product. By analyzing the variation in energy consumption with air conditioning, it was possible to observe an analogous behavior between cities, typologies and types of glazing. After numerous tests, an equation to predict consumption by cooling and another to predict consumption by heating were obtained. The equations presented satisfactory results: R^2 of 0.94 for the equation that estimates energy consumption for cooling and 0.98 for the equation that estimates energy consumption for heating. Finally, a classification of the thermal performance level of the glazing according to their physical properties and the consequent energy consumption in the air conditioning was proposed.

Keywords: Glazing. Residential buildings. Multivariate regression. Parametric simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Crescimento do consumo de eletricidade total e para condicionamento de ar no setor residencial e posse de condicionadores de ar do setor residencial brasileiro, respectivamente.	19
Figura 2 - Participação no consumo final de eletricidade por equipamento no Brasil.	19
Figura 3 - Mapa da divisão dos climas dos EUA e selo de certificação NFRC.	25
Figura 4 - Níveis mínimos de desempenho da etiqueta norte-americana e selo <i>Energy Star</i>	26
Figura 5 - Zoneamento climático e exemplar da etiqueta canadense.	27
Figura 6 - Selo da norma australiana AS 2047:2014.	27
Figura 7 - Divisão climática da Austrália e WERS.	28
Figura 8 - Mapa de zoneamento climático da Nova Zelândia.	30
Figura 9 - Exemplo de etiqueta do Reino Unido e escala de classificação.	30
Figura 10 - Esquema de cálculo e classificação da etiquetagem do Reino Unido.	31
Figura 11 - Etiqueta de energia de esquadria do Irã.	33
Figura 12 - Divisão do consumo final de eletricidade no Brasil em 2017.	34
Figura 13 - Projeção anual de consumo de energia elétrica setorial no Brasil.	34
Figura 14 - Representação de uma esquadria e suas principais partes.	36
Figura 15 - Zoneamento bioclimático brasileiro para análise do nível de conforto térmico de esquadrias.	37
Figura 16 - Modelo de etiqueta do desempenho térmico de esquadrias da Parte 4 da norma ABNT NBR 10821.	38
Figura 17 - Croqui e planta baixa protótipo considerado nas simulações.	39
Figura 18 - Distribuição do índice de energia estimado para o escritório em relação à orientação da esquadria, área de perfil, área de esquadria na fachada principal, coeficiente U e fator solar (g) do envidraçamento.	44
Figura 19 - Distribuição percentual das perdas de calor de um edifício da Noruega.	44
Figura 20 - Demanda de aquecimento e resfriamento, respectivamente, da edificação norueguesa analisada em função do SHGC e coeficiente U.	45
Figura 21 - Economia de energia anual por m ² proporcionada pelas diferentes esquadrias e métodos para a edificação de Bilbao.	47
Figura 22 - Informações dos climas do leste asiático.	50
Figura 23 - Configurações de esquadrias mais eficientes definidos por Lee et al (2013).	50

Figura 24 - Efeito da mudança do coeficiente U no consumo de energia para os climas asiáticos.	51
Figura 25 - Uso anual esperado de energia de iluminação em função do PAF (WWR) nas cinco cidades asiáticas analisadas.	52
Figura 26 - Energia anual economizada (aquecimento + resfriamento) por diferentes tipos de janelas e para diferentes edifícios em Nova Delhi.	54
Figura 27 – Fluxograma dos procedimentos do método.	60
Figura 28 - Zoneamento climático brasileiro sugerido pela ABNT NBR 15220-3 com a localização das cidades selecionadas para esta pesquisa.	61
Figura 29 - Zoneamento climático brasileiro sugerido pela ASHRAE Standard 169 e marcação das cidades analisadas.	62
Figura 30 - Mapa do Brasil com a divisão das regiões brasileiras e marcação das cidades selecionadas para esta pesquisa.	62
Figura 31 - Tipo de domicílio segundo as grandes regiões brasileiras.	64
Figura 32- Perspectivas e plantas esquemáticas TP1 (A), TP2 (B) e TP3 (C).	65
Figura 33 - Comportamento do consumo de energia (kWh) anual por resfriamento nas cidades de Boa Vista, Florianópolis e Rio de Janeiro e para aquecimento na cidade de Curitiba, para os 28 tipos de vidros em relação as três tipologias.	75
Figura 34 - Consumo de energia anual por metro quadrado de vidro (kWh/m ² vidro) por resfriamento nas cidades de Boa Vista, Florianópolis e Rio de Janeiro e para aquecimento na cidade de Curitiba em relação aos 28 tipos de vidros e às três tipologias.	77
Figura 35 - Consumo anual para resfriamento em kWh/m ² proporcionado por cada um dos 28 vidros para a TP2 em todas as cidades simuladas.	78
Figura 36- Consumo anual para aquecimento em kWh/m ² proporcionado por cada um dos 28 vidros para a TP2 em todas as cidades simuladas que apresentaram consumo para aquecimento.	79
Figura 37 - Consumo de energia (kWh) para resfriamento e aquecimento da TP2 e GDR, GDA e radiação solar das cidades de Florianópolis, Boa Vista, Belém, Rio de Janeiro e Curitiba.	80
Figura 38 – Comportamento dos vidros monolíticos, laminados e insulados de Florianópolis, Belém, Boa Vista e Rio de Janeiro frente ao consumo de energia para resfriamento por m ² de vidro e da cidade de Curitiba e Santa Maria para aquecimento.	82
Figura 39 - Consumo de energia (kWh/m ² de vidro) de resfriamento e aquecimento da TP2 comparado com o FS dos vidros nas cidades de Rio de Janeiro, Florianópolis, Belém e Boa Vista para resfriamento e Florianópolis e Curitiba para aquecimento.	84

Figura 40 - Gráficos comparando o consumo anual de energia elétrica por m ² de vidro para resfriamento encontrados por simulação e estimados pela equação 7, para as três tipologias, na cidade de Recife.....	89
Figura 41- Gráficos comparando o consumo anual de energia elétrica por m ² de vidro para resfriamento encontrados por simulação e estimados pela equação 7, para as três tipologias, na cidade do Rio de Janeiro.....	90
Figura 42- Gráficos comparando o consumo anual de energia elétrica por m ² de vidro para aquecimento encontrados por simulação e estimados pela equação 8, para as três tipologias, na cidade de Curitiba.	91
Figura 43 - Percentual de economia de energia para resfriamento dos 28 vidros, 15 cidades e 3 tipologias.	92
Figura 44- Percentual de economia de energia normalizado para resfriamento dos vidros, cidades e tipologias.....	93
Figura 45 - Percentual de economia de energia para resfriamento normalizado dos vidros e seu comportamento nas cidades analisadas.	94

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Matriz SWOT para etiquetagem de esquadrias.....	24
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação de uma amostragem de esquadrias com vidro monolítico e perfis de alumínio segundo a etiquetagem australiana.	29
Tabela 2 - Níveis de desempenho de esquadrias do modelo de etiqueta para esquadrias brasileiro.	37
Tabela 3 - Coeficientes para a Equação 1.....	39
Tabela 4 - Cargas e uso utilizadas nas simulações para a classificação de esquadrias da Parte 4 da norma ABNT NBR 10821.	39
Tabela 5 – Transmitância térmica dos perfis e propriedades dos vidros simulados.....	40
Tabela 6 – Propriedades dos vidros analisados na Espanha.	46
Tabela 7 – Equações geradas para as zonas climáticas de Bilbao e Vitória, na Espanha.	47
Tabela 8 – Índice de energia e classificação obtidos para os vidros analisados nos climas espanhóis.	48
Tabela 9 - Propriedades das esquadrias adotadas no estudo de Lee et al. (2013).	49
Tabela 10 - Valores médios mensais da radiação solar global e temperatura das cinco cidades indianas.	53
Tabela 11 - Diferentes vidros utilizados no estudo de Singh e Garg (2009) e suas propriedades.	53
Tabela 12 – Detalhes dos três tipos de edifícios analisados na Índia.	54
Tabela 13 – Esquadrias selecionadas para as simulações do setor residencial italiano.	56
Tabela 14 – Características dos climas da Itália.	57
Tabela 15 - Tabela com características das cidades selecionadas para análise.	63
Tabela 16 - Propriedades dos materiais das tipologias simuladas.	67
Tabela 17 - Padrão de ocupação e uso da iluminação.	68
Tabela 18 – Propriedades dos vidros simulados.....	69
Tabela 19 – Propriedades dos vidros monolíticos.	70
Tabela 20 – Características do sistema de condicionamento de ar.....	72
Tabela 21 - Variáveis independentes climáticas GDR, GDA e radiação solar global horizontal (média anual).	85
Tabela 22 - Área de piso e de vidro das três tipologias.	86
Tabela 23 - Parâmetros dos vidros testados nesta pesquisa.....	86
Tabela 24 - Percentual de economia de energia para resfriamento normalizados e classificação de cada um dos vidros, nas cidades analisadas.	95

Tabela 25 - Percentual de economia de energia para aquecimento normalizados e classificação de cada um dos vidros, nas cidades analisadas.....	96
Tabela 26 - Tabela dos vidros, propriedades e classificação energética para resfriamento e aquecimento.....	97

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACH - *Air changes per hour*

AFRC - *Australian Fenestration Rating Council*

AGWA - *Australian glass and window association*

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

BEN - Balanço Energético Nacional

BFRC - *British Fenestration Rating Council*

CDD - *Cooling degree day*

Coefficiente U - Transmitância térmica [$W/m^2.K$]

COMFEN - *Commercial Fenestration/Façade Design Tool*

COP - *Coefficient of Performance*

CSA - *Canadian Standards Association*

Emis1 - Emissividade infravermelha da face interna

Emis2 - Emissividade infravermelha da face externa

EPE - Empresa de Pesquisa Energética

EPS – Poliestileno Expansível

EUA - Estados Unidos da América

FS - Fator solar

GDA - Graus-dia de aquecimento [$^{\circ}C.dia$]

GDR - Graus-dia de resfriamento [$^{\circ}C.dia$]

HDD - *Heating degree day*

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IEA - *International Energy Agency*

IGDB – *International Glazing Database*

IGU - *Insulated Glass Unit*

ISO - *International organization for standardization*

Lam – Vidro laminado

LBNL - *Lawrence Berkeley National Laboratory*

LED - *Light Emitting Diode*

MME - Ministério de Minas e Energia

Mon – Vidro monolítico

NATHERS - *Nationwide House Energy Rating Software*

NFRC - *National Fenestration Rating Council*

PAF - Percentual de Abertura da Fachada

PTHP - *Packaged Terminal Heat Pump*

PVC - Policloreto de vinila

Rsol1 - Reflexão solar pela face externa

Rsol2 - Reflexão solar pela face interna

Rvis1 - Reflexão visível pela face externa

Rvis2 - Reflexão visível pela face interna

SHGC - *Solar Heat Gain Coefficient*: coeficiente de ganho de calor solar dos vidros

SWOT - *Strengths, weaknesses, opportunities and threats*

TP1 – Tipologia de 50 m²

TP2 – Tipologia de 70 m²

TP3 – Tipologia de 120 m²

TRNSYS - *Transient System Simulation Tool*

TRY - *Test Reference Year*

Tsol - Transmissão solar

Tvis - Transmissão visível

UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina

WERS - *Window Energy Rating Scheme*

WWR - *Window-to-Wall Ratio*: percentual de área de janelas em relação a área de fachadas da edificação

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
1.1 OBJETIVOS	21
1.1.1 <i>Objetivo Geral</i>	21
1.1.2 <i>Objetivos Específicos</i>	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1 CERTIFICAÇÃO DE ESQUADRIAS	22
2.1.1 <i>Contexto internacional</i>	24
2.1.2 <i>Contexto nacional</i>	33
2.2 INFLUÊNCIA DAS ESQUADRIAS NO DESEMPENHO DE EDIFICAÇÕES	41
2.3 CONSIDERAÇÕES GERAIS	59
3 DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO.....	60
3.1 ZONEAMENTO CLIMÁTICO	60
3.2 DEFINIÇÃO DOS MODELOS DE SIMULAÇÃO	63
3.3 SELEÇÃO DOS PARÂMETROS DE ENTRADA	68
3.4 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	70
3.5 INDICADORES DE DESEMPENHO	72
4 RESULTADOS	75
4.1 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES PARAMÉTRICAS	75
4.2 DESENVOLVIMENTO DAS EQUAÇÕES	84
4.3 CLASSIFICAÇÃO DOS VIDROS	92
5 CONCLUSÕES.....	99
5.1 LIMITAÇÕES DO MÉTODO	101
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	102
REFERÊNCIAS	103
APÊNDICE	107

1. INTRODUÇÃO

É por meio das esquadrias que os usuários das edificações percebem o ambiente externo, como: as ações da vida ao ar livre, a passagem do tempo deduzido da mudança da posição do sol, a mudança do clima e assim por diante. As esquadrias têm um papel fundamental para melhorar a qualidade de vida e o conforto dos residentes. Segundo Lopes et al. (2009), nos dias atuais é percebida uma grande preocupação em torno da qualidade das esquadrias, visto que podem influenciar diretamente no desempenho energético da edificação, bem como no dimensionamento e funcionamento de sistemas de condicionamento de ar e iluminação.

A especificação incorreta das esquadrias pode causar efeitos adversos no conforto ambiental e no uso da energia. De uma forma geral, as esquadrias são responsáveis pelo aumento das perdas e ganhos de calor entre a edificação e o ambiente externo, fator que impacta diretamente no desempenho térmico das edificações, o que tem estimulado pesquisas em níveis nacional e internacional com foco em melhorar os sistemas de esquadrias, como forma de trazer uma maior economia de energia às edificações.

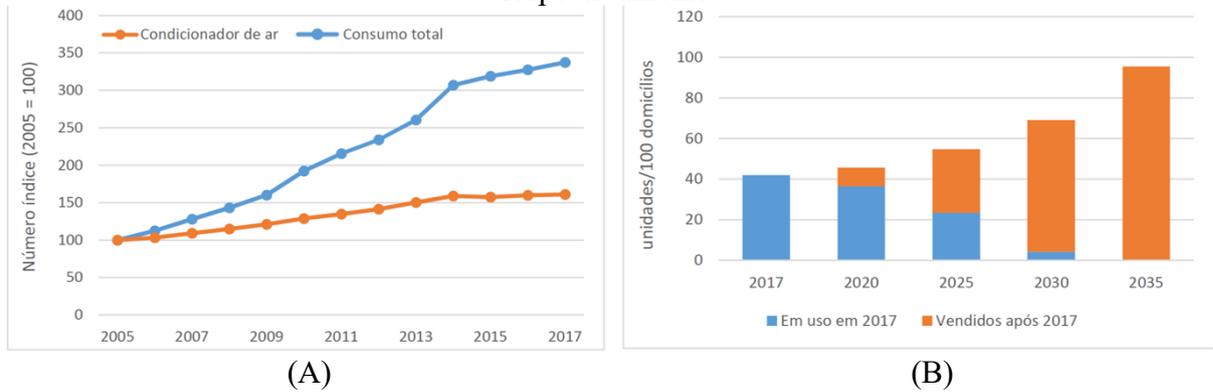
A geração e conservação de energia vem sendo uma preocupação crescente no setor da construção civil, influenciado principalmente pela percepção da sociedade moderna com relação às fontes limitadas de energias não-renováveis. Neste contexto, diversos países estão buscando alternativas de geração de energia, bem como novas e otimizadas formas de redução do consumo, levando a investimentos em novas tecnologias para melhorar o desempenho térmico de produtos, a fim de reduzir o consumo de energia das edificações.

Segundo a *International Energy Agency* (IEA, 2018), o mundo está enfrentando uma "crise fria" iminente. Políticas para melhorar o desempenho térmico dos edifícios devem ser desenvolvidas para trazer economia de energia a longo prazo. O uso de energia para resfriamento do espaço está crescendo mais rapidamente do que para qualquer outro uso final nas edificações. Esta demanda é impulsionada pelo crescimento econômico e populacional nos países em desenvolvimento, que ficam nas regiões mais quentes do mundo.

No Brasil, o setor de edificações composto por residências, comércio e edifícios públicos, representou 51% do consumo total de energia elétrica em 2017. Além disso, foi observado que o consumo de energia elétrica do setor residencial dispôs um crescimento de 61% entre 2005 e 2017. Tal crescimento foi fortemente influenciado pela elevação do uso de aparelhos de condicionamento de ar, como ilustrado na Figura 1-A. Ademais, o uso de equipamentos de condicionamento de ar pode mais que dobrar até 2035. A Figura 1-B

demonstra a evolução da posse de aparelhos nas residências no horizonte analisado (EPE, 2018).

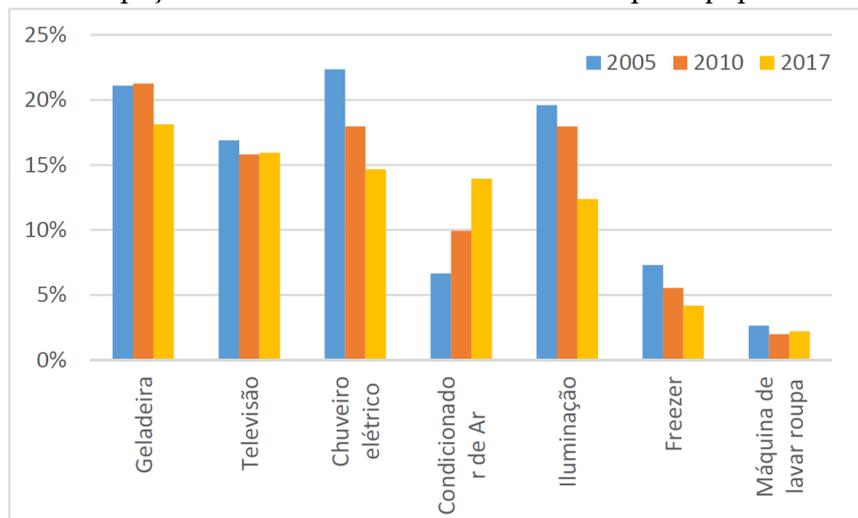
Figura 1 - Crescimento do consumo de eletricidade total e para condicionamento de ar no setor residencial e posse de condicionadores de ar do setor residencial brasileiro, respectivamente.



Fonte: EPE (2018).

Na Figura 2 é possível observar a participação do consumo final de eletricidade por equipamento no Brasil. Apesar dos aparelhos estarem cada dia mais eficientes, o consumo de eletricidade com ar condicionado praticamente dobrou do ano 2005 para o ano de 2017 (EPE, 2018).

Figura 2 - Participação no consumo final de eletricidade por equipamento no Brasil.



Fonte: EPE (2018).

Segundo uma pesquisa feita pelo MME (2007), cerca de 90% das esquadrias instaladas nas residências brasileiras são compostas de vidros simples incolores, sem nenhum tipo de controle solar. Sendo assim, o uso de esquadrias mais eficientes deve ser incentivado, e este

incentivo pode ocorrer por meio de processos de certificação. A certificação é um mecanismo importante para regulação do desempenho de elementos da edificação. Os padrões brasileiros de eficiência energética para edifícios ainda estão em desenvolvimento e alguns esforços estão sendo feitos para estabelecer níveis mínimos de desempenho térmico para sistemas e elementos de construção.

Um exemplo desses esforços é a introdução da etiqueta de desempenho térmico de esquadrias na Norma Brasileira de Esquadrias para Edificações, NBR 10821-4 (ABNT, 2017b). Essa etiqueta classifica o nível de conforto térmico proporcionado por cada tipo de esquadria em edificações residenciais ventiladas naturalmente.

Nesse contexto, esta pesquisa visa desenvolver, por meio de simulações computacionais integradas, um método para analisar e classificar o desempenho de vidros para edificações residenciais. Com isso, espera-se colaborar para melhorar a especificação de vidros e otimizar o uso de energia das habitações brasileiras. Esta análise foi elaborada com base nos estudos e etiquetas já desenvolvidos e aplicados em outros países.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Propor um método para classificação do desempenho de vidros considerando o consumo de energia resultante para resfriamento e aquecimento de edificações residenciais para os climas brasileiros.

1.1.2 Objetivos Específicos

- a) Definir uma relação de cidades características dos climas brasileiros, que representem a variação no desempenho térmico de vidros em todo o território;
- b) Estabelecer modelos de simulação, representativos das residências brasileiras, para analisar a influência dos vidros no desempenho das edificações;
- c) Definir os vidros a serem simulados, presentes atualmente no mercado brasileiro, e caracterizá-los;
- d) Encontrar indicadores e padrões de referência de desempenho térmico de edificações residenciais em função do tipo de vidro;
- e) Desenvolver equações de regressão para prever o consumo de energia para condicionamento de ar dos vidros com base nas suas características;
- f) Elaborar a classificação energética dos vidros, com o intuito de comparar produtos com funcionalidade similar.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo aborda a revisão dos principais conceitos e métodos de pesquisa de acordo com os objetivos deste trabalho. Inicialmente, será apresentada a experiência internacional em classificação de esquadrias. Em seguida, será mostrado o panorama nacional sobre o tema. Por fim, serão abordados estudos que trataram da influência e análise de esquadrias no desempenho térmico, bem como no consumo de energia elétrica para resfriamento e aquecimento de edificações.

2.1 CERTIFICAÇÃO DE ESQUADRIAS

Os programas de etiquetagem, em geral, visam reduzir a demanda por energia e envolvem basicamente duas estratégias para atingir esse objetivo. A primeira delas é fornecer informações aos consumidores sobre o consumo de energia relacionado ao uso desses produtos, bem como os custos ambientais e financeiros associados. A intenção é influenciar a decisão do consumidor e incentivar a aquisição e utilização de produtos eficientes. Já a segunda estratégia é usar o fato de que as etiquetas apresentam comparação entre o desempenho de produtos concorrentes para influenciar os fabricantes no sentido de aumentar a eficiência dos produtos que oferecem aos consumidores, favorecendo, portanto, o desenvolvimento tecnológico (IEA, 2000).

Os modelos de classificação de esquadrias fornecem uma base comum para comparar diferentes produtos baseados no desempenho energético. Esses modelos combinam propriedades como o fator solar, a transmitância térmica e a infiltração de ar em um único número representativo do desempenho energético da esquadria. Eles disponibilizam um meio simples para projetistas e clientes finais selecionarem a melhor esquadria de acordo com o desempenho de energia para um determinado edifício e condições climáticas (SINGH e GARG, 2009).

Diversos sistemas de classificação de energia de esquadrias, chamados WERS (*Window Energy Rating Scheme*), foram desenvolvidos em diferentes países. A *Canadian Standards Association* (CSA) desenvolveu o primeiro WERS (Carpenter et al., 1998), desde então, outros países como os Estados Unidos (Crooks et al., 1995), Austrália (Ballinger e Lyons, 1996), Itália (Maccari e Zinzi, 2001), Nova Zelândia (Burgess e Skates, 2001) e Dinamarca (Duer et al., 2002) também implantaram os WERS com o intuito de fornecer informações rápidas e precisas

quanto ao desempenho das esquadrias e também incentivar o desenvolvimento e o uso apropriado de vidros e esquadrias de alto desempenho (Tian et al., 2010).

Diversos estudos, abordados no próximo capítulo, mostraram que a utilização correta de esquadrias leva a uma economia significativa de energia em edifícios. Porém, muitos dos atuais WERSs não consideram o aproveitamento de luz natural, enquanto a maioria das análises de iluminação natural não leva em conta a influência das esquadrias nos ganhos de calor por convecção e infiltração. Os WERSs levam em consideração principalmente três fatores: condução de calor, infiltração de ar e ganho de calor solar (Tian et al., 2010).

As esquadrias representam um papel importante no desempenho energético e, portanto, devem ser escolhidas de maneira criteriosa. Definir um sistema de classificação de energia é algo complexo, pois sua eficiência depende do clima, do tipo de construção e da orientação solar. Portanto, a classificação não será um indicador absoluto da eficiência energética que a esquadria proporcionará. O desempenho pode variar e é difícil generalizar devido ao número de fatores envolvidos (clima, edificação, cargas internas, infiltração, ventilação, entre outros). No entanto, um sistema de classificação permitirá que várias esquadrias sejam comparadas sob as mesmas condições (URBIKAIN E SALA, 2009).

As etiquetas podem ser de dois tipos: etiquetas de endosso (*endorsement labels*) e etiquetas comparativas (*comparative labels*). As etiquetas de endosso podem ser entendidas como um selo de aprovação concedido de acordo com critérios específicos. As etiquetas comparativas permitem que o consumidor compare produtos similares utilizando categorias ou escalas de desempenho. Os programas de etiquetagem podem ser voluntários ou obrigatórios (EPE, 2018).

O principal objetivo das etiquetas é informar o consumidor sobre o nível de eficiência energética de edificações, equipamentos e instalações, comparando produtos com funcionalidade similar, promovendo a transparência de mercado e contribuindo com o aumento da demanda por soluções energeticamente mais eficientes.

Com base nos resultados dos cálculos desenvolvidos em sua pesquisa e de acordo com a experiência relativa aos sistemas de certificação existentes, Trzaski e Rucińska (2015) criaram uma matriz SWOT (*Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats*), apresentada no Quadro 1.

Quadro 1 - Matriz SWOT para etiquetagem de esquadrias.

FATORES INTERNOS	FORÇAS	FRAQUEZAS
	<ul style="list-style-type: none"> • Mais preciso do que a comparação da transmitância térmica; • Menos demorado do que a simulação de todo o edifício; • A classificação da esquadria não muda radicalmente devido a diferenças na característica do edifício ou clima local; • Um sistema de certificação permite ter em conta uma ampla gama de parâmetros da esquadria; • Possibilidade de levar em conta parâmetros adicionais (como dispositivos de sombreamento e regulamentação). 	<ul style="list-style-type: none"> • O desempenho energético real depende das condições climáticas e da característica energética do edifício • Janelas feitas dos mesmos componentes mas com dimensões diferentes podem ter várias características energéticas • Falhas no sistema de certificação podem levar a uma menor eficiência energética dos edifícios
FATORES EXTERNOS	OPORTUNIDADES	AMEAÇAS
	<ul style="list-style-type: none"> • Fácil de usar para pessoas que não têm conhecimento técnico; • Um sistema de certificação baseado no balanço energético permite avaliar os benefícios reais para os consumidores; • Pode melhorar o conhecimento dos consumidores sobre o desempenho real das esquadrias; • Pode incentivar os fabricantes a melhorarem seus produtos; • Um método uniforme em diferentes países permite uma avaliação mais fácil dos produtos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Concorrência desleal, o sistema pode ser influenciado para promover soluções específicas • Sistema detalhado demais pode confundir os consumidores

Fonte: Adaptado de Trząski e Rucińska (2015).

2.1.1 Contexto internacional

Governos e empresas de inúmeros países têm formado organizações que regulamentam o setor por meio de normas e sistemas de certificação e etiquetagem para esquadrias de edificações residenciais. A seguir estão apresentados alguns destes sistemas.

Nos Estados Unidos existem dois programas relacionadas à certificação de esquadrias em edificações residenciais: o *National Fenestration Rating Council* (NFRC) e o *Energy Star*.

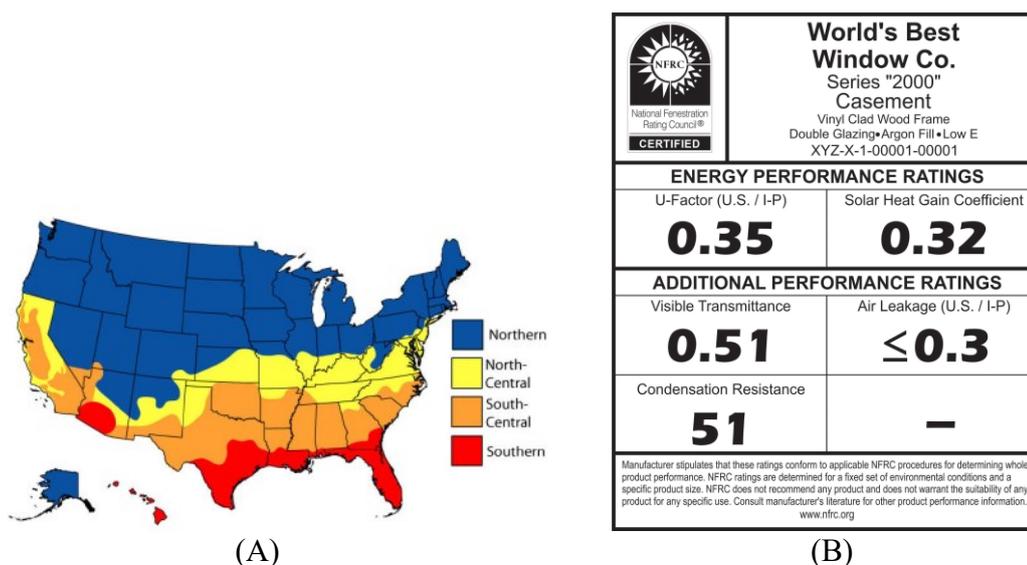
O NFRC, que teve início em 1989, é uma organização sem fins lucrativos, de parceria pública e privada, criado pelo setor de esquadrias, portas e aberturas dos Estados Unidos.

Atualmente, existem mais de 81 mil produtos cadastrados. O programa tem como objetivo principal fornecer informações de desempenho energético de esquadrias, permitindo a comparação de produtos.

O programa estabeleceu um sistema nacional de etiquetagem que avalia a transmitância térmica, o fator solar, a transmissão de luz visível e a infiltração de ar. Neste selo, não é realizada uma classificação entre produtos (superior e inferior), nem são estabelecidos padrões mínimos de desempenho energético. A certificação divide o país em quatro zonas climáticas (Figura 3-A) e obedece às seguintes etapas: desenvolvimento de padrões (normas) para que as avaliações dos produtos ocorram de maneira uniforme; avaliação e aprovação de ferramentas computacionais e procedimentos de testes; listagem de laboratórios qualificados para realização de testes e simulações computacionais a fim de determinar o desempenho dos produtos e; fornecimento dos resultados para um agente independente avaliar, rever a documentação, conduzir inspeções e aprovar o processo de licenciamento dos fabricantes para utilizarem os selos de certificação em seus produtos (MARINOSKI, 2005).

Este selo é aplicado a todos os produtos certificados e tem um formato padrão onde é apresentada a marca do NFRC, a descrição do produto, a empresa fabricante, o nome da agência independente de fiscalização do processo de certificação e os índices de desempenho avaliados. Um exemplar do selo está apresentado na Figura 3-B.

Figura 3 - Mapa da divisão dos climas dos EUA e selo de certificação NFRC.

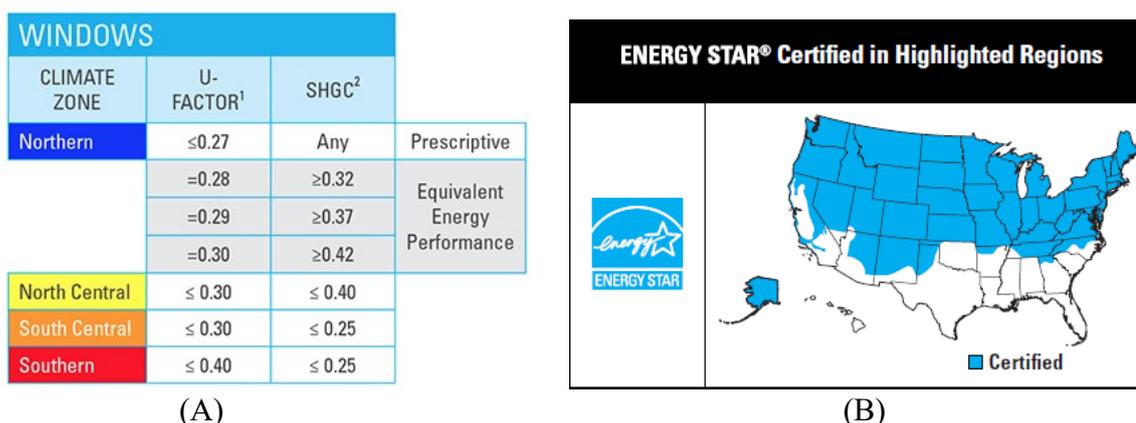


Fonte: <https://www.nfrc.org/>.

Por sua vez, o selo *Energy Star* foi criado como um programa voluntário para promover inovações de economia de energia, fornecendo aos consumidores informações

objetivas sobre os produtos. Ele considera o coeficiente U (transmitância térmica) - taxa de calor que atravessa o vidro, por unidade de área em metro quadrado, quando submetida a uma diferença de temperatura de 1 K entre a superfície externa e interna (ABNT, 2017b) – e o FS (fator solar) - parcela de radiação solar incidente no vidro que o atravessa na forma de calor, incluindo a taxa de radiação solar que é transmitida através do vidro e a parcela absorvida e posteriormente retransmitida para o interior (ABNT, 2017b). O selo informa que um produto é energeticamente eficiente e é atribuído às esquadrias que têm seu coeficiente U e FS nos níveis limites ou que excedam os critérios de qualificação do NFRC. Os limites de classificação estão apresentados na Figura 4-A e um exemplo do selo pode ser visto na Figura 4-B, que destaca, em azul, as regiões onde a esquadria certificada é qualificada.

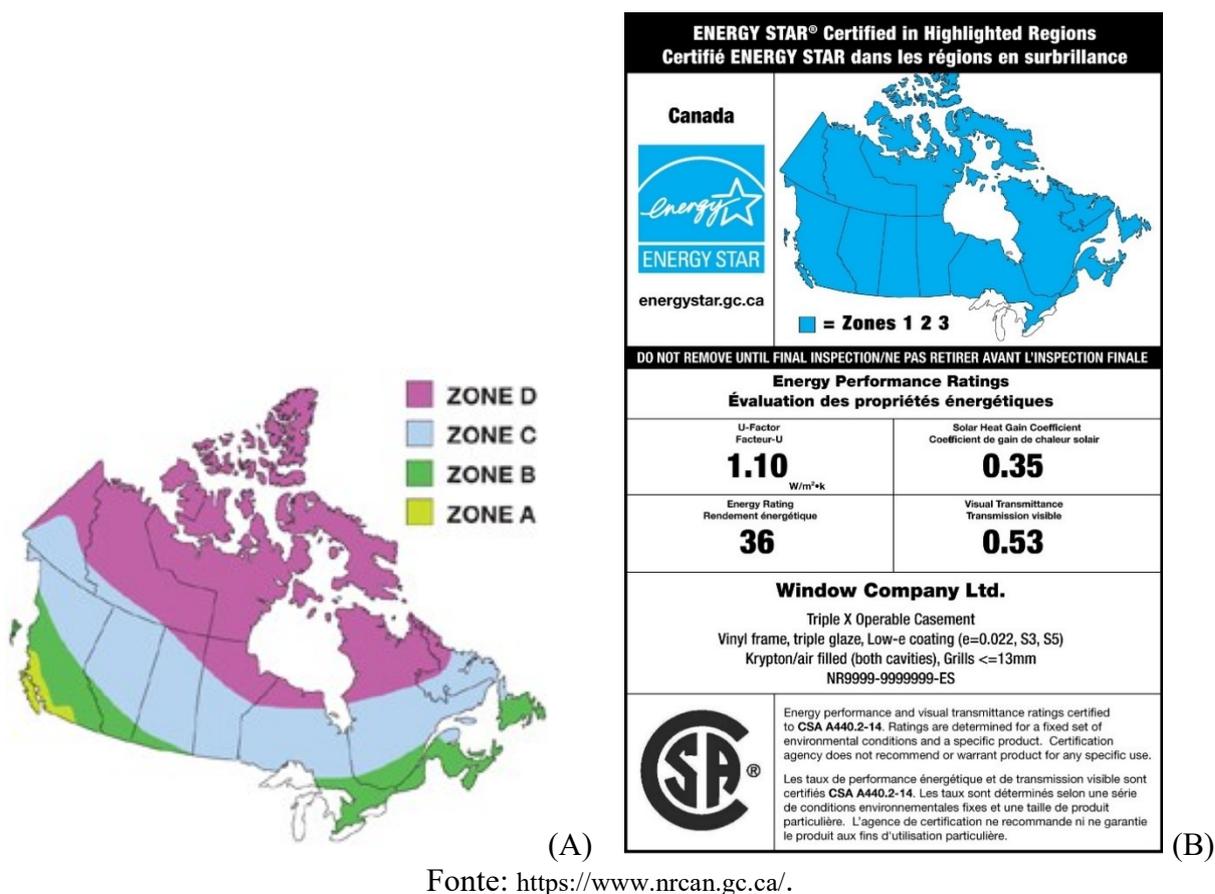
Figura 4 - Níveis mínimos de desempenho da etiqueta norte-americana e selo *Energy Star*.



Fonte: <https://www.energystar.gov/>.

O selo canadense segue basicamente o sistema norte-americano, possui divisão por quatro zonas climáticas (Figura 5-A) e é uma função linear do FS, coeficiente U e infiltração de ar (Carpenter et al., 1998). O coeficiente U e o FS foram determinados utilizando os programas computacionais validados *FRAME* e *VISION*, respectivamente. Nenhum sombreamento foi utilizado e o efeito do comportamento do ocupante foi desconsiderado no modelo (Tian et al., 2010). O WERS canadense exige um nível mínimo de desempenho. Um exemplar da etiqueta pode ser visualizado na Figura 5-B.

Figura 5 - Zoneamento climático e exemplar da etiqueta canadense.



Na Austrália, a classificação é baseada no *Australian Fenestration Rating Council* (AFRC), seguindo o mesmo procedimento do NFRC. As esquadrias são avaliadas por simulação computacional e o sistema foi validado em testes de laboratório para climas quentes e frios. Cada produto classificado é certificado com um selo que indica estar de acordo com a norma australiana AS 2047:2014 (AS, 2014), conforme apresentado na Figura 6.

Figura 6 - Selo da norma australiana AS 2047:2014.

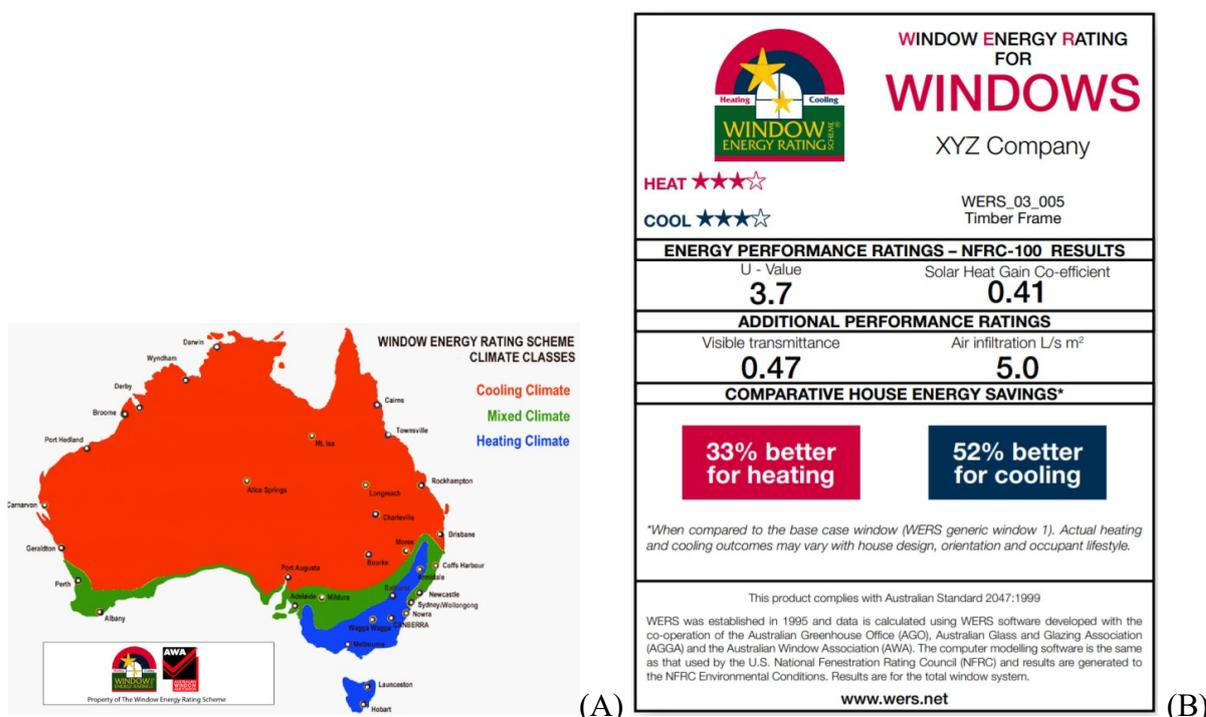


Fonte: AS (2014).

O WERS australiano está vinculado ao programa NATHERS (*Nationwide House Energy Rating Software*), que divide o país em três zonas climáticas (clima de resfriamento, aquecimento e misto), conforme a Figura 7. Não tem um nível de desempenho mínimo

obrigatório, considera o coeficiente U, o FS e apresenta a infiltração de ar como indicativo. Um exemplo de etiqueta é demonstrado na Figura 7-B.

Figura 7 - Divisão climática da Austrália e WERS.



Fonte: <https://www.wers.net/>.

A classificação das esquadrias é apresentada por uma escala de estrelas para aquecimento e resfriamento separadamente. É utilizada uma classificação de 0 a 5 estrelas, onde 5 representa a esquadria que possui um melhor desempenho para aquecimento e resfriamento (AGWA, 2019). Além disso, ela mostra o percentual de melhoria que a esquadria classificada apresenta quando comparada ao modelo de referência – como uma forma de elucidar melhor as informações, tornando-as mais assertivas para o comprador ou especificador das esquadrias. A esquadria de referência, que possui vidro com 3 mm de espessura e perfil de alumínio, não tem estrela para resfriamento, mas recebe uma estrela para aquecimento devido ao ganho solar no inverno. Um exemplo de classificação de uma amostragem de esquadrias com vidro monolítico e perfis de alumínio pode ser vista na Tabela 1 a seguir.

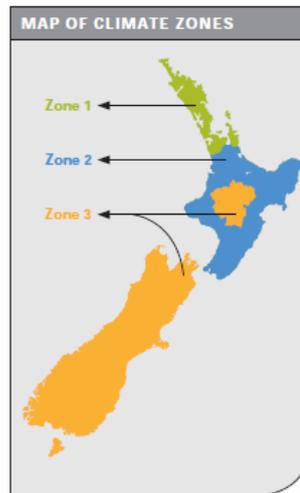
Tabela 1 – Classificação de uma amostragem de esquadrias com vidro monolítico e perfis de alumínio segundo a etiquetagem australiana.

GEM WINDOWS AND DOORS (WERS TABLE) <small>Updated 11-May-15</small>					Cool %	Heat %	Total Window - AFRC			
Window ID	Glazing	Cooling Stars	Heating Stars			Uw	SHGC	Tvw	Air Inf	
100 SERIES - ALUMINIUM SLIDING WINDOW - SINGLE GLAZED										
SSW-001-01	3mm Clear Glass	☆	★★★☆☆	12%	21%	6.2	0.74	0.76	0.89	
SSW-001-02	5mm Super Green Glass	★★	★★★	33%	8%	6.3	0.51	0.63	0.89	
SSW-001-03	6mm Clear Glass	★	★★★☆☆	15%	21%	6.1	0.71	0.75	0.89	
SSW-001-06	6.38mm Comfort Plus/ 6mm Smart Glass	★★★★	★★★★☆☆	46%	30%	4.4	0.45	0.50	0.89	
SSW-001-07	4mm Clear Glass	☆	★★★☆☆	12%	21%	6.2	0.74	0.76	0.89	
SSW-001-08	4mm Grey Glass	★☆☆	★★★	28%	14%	6.2	0.58	0.47	0.89	
SSW-001-09	5mm Clear Glass	☆	★★★☆☆	15%	21%	6.1	0.72	0.76	0.89	
SSW-001-10	5mm Grey Glass	★★	★★★	32%	13%	6.1	0.54	0.41	0.89	
SSW-001-11	5mm Energy Tech Glass	★★	★★★★★	34%	39%	4.3	0.61	0.70	0.89	
SSW-001-12	6mm Grey Glass	★★	★★★	34%	12%	6.1	0.51	0.36	0.89	
SSW-001-13	6mm Energy Tech Glass	★★	★★★★★	35%	40%	4.3	0.61	0.70	0.89	
SSW-001-14	6.38mm Saflex Glass	★	★★★☆☆	18%	21%	6.0	0.69	0.76	0.89	
SSW-001-15	6.38mm Saflex Glass Grey	★★	★★★	32%	14%	6.0	0.54	0.36	0.89	
SSW-001-16	6.38mm Comfort Plus/ 6mm Smart Glass Clear	★★	★★★★★	36%	39%	4.3	0.60	0.70	0.89	
100 SERIES - ALUMINIUM DOUBLE HUNG WINDOW - SINGLE GLAZED										
SSW-003-01	3mm Clear Glass	☆	★★★☆☆	12%	20%	6.3	0.74	0.76	0.30	
SSW-003-02	5mm Super Green Glass	★★	★★★	34%	10%	6.2	0.50	0.62	0.30	
SSW-003-03	6mm Clear Glass	★	★★★☆☆	16%	20%	6.2	0.71	0.75	0.30	

Fonte: <https://www.windowsanddoorssydney.com.au/wers-information/>

A etiqueta da Nova Zelândia segue basicamente o WERS Australiano, com três zonas climáticas. A etiqueta não tem um nível de desempenho mínimo obrigatório, considera o coeficiente U, o FS e apresenta a infiltração de ar como indicativo. A Figura 8 apresenta o mapa com o zoneamento climático da Nova Zelândia.

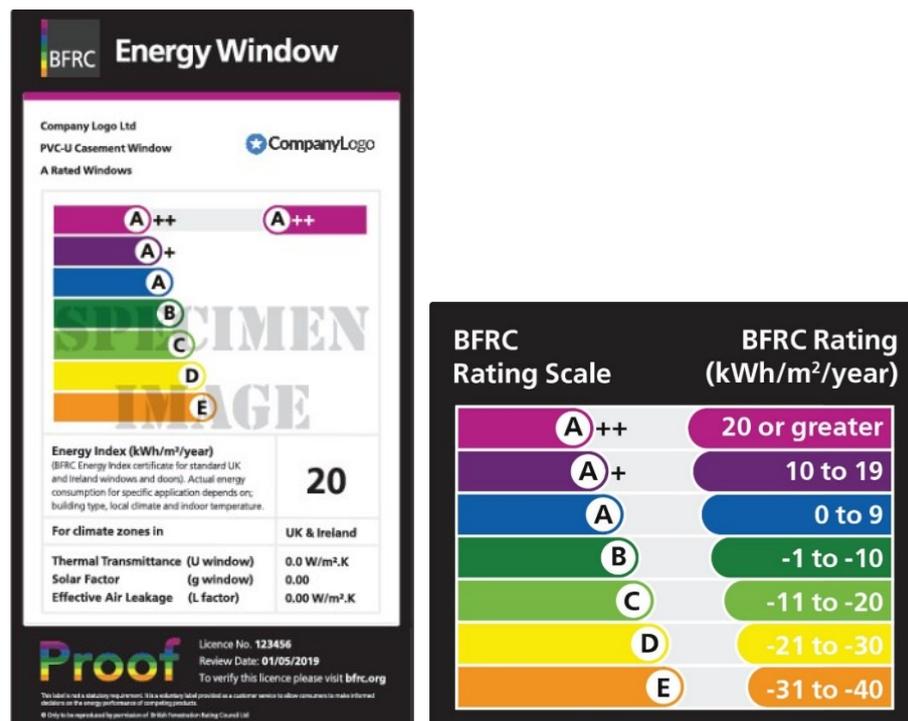
Figura 8 - Mapa de zoneamento climático da Nova Zelândia.



Fonte: <https://www.wers.net/>.

No Reino Unido, o conselho responsável por verificar e classificar o desempenho energético de esquadrias em edificações residenciais é a *British Fenestration Rating Council* (BFRC). O BFRC foi fundado em 1997 com o intuito de elevar os padrões das aberturas e impulsionar o desempenho na indústria. Agora, o BFRC é o sistema de classificação mais utilizado na Europa. A etiqueta atribuí às aberturas uma classificação entre “A++” e “E” que são representadas com as cores do arco-íris, como pode ser visto na Figura 9.

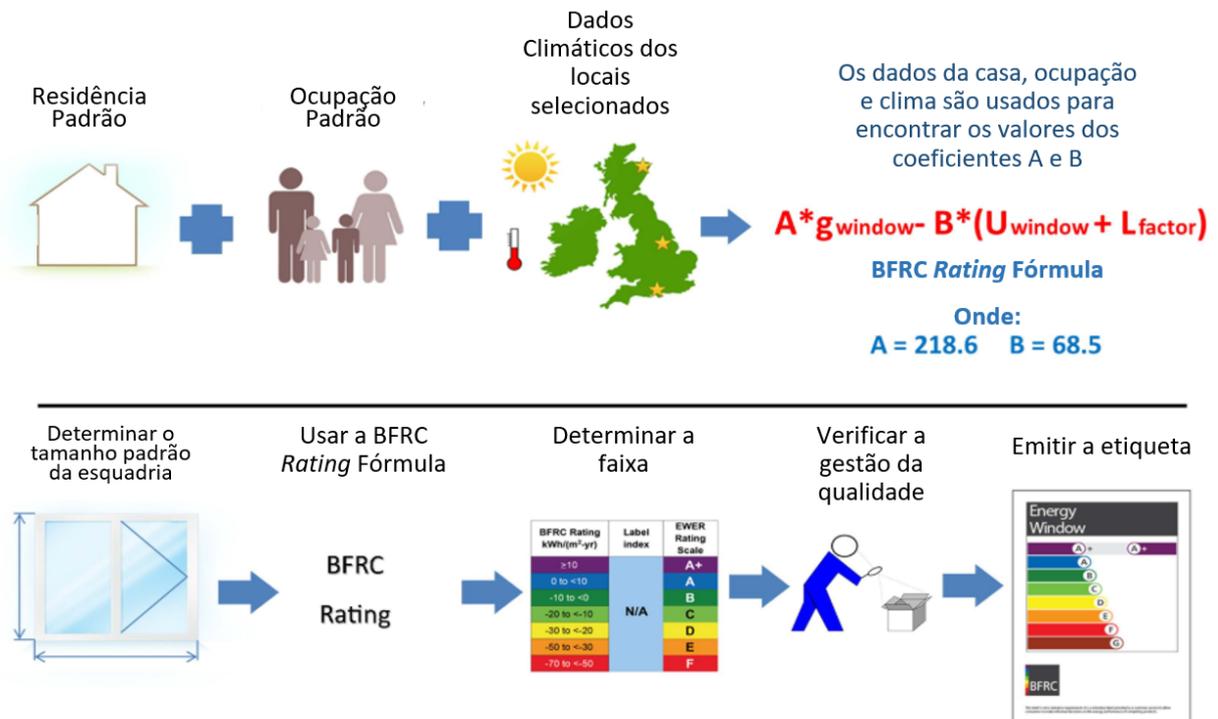
Figura 9 - Exemplo de etiqueta do Reino Unido e escala de classificação.



Fonte: <https://www.bfrc.org/>.

O método de etiquetagem do Reino Unido considera apenas um modelo de edificação, mantém um tamanho de esquadria e não possui divisão por zonas climáticas (considera uma condição climática média). As simulações são realizadas com uma ocupação padrão para edificações residenciais. Também não tem um nível mínimo de desempenho obrigatório, considera o coeficiente U, o FS e a infiltração de ar. A classificação é feita por meio de um balanço da energia resultante das contribuições positivas do ganho solar menos os fatores negativos da perda de calor e vazamento de ar. O esquema de cálculo e classificação está ilustrado na Figura 10.

Figura 10 - Esquema de cálculo e classificação da etiquetagem do Reino Unido.



Fonte: Adaptado de <https://www.bfrc.org/>.

Orouji et al. (2019) desenvolveram uma etiqueta energética de esquadrias no Irã, a qual está fixada em todas as esquadrias do país, devido a obrigatoriedade imposta pela organização de normalização nacional.

Os autores atestam que ao dividir o país em zonas climáticas de acordo com a radiação solar, as mudanças no fluxo de energia que passa pelas esquadrias dependerão apenas de seus parâmetros funcionais. Sendo assim, o clima do Irã foi dividido em 10 zonas climáticas, levando em consideração principalmente as diferenças de radiação solar entre as zonas.

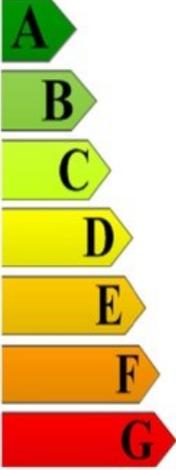
Depois disso, os autores definiram uma tipologia a ser simulada. Uma vez que alguns parâmetros envolvidos na investigação da eficiência energética das esquadrias durante os períodos de aquecimento e resfriamento dependem das características do edifício onde as esquadrias são instaladas. Para unificação de um sistema de avaliação, um edifício de referência foi definido de acordo com o regulamento de construção iraniano (Orouji et al., 2019). A tipologia utilizada nas simulações com o programa *EnergyPlus* tem 4,00 x 4,00 m e pé direito de 2,70 m. Uma de suas paredes foi considerada externa. Nesta parede foi posicionada a esquadria com dimensões de 1,18 x 1,23 m e as demais superfícies foram consideradas adiabáticas.

Os parâmetros de desempenho das esquadrias simuladas foram definidos utilizando o programa *WINDOW 7.0*. Foram estabelecidas mais de 1200 configurações diferentes considerando os tipos de perfis, gases de enchimento dos vidros duplos e tipos de vidros. Para validação dos resultados obtidos na simulação, dez amostras de esquadrias com diferentes configurações foram fornecidas por fabricantes e instaladas em um protótipo real para medição pelo método *hot-box*. De acordo com os resultados obtidos, Orouji et al. (2019) observaram que os resultados dos testes no protótipo real estavam em grande conformidade com os resultados da simulação. Portanto, o método de simulação pôde ser utilizado como um meio adequado para especificar o desempenho das esquadrias.

Para que o consumo de energia (em kWh/m².ano) proporcionado pelas esquadrias pudesse ser previsto e elas classificadas sem que fosse necessário simular novamente, os autores desenvolveram equações de acordo com o método de cálculo apresentado na norma ISO 18.292 (ISO, 2011). As equações calculam o consumo de energia previsto para um clima e edificação padrão com base nos parâmetros FS, coeficiente U e infiltração de ar das esquadrias.

Na etiqueta de energia os autores apresentam primeiramente os parâmetros da esquadria. A classificação é dividida por zonas climáticas (de 1 à 10) e fragmentada por faixas de consumo de energia por kWh/m².ano. Ainda é comunicado o consumo gerado pela esquadria etiquetada e a transmissão visível. Além disso, são informados mais alguns detalhes da esquadria como o tipo de vidro, gás, perfil e espessura. A etiqueta pode ser observada na Figura 11.

Figura 11 - Etiqueta de energia de esquadria do Irã.

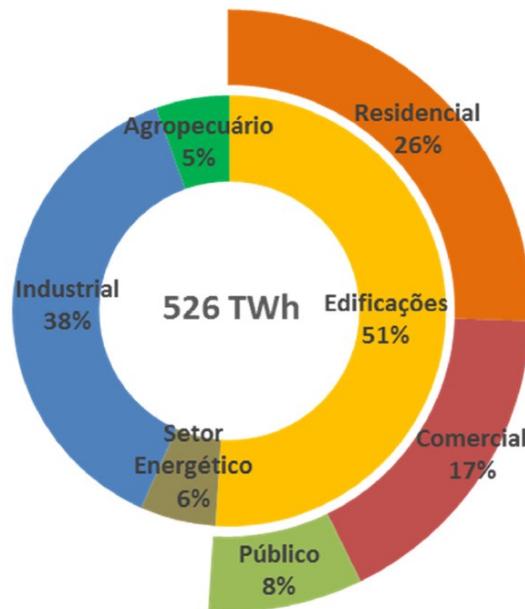
Window Energy Label										
Overall Heat Transfer	<i>U-Value</i>	$(W/m^2.K)$	2.686							
Solar Heat Gain	<i>G-Value</i>	-	0.575							
Visible Transmittance	<i>V.T.*</i>	-	0.5							
Air Leakage	<i>A.L.</i>	(m^3/h)	1.27							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	124	157	189	221	253	285	318	352	402	452
	100	128	155	183	210	238	265	297	332	367
	89	115	142	168	194	228	252	284	321	352
	102	132	162	192	222	252	282	312	342	372
	165	207	250	292	342	384	427	461	497	532
	125	159	194	228	263	297	332	367	402	437
89	121	153	185	217	249	281	313	345	377	
90	132	164	196	228	260	292	324	356	388	
113	145	177	209	241	273	305	337	369	401	
151	193	235	277	319	361	403	445	487	529	
		<i>(kWh/m².Yr.)</i> Window Energy Performance Index								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
163.5	125.5	130.9	181.7	307.1	155.4	155.7	164.8	200.8	275.9	
Window visible Transmittance (V.T.)			High Visible Transmittance: V.T. ≥ 0.6							
			Medium Visible Transmittance: 0.4 ≤ V.T. < 0.6							
			Low Visible Transmittance: V.T. < 0.4							
Window Specification:										
Frame Manufacturer:	Glass Manufacturer:	Window Manufacturer:								
Glass Type:	Frame Type:	Window Pan No.:								
Gas Filler:	Spacer Thickness(mm):	Glass Thickness (mm):								
			Glass Color:							

Fonte: Orouji et al. (2019).

2.1.2 Contexto nacional

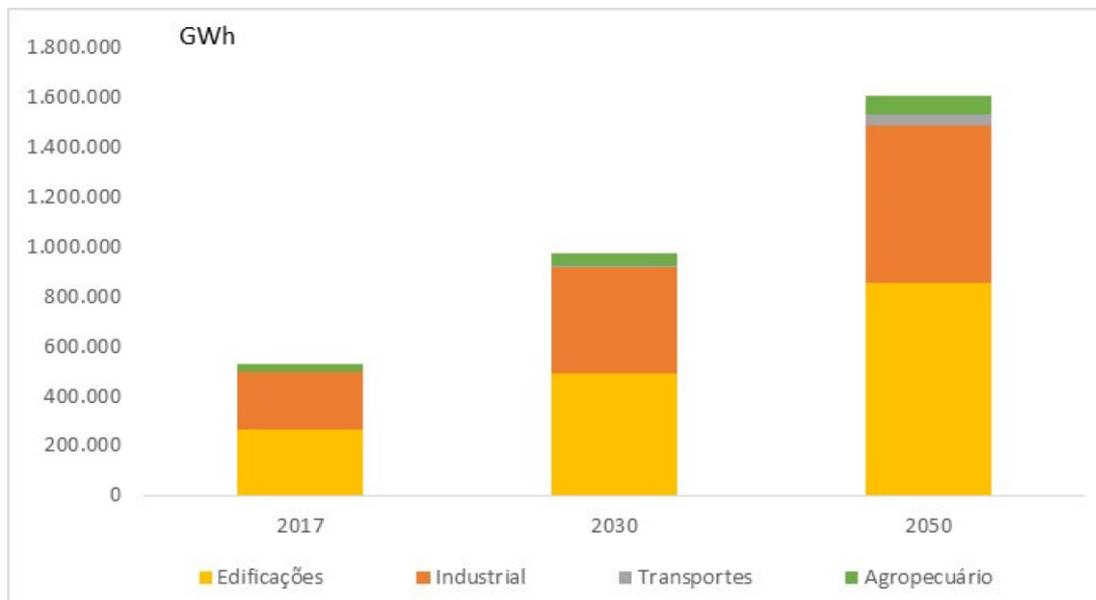
No Brasil, o setor de edificações, composto por residências, comércio e edifícios públicos, representou 51% do consumo total de energia elétrica em 2017, como indicado na Figura 12. As edificações residenciais correspondem à 26% do consumo total. Além disso, é estimado que o setor de edificações tenha um aumento considerável deste consumo até 2050, conforme a Figura 13 (EPE, 2018).

Figura 12 - Divisão do consumo final de eletricidade no Brasil em 2017.



Fonte: EPE (2018).

Figura 13 - Projeção anual de consumo de energia elétrica setorial no Brasil.



Fonte: EPE (2018).

Foi estimado que o consumo de energia elétrica no Brasil, devido aos condicionadores de ar no setor residencial, mais que triplicou nos últimos 12 anos. Espera-se que esta demanda continue aumentando nas próximas décadas, decorrente, principalmente, do crescimento da

população, da elevação da renda e da maior preferência dos indivíduos por ambientes climatizados (EPE, 2018).

Ainda segundo a EPE (2018), a demanda crescente por condicionamento de ar das edificações pode resultar em grande impacto sobre o sistema elétrico do Brasil. O aumento das cargas de condicionadores de ar pode elevar não apenas as necessidades gerais de energia, mas também a necessidade de geração e distribuição para atender a demanda nos horários de pico, adicionando maior impacto sobre o sistema energético nacional.

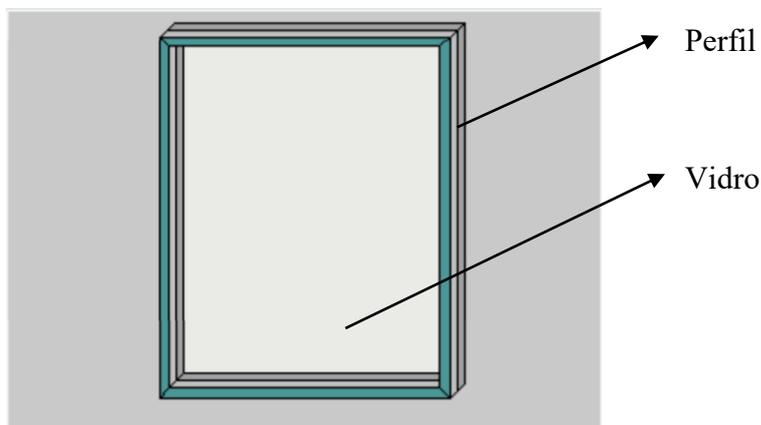
Além disso, as edificações brasileiras recebem alto calor solar transmitido através das esquadrias, o que causa um aumento da carga térmica no interior da edificação.

No Brasil, a principal norma que trata do desempenho acústico, térmico e de funcionalidade de esquadrias externas para edificações independentemente do tipo de material é a ABNT NBR 10821 - Parte 4. A norma visa assegurar ao consumidor o recebimento dos produtos com condições mínimas de desempenho.

Esta norma define “janela” como sendo uma esquadria, vertical ou inclinada, geralmente envidraçada, destinada a preencher um vão, em fachadas ou não. Entre outras, sua finalidade é permitir a iluminação e/ou ventilação de um recinto para outro. A norma define “vão” como uma abertura existente na parede, que pode receber uma esquadria. Ainda segundo a ABNT NBR 10821, “esquadria” é um nome genérico dos componentes formados por perfis utilizados nas edificações. As esquadrias são definidas segundo sua finalidade, utilização, função, movimento, partes e componentes. Além disso, a norma apresenta os procedimentos de cálculo para obter os valores de FS, coeficiente U e T_{vis} (transmissão visível) das esquadrias.

Na prática, uma esquadria é o conjunto do vidro (sua maior área) mais o perfil (sua estrutura) – nomenclatura considerada no presente trabalho (Figura 14). As três principais categorias de materiais utilizados nos perfis das esquadrias são madeira, metal (aço e alumínio) e policloreto de vinila (PVC). Quanto à iluminação natural a norma apenas indica a área mínima de esquadrias em ambientes de permanência prolongada.

Figura 14 – Representação de uma esquadria e suas principais partes.

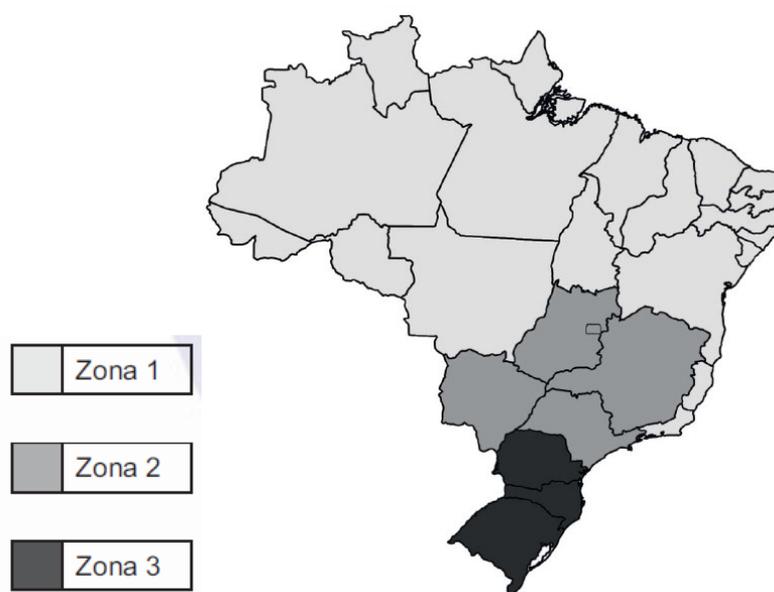


Fonte: Adaptado de MITCHELL et al. (2018).

A norma ABNT NBR 10821 - Parte 4 também apresenta um modelo de etiqueta para esquadrias, que indica níveis de conforto térmico referentes à quantidade de graus-hora de desconforto (GHd) (Tabela 2), conforme os limites de temperatura operativa estabelecidos na ANSI/ASHRAE STANDARD 55, resultante do uso da esquadria em cada uma das três zonas climáticas brasileiras (Figura 15). Esse zoneamento climático difere daquele definido pela ABNT NBR 15220 e leva em conta principalmente a latitude geográfica, pois a radiação solar é preponderante no desempenho térmico de esquadrias (ABNT, 2017b).

Graus-hora de desconforto é o somatório horário da diferença entre a temperatura operativa de um ambiente da edificação e o limite máximo ou mínimo de temperatura de conforto, quando ela estiver acima ou abaixo, respectivamente, dos limites de conforto. Por sua vez, temperatura operativa é a média entre a temperatura do ar e as temperaturas superficiais da sala.

Figura 15 - Zoneamento bioclimático brasileiro para análise do nível de conforto térmico de esquadrias.



Fonte: ABNT, 2017b.

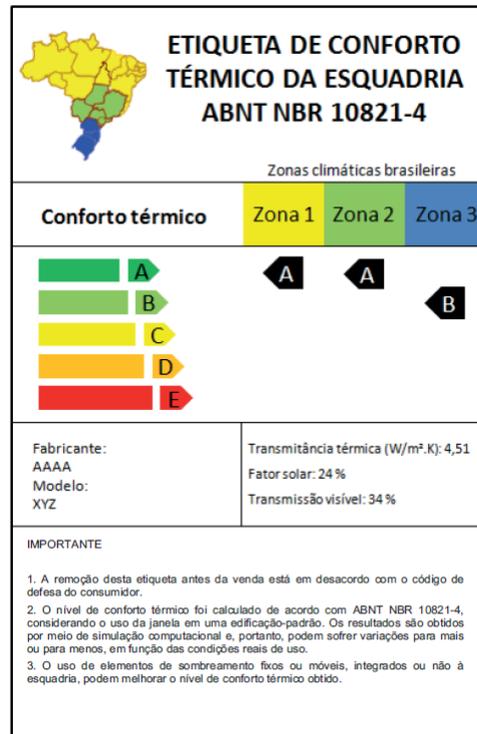
A quantidade de GHd deve ser calculada conforme a Equação 1 e coeficientes da Tabela 2 para as três zonas climáticas. O nível de desempenho obtido pela equação deve ser informado no modelo de etiqueta conforme a Figura 16 e sugere que, caso a esquadria não esteja acompanhada de etiqueta, estas informações constem em catálogos, projetos ou certificados (ABNT, 2017b).

Tabela 2 - Níveis de desempenho de esquadrias do modelo de etiqueta para esquadrias brasileiro.

Desempenho	Zona 1	Zona 2	Zona 3
A	$\text{GHd} \leq 39\,000$	$\text{GHd} \leq 7\,800$	$\text{GHd} \leq 22\,500$
B	$39\,000 < \text{GHd} \leq 46\,000$	$7\,800 < \text{GHd} \leq 8\,600$	$22\,500 < \text{GHd} \leq 23\,500$
C	$46\,000 < \text{GHd} \leq 54\,000$	$8\,600 < \text{GHd} \leq 9\,400$	$23\,500 < \text{GHd} \leq 24\,500$
D	$54\,000 < \text{GHd} \leq 64\,000$	$9\,400 < \text{GHd} \leq 10\,200$	$24\,500 < \text{GHd} \leq 25\,500$
E	$\text{GHd} > 64\,000$	$\text{GHd} > 10\,200$	$\text{GHd} > 25\,500$

Fonte: ABNT, 2017b

Figura 16 - Modelo de etiqueta do desempenho térmico de esquadrias da Parte 4 da norma ABNT NBR 10821.



Fonte: ABNT, 2017b.

Para a obtenção da Equação 1 para a classificação, foram executadas simulações computacionais, onde as esquadrias foram avaliadas fechadas, inseridas em uma edificação padrão (protótipo), com uma taxa de ventilação pré-definida e padrão de uso que representa uso residencial, conforme Tabela 3.

$$G_{hd} = a \cdot SHGC + b \cdot U_o + c \cdot T_v + d \cdot U_o/U_g + e \quad (1)$$

Onde:

SHGC = Fator solar da esquadria, adimensional, inserido na equação com valor entre 0 e 1;

U_o = Transmitância térmica da esquadria, expressa em (W/m².K);

T_v = Transmissão visível da esquadria, expressa em (W/m².K);

U_g = Transmitância térmica do perfil, expressa em (W/m².K).

Tabela 3 - Coeficientes para a Equação 1.

Zona climática	Coeficientes da Equação 1				
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>
Zona 1	71 605	226	11 920	- 1 459	17 113
Zona 2	12 061	84	926	- 981	4 686
Zona 3	10 862	463	264	897	17 825

Fonte: ABNT, 2017b.

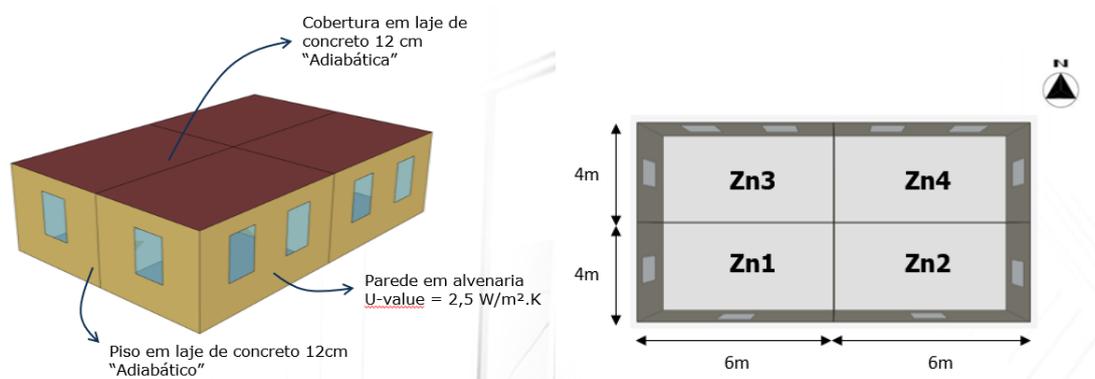
Tabela 4 - Cargas e uso utilizadas nas simulações para a classificação de esquadrias da Parte 4 da norma ABNT NBR 10821.

Carga	W/m ²	W/zona	Uso
Iluminação	2,75	66	7h às 22h
Pessoas	4,17	100	24h
Equipamentos	2,08	50	24h
TOTAL	9,00	216	-
Ventilação	1 troca/hora		24h

Fonte: ABNT, 2017b.

O protótipo simulado é um modelo de 96,00 m², com 4 cômodos de 24,00 m² cada. Foi considerado um “pavimento tipo” com a cobertura e piso adiabáticos e as paredes em contato com o ar. As esquadrias foram dispostas em todas as orientações geográficas, com maior área de abertura para o Norte. Um croqui e a planta baixa do protótipo estão representados na Figura 17.

Figura 17 - Croqui e planta baixa protótipo considerado nas simulações.



Fonte: ABNT, 2017b.

Quanto às esquadrias simuladas, a relação de área de vidro e área total foi de 70% e 80%. Foram considerados 4 tipos de perfis e 12 tipos de vidros. O coeficiente U dos perfis estão apresentados na Tabela 5-A e as propriedades dos vidros estão apresentados Tabela 5-B.

Tabela 5 – Transmitância térmica dos perfis e propriedades dos vidros simulados.

Transmitância térmica dos perfis <i>U-value</i> (W/m ² .K)
2,00
3,00
5,00
8,00

(A)

Vidro	FS	U-value	Tvis
N14 ou 114PN	0,29	5,16	0,14
N14 ou 114PN - duplo	0,17	2,63	0,14
SG32 ou 130PN	0,44	5,16	0,30
SG32 ou 130PN - duplo	0,35	2,75	0,28
AG43 ou KNT140	0,35	5,16	0,40
AG43 ou KNT140 - duplo	0,29	1,78	0,38
SG52 ou 150ST	0,55	5,16	0,50
SG52 ou 150ST - duplo	0,46	2,80	0,46
SN50 ou SKN inc	0,34	5,16	0,48
SN50 ou SKN inc - duplo	0,27	1,50	0,48
Incolor	0,88	5,16	0,80
Incolor duplo	0,75	2,80	0,80

(B)

Fonte: ABNT, 2017b.

O método utilizado para o desenvolvimento desta etiqueta precisa ser aperfeiçoado. Com base na experiência internacional sabe-se que diversas variáveis afetam diretamente no conforto térmico e lumínico proporcionado pelas esquadrias nas edificações.

Primeiramente foram consideradas apenas três zonas climáticas, sendo que o Brasil possui uma variabilidade climática mais ampla. A etiqueta avalia apenas conforto e também deveria avaliar a eficiência energética, sendo que o uso da energia para condicionamento de ar nas edificações residenciais brasileiras tende a crescer no decorrer dos anos (EPE, 2018).

Além disso, o protótipo e a dimensão das esquadrias considerados não representam as habitações brasileiras, que em sua maioria são classificadas como casas com o telhado inclinado. Recentemente a Eletrobrás (2019) publicou uma pesquisa com a qual é possível obter informações mais precisas sobre as moradias e os hábitos de usos dos brasileiros.

Também seria ideal desenvolver uma única equação que já avaliasse a variável climática brasileira, para que a classificação das esquadrias não precisasse ser dividida por climas. A amostra de vidros poderia abranger uma gama mais ampla de propriedades. Foram considerados apenas 12 vidros para as análises.

Por fim, o método utilizado não fez uma correta dedução das cargas internas, a iluminação foi considerada ligada durante todo o dia e a ocupação simulada foi de 24h para as pessoas e os equipamentos em todas as zonas, sendo que, no presente ano (ABNT, 2021) foram desenvolvidos novos padrões de ocupação residencial no Brasil.

2.2 INFLUÊNCIA DAS ESQUADRIAS NO DESEMPENHO DE EDIFICAÇÕES

Um método para o sistema de classificação de esquadrias, segundo Maccari e Zinzi (2001), deveria ser desenvolvido em conformidade com os seguintes passos: definição dos índices de desempenho; estabelecimento dos parâmetros a serem considerados no desempenho do edifício; execução das simulações para as configurações de referência consideradas; análise para obter um algoritmo simplificado e redução dos dados de simulação computacional. Além disso, a caracterização do desempenho dos vidros e das esquadrias requer a análise de suas propriedades. Por fim, de acordo com Duer et al. (2002), são necessários a definição de dados climáticos referentes à zona bioclimática e um edifício de referência.

De acordo com o trabalho de Reilly e Hawthorne (1998) realizado nos EUA, levando em consideração a influência da transmitância térmica e do ganho de calor solar através das esquadrias sobre o consumo de energia elétrica com condicionamento de ar de residências, foi estimado para a cidade de Baltimore, onde o aquecimento é predominante, que 15% da energia elétrica consumida pelo setor residencial é utilizada pelos sistemas de aquecimento. Já na cidade de Miami, onde o resfriamento é predominante, 37% do consumo de energia é gasto com o resfriamento das edificações.

Jaber e Ajib (2011) investigaram o desempenho de esquadrias com perfis de alumínio e diferentes vidros - simples, duplos e triplos - para analisar a demanda de aquecimento e resfriamento de edificações residenciais em três diferentes zonas climáticas – Amã e Aqaba na Jordânia e Berlim na Alemanha. O desempenho destas esquadrias em termos de eficiência energética foi avaliado de acordo com os coeficientes U e FS. Para isso, os autores utilizaram a ferramenta de simulação TRNSYS (*Transient System Simulation Tool*).

A edificação considerada no estudo tem área de 154,00 m², perímetro de 43,40 m e pé direito de 3,00 m. É formada por três quartos, sala de estar, quarto de hóspedes, cozinha e três

banheiros. O número de ocupantes é de 6 pessoas. O edifício é de forma retangular com coeficiente U de 0,133 W/(m²K) e 0,149 W/(m²K) para parede e teto, respectivamente. Os dados climáticos (radiação solar, temperatura ambiente, umidade relativa, entre outros) são dados horários obtidos da biblioteca INSEL (INSEL, 2009). O ajuste do termostato é de 24 °C e 20 °C para resfriamento e aquecimento, respectivamente, e a umidade relativa é ajustada em 50% para resfriamento e 30% para aquecimento. O edifício é ventilado de acordo com a ASHRAE Standard 62.2 (ASHRAE, 2016).

De acordo com os resultados, foram definidos a orientação, o tipo e o tamanho ideais para as esquadrias, considerando o consumo de energia por aquecimento e resfriamento, nas três cidades. Os autores confirmaram que a economia anual de energia elétrica por uma determinada esquadria depende de alguns fatores: os parâmetros da própria esquadria (coeficiente U e fator solar), sua orientação geográfica, condições climáticas e parâmetros de construção.

Observou-se que a esquadria com vidros triplos mostrou melhor desempenho do que os outros tipos de esquadria para as três zonas climáticas. Isso ocorre porque esquadrias com vidros duplos ou triplos têm mais resistência térmica do que esquadrias de vidro único.

Por fim, Jaber e Ajib (2011) concluíram que é melhor incorporar a análise das esquadrias que serão instaladas em uma edificação durante o projeto inicial. Além de que, a especificação de esquadrias, especialmente os vidros, são um fator crítico para determinar a economia de energia.

Tsikaloudaki et al. (2015) desenvolveram um trabalho onde foi avaliado o desempenho energético por meio do cálculo do índice de energia de resfriamento, que está de acordo com a ISO 18292 (ISO, 2011) e representa a contribuição de energia da esquadria. As simulações das necessidades de energia elétrica para resfriamento foram executadas no programa *EnergyPlus*, que possibilitou a análise dinâmica detalhada. Além disso, considerou-se necessário apresentar as necessidades de energia de resfriamento ponderadas por área e as necessidades gerais de energia do ambiente de referência, que foram estimadas para cada tipo de esquadria examinada, configuração e modo de uso.

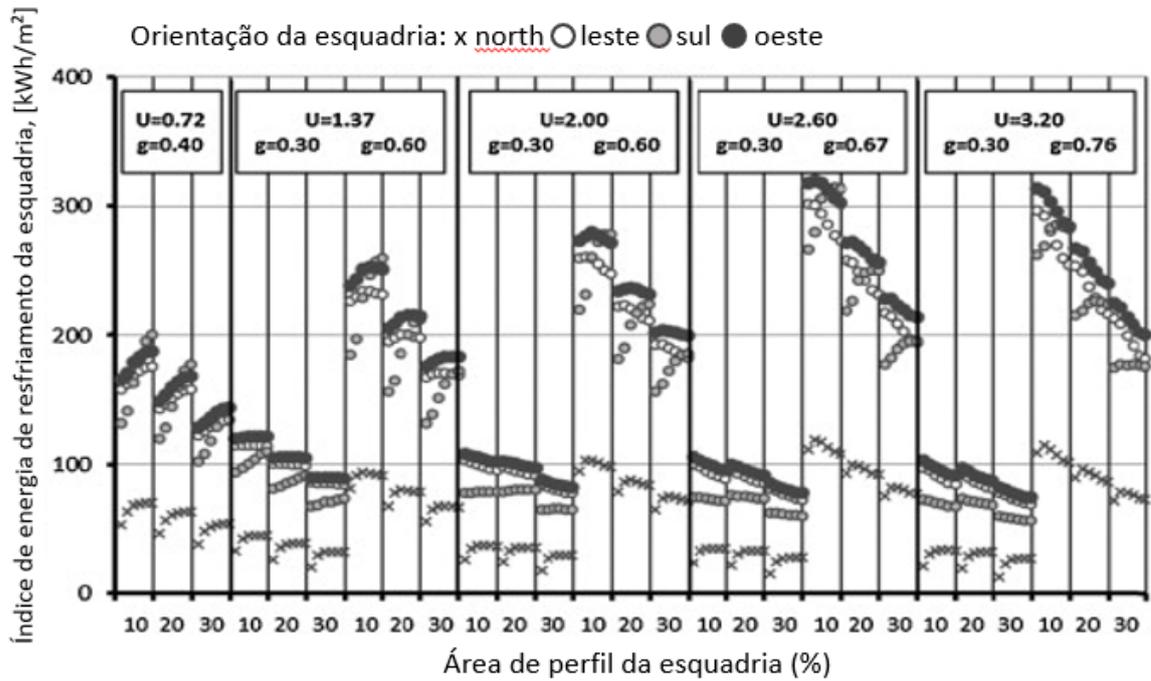
Os autores testaram uma área de esquadria que varia de 10% a 99% da fachada, para as quatro orientações geográficas, em edifícios de escritório e residências no clima mediterrâneo – o mais quente da Europa. O coeficiente U das esquadrias variou de 0,72 W/(m².K) a 3,20 W/(m².K). O FS dos vidros variou de 0,30 a 0,76. No total, 27 tipos de esquadrias foram analisados.

A sala de referência foi considerada retangular, com 3,60 m de largura, 5,50 m de comprimento e pé direito de 2,80 m. Essa configuração foi selecionada como representativa de um escritório ou um cômodo residencial, pois pode servir como uma unidade de construção que pode ser multiplicada para formar todo o edifício. Todas as superfícies foram consideradas adiabáticas, com exceção da frontal, considerada termicamente isolada com uma camada de 0,05 m de EPS ($\lambda=0,04\text{W/m.K}$) na superfície externa, à qual foi locada a esquadria.

Para o uso residencial, foi considerado um status ocupacional completo. O ponto de ajuste do resfriamento e aquecimento foi considerado 26 °C e 22 °C, respectivamente, de acordo com a norma de conforto europeia EN 15251 (EN, 2012). A taxa de infiltração foi considerada 0,50 ACH (*air changes per hour*), a fim de levar em conta o aumento da permeabilidade ao ar das estruturas convencionais encontradas na região. As cargas térmicas internas foram definidas a 5 W/m². O estudo foi realizado para as cidades de Atenas, Larnaca, Lisboa, Málaga e Roma, que abrangem as características do clima mediterrâneo.

A Figura 18 mostra a distribuição do consumo de energia para as 27 esquadrias analisadas no modelo residencial, em Atenas. Nos casos de alta transmissão solar, a contribuição da esquadria nas necessidades de energia de resfriamento é considerável. Para esquadrias com as mesmas características, o índice de energia de resfriamento diminui à medida que a área de perfil aumenta. Em todos os casos, os modelos orientados para oeste e leste consomem mais energia para resfriamento.

Figura 18 - Distribuição do índice de energia estimado para o escritório em relação à orientação da esquadria, área de perfil, área de esquadria na fachada principal, coeficiente U e fator solar (g) do envidraçamento.

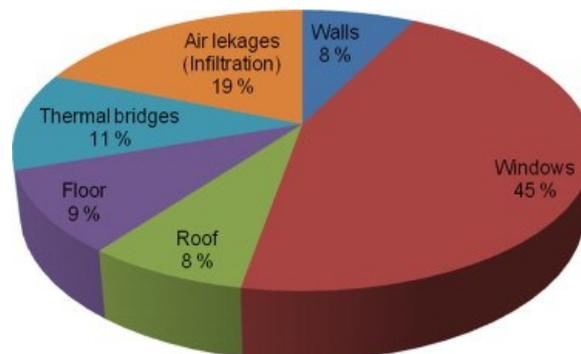


Fonte: Tsikaloudaki et al. (2015).

Tsikaloudaki et al. (2015) concluíram que a proteção solar adequada ou vidros de controle solar podem ajudar significativamente para a melhoria do desempenho energético das edificações.

Grynning et al. (2013), fizeram um estudo sobre a demanda de energia para resfriamento e aquecimento proporcionada pelas esquadrias em um edifício de escritórios típico Norueguês, na cidade de Oslo. Os autores constataram que a perda de calor relacionada a esquadrias contribuiu com 45% da perda total de calor pela envoltória do edifício construído de acordo com os atuais regulamentos de construção noruegueses (Figura 19).

Figura 19 - Distribuição percentual das perdas de calor de um edifício da Noruega.



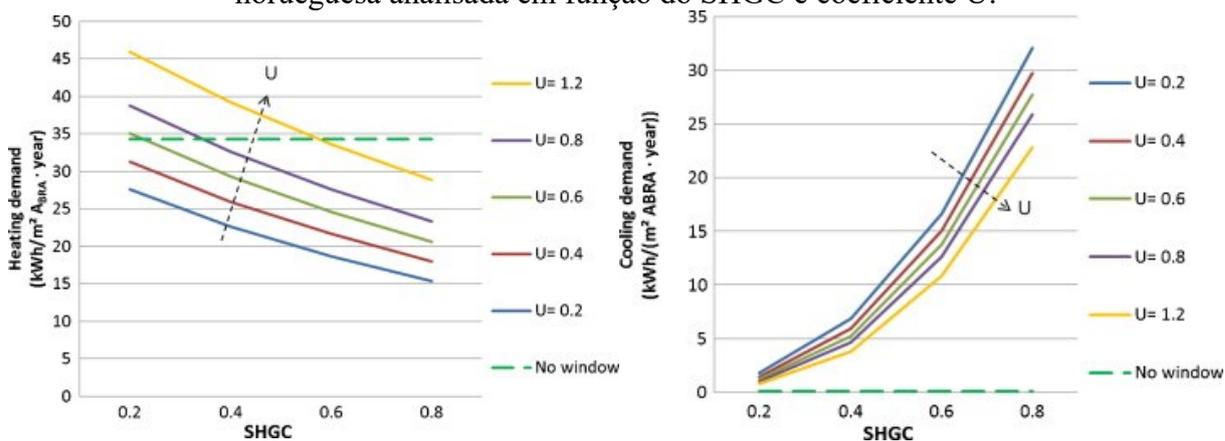
Fonte: Grynning et al. (2013).

O estudo foi realizado visando analisar as variações do coeficiente U e FS de esquadrias. Esquadrias de dois, três e quatro chapas de vidro, representantes das esquadrias disponíveis no mercado da Noruega, foram compostas utilizando o programa computacional *WINDOW 6.0*.

Cada pavimento do edifício modelo tem 1.200 m² (30,00 m por 40,00 m) e três pavimentos, dando uma área total aquecida de 3.600 m². O PAF (Percentual de Abertura da Fachada) da esquadria foi fixado em 55%. Um modelo simplificado de três zonas para cada um dos andares foi considerado. Os coeficientes U para o telhado, paredes e piso são de 0,13, 0,15 e 0,15 respectivamente. Por fim foi considerada uma estanqueidade da envoltória de 0,7 ACH a uma diferença de pressão de 50 Pa. Cargas internas, esquemas de ventilação, horas de ocupação, etc. foram definidos de acordo com os valores padrão para edifícios de escritórios apresentados na norma norueguesa para cálculos de desempenho energético, NS 3031 (NS, 2014). O coeficiente U foi variado de 0,2 a 1,2 W/(m².K) e o SHGC (*Solar Heat Gain Coefficient*) de 0,2 a 0,8.

Os autores realizaram simulações anuais utilizando o programa *EnergyPlus*. Nos cálculos, o efeito dos ganhos e perdas de calor solar na demanda de aquecimento e resfriamento do edifício foram considerados. Na Figura 20, observa-se como a demanda de aquecimento e resfriamento de um edifício varia com os valores de coeficiente U e SHGC para as esquadrias, no clima norueguês.

Figura 20 - Demanda de aquecimento e resfriamento, respectivamente, da edificação norueguesa analisada em função do SHGC e coeficiente U.



Fonte: Grynning et al. (2013).

É possível observar pela análise da Figura 20 uma queda na demanda de aquecimento, em função de um valor reduzido de coeficiente U e um aumento no valor de SHGC. Concentrar-se apenas na demanda de aquecimento sugere que valores baixos de U combinados com altos valores de SHGC devem ser considerados.

Em contradição com a demanda de aquecimento, a análise do gráfico da direita na Figura 20, sugere que se deve reduzir ao máximo os valores de SHGC para reduzir as demandas de resfriamento.

Por sua vez, Urbikain e Sala (2009) obtiveram as cargas de aquecimento e economia de energia de um edifício residencial típico em dois climas Espanhóis – cidades de Bilbao e Vitória - para diferentes tipos de esquadrias. Eles fizeram a análise por meio de três métodos. Os dois primeiros métodos foram calculados por meio de equações, o primeiro por balanço energético líquido através da esquadria, tendo em conta as condições meteorológicas e o segundo desenvolvido da mesma forma, mas considerando a edificação. O método 3 foi desenvolvido por meio de simulações computacionais detalhadas com o programa TRNSYS (2021).

Os autores propõem uma classificação de esquadrias de PVC, madeira e alumínio com quebra térmica, levando em consideração o coeficiente U da esquadria, o coeficiente U e a absorção dos perfis, o FS do envidraçamento e a infiltração de ar. Foi considerado um nível de ocupação de 1 pessoa por 30 m² com ganho de 65 W para calor sensível e 55 W para calor latente. Foi utilizada uma potência de iluminação de 5 W/m² e uma carga de equipamento de 4,4 W/m². Os dados de ocupação, iluminação e equipamentos são os definidos no código de construção espanhol.

Os vidros analisados estão apresentados na Tabela 6. O tipo 1 é um vidro duplo simples, usado como o vidro de referência para as comparações. Para este estudo, foram considerados dois valores de PAF: 20 e 30%, que podem ser considerados típicos da região estudada.

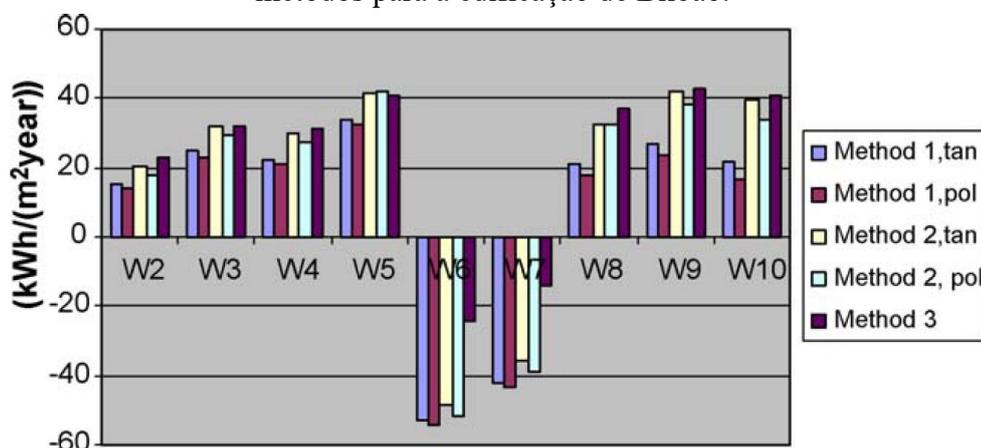
Tabela 6 – Propriedades dos vidros analisados na Espanha.

	Número de painéis	Posição do revestimento	Emissividade do revestimento	Preenchimento
Tipo 1	Duplo	Nenhum		Ar
Tipo 2	Duplo	Superfície 3	0,299	Ar
Tipo 3	Duplo	Superfície 3	0,299	Argônio
Tipo 4	Duplo	Superfície 3	0,155	Ar
Tipo 5	Duplo	Superfície 3	0,155	Argônio
Tipo 6	Duplo	Superfície 2	0,094	Ar
Tipo 7	Duplo	Superfície 2	0,033	Ar
Tipo 8	Triplo	Superfícies 2,5	0,155	Argônio
Tipo 9	Triplo	Superfícies 2,5	0,155	Krypton
Tipo 10	Triplo	Superfícies 2,5	0,066	Krypton

Fonte: Urbikain e Sala (2009).

A Figura 21 mostra a economia de energia anual por m² proporcionada pelas diferentes esquadrias para o edifício situado em Bilbao.

Figura 21 - Economia de energia anual por m² proporcionada pelas diferentes esquadrias e métodos para a edificação de Bilbao.



Fonte: Urbikain e Sala (2009).

Foi concluído que o método 3 é o mais preciso, mas que os resultados são muito semelhantes aos do método 2, portanto, como a aplicação desse último é mais simples e rápida, foi o escolhido para realizar a classificação das esquadrias.

Por fim, Urbikain e Sala (2009) propõem um sistema de classificação com base em 36 esquadrias por meio de equações simples (Tabela 7). Primeiramente, para cada uma das orientações geográficas, e por fim, foi utilizada uma equação da média das quatro orientações pois, segundo os autores, em edificações residenciais dificilmente serão utilizadas esquadrias diferentes por orientação. A classificação foi desenvolvida para as zonas climáticas de Bilbao (C1) e Vitória (D1).

Tabela 7 – Equações geradas para as zonas climáticas de Bilbao e Vitória, na Espanha.

	Zona Climática C1 (kWh / m ²)	Zona climática D1 (kWh / m ²)
Norte	$120,92 g_0 + 1,36 a_f U_f - 67,13 U_T - 0,75 L_{75}$	$148,92 g_0 + 1,68 a_f U_f - 95,83 U_T - 1,10 L_{75}$
Sul	$410,40 g_0 + 4,47 a_f L_f - 67,13 L_t - 0,60 L_{75}$	$535,00 g_0 + 5,82 a_f U_f - 95,83 U_T - 0,93 L_{75}$
Leste	$284,24 g_0 + 3,14 a_f L_f - 67,13 L_t - 0,63 L_{75}$	$377,62 g_0 + 4,15 a_f U_f - 95,83 U_T - 0,96 L_{75}$
Oeste	$212,53 g_0 + 2,37 a_f U_f - 67,13 U_T - 0,60 L_{75}$	$271,93 g_0 + 3,02 a_f U_f - 95,83 U_T - 0,93 L_{75}$
Média	$236,73 g_0 + 2,24 a_f L_f - 65,76 L_t - 0,63 L_{75}$	$330,10 g_0 + 3,08 a_f U_f - 95,33 U_T - 0,96 L_{75}$

Fonte: Urbikain e Sala (2009).

Esta classificação foi estabelecida de um ponto de vista sustentável, de eficiência energética e permite a classificação da esquadria em A (mais eficiente) até E (menos eficiente), dependendo do valor do índice de energia (Tabela 8).

Tabela 8 – Índice de energia e classificação obtidos para os vidros analisados nos climas espanhóis.

Classe	E (kWh / m ²) C1	E (kWh / m ²) D1
A	$E > 50$	$E > 65$
B	$35 < E < 50$	$42 < E < 65$
C	$24 < E < 35$	$26 < E < 42$
D	$-15 < E < 24$	$-32 < E < 26$
E	$E < 0$	$E < -32$

Fonte: Urbikain e Sala (2009).

No estudo de Lee et al. (2013), foi apresentado o consumo anual de energia de aquecimento, resfriamento e iluminação associado à aplicação de diferentes tipos de esquadrias em uma edificação. Para isso, foi utilizada a ferramenta de simulação computacional para a seleção das esquadrias do *Commercial Fenestration/Façade Design Tool* (COMFEN) baseada em dados do *Lawrence Berkeley National Laboratory* (LBNL). As propriedades das esquadrias avaliadas estão apresentadas na Tabela 9.

Os autores definiram o módulo de construção e as propriedades da envoltória para os dados de entrada, classificaram o leste asiático em 5 climas típicos, selecionaram 6 vidros e geraram esquadrias com vidros duplos e triplos. Os autores ainda realizaram uma análise dos dados de saída de consumo de energia relacionados às diferentes orientações geográficas e PAF. Logo após analisaram os resultados simulados divididos por aquecimento, resfriamento, cargas de iluminação e por variações do coeficiente U, FS e Tvis. Finalmente, otimizaram as propriedades e proporções das esquadrias para os edifícios localizados nas cinco zonas climáticas.

O edifício simulado dispõe de 4 zonas perimetrais compostas por 5 módulos de escritórios cada. Os valores de FS, carga de iluminação e carga de equipamentos são ajustados para os valores padrão da ferramenta COMFEN. Foram considerados perfis de alumínio com ruptura térmica. A carga de iluminação simulada foi de 10,76 W/m², a carga de equipamentos

de $8,07 \text{ W/m}^2$ e o modo de controle de iluminação é definido como contínuo. O coeficiente U dos elementos da envoltória é inserido com base nos valores sugeridos na norma ASHRAE 90.1 (ASHRAE, 2007).

Seis vidros (nomeados A, B, C, D, E e F) foram escolhidos de acordo com seus efeitos no desempenho energético, com base na Fronteira de Pareto. Para isso, foram selecionados vidros disponíveis no banco de dados do NFRC e plotados em um gráfico que relaciona sua T_{vis} e FS. Logo após, foram escolhidos 6 pontos de acordo com os valores máximos de T_{vis} em intervalos de 10% da linha de referência que variam de 0,1 a 0,6 de FS.

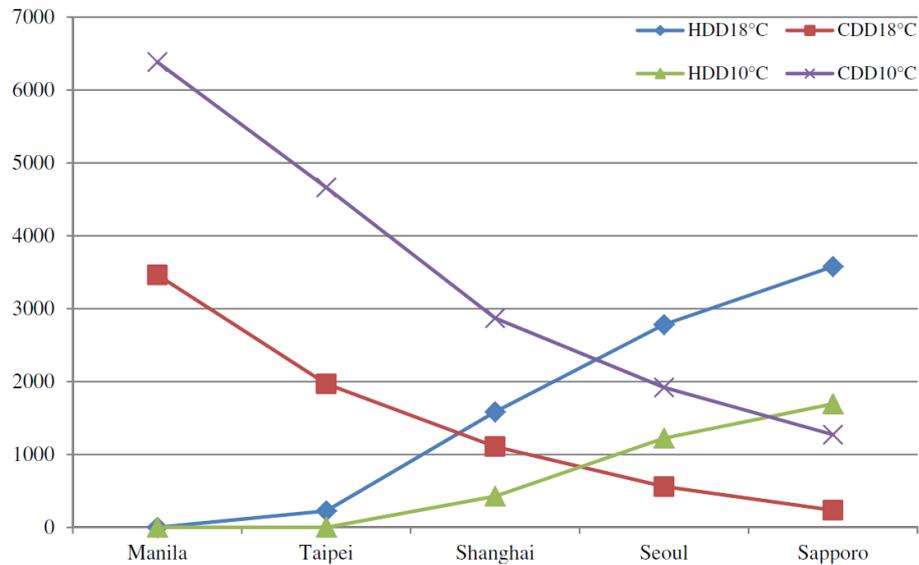
Tabela 9 - Propriedades das esquadrias adotadas no estudo de Lee et al. (2013).

Janela	Tipo	SHGC	T_{vis}	LSG	Fator U ($\text{W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$)	ID NFRC
# 1	Dupla camada	0,175	0,248	1,47	1,501	5021
# 2	Dupla camada	0,249	0,49	1,96	1,507	2172
# 3	Dupla camada	0,313	0,6	1,91	1,503	3088
# 4	Dupla camada	0,389	0,654	1,68	1,539	5034
5	Dupla camada	0,475	0,711	1,49	1,503	2211
# 6	Dupla camada	0,564	0,753	1,33	1,504	4017
# 7	Camada tripla	0,135	0,22	1,62	0,795	5021
# 8	Camada tripla	0,209	0,433	2,07	0,797	2172
# 9	Camada tripla	0,277	0,53	1,91	0,796	3088
# 10	Camada tripla	0,332	0,577	1,73	0,805	5034
# 11	Camada tripla	0,41	0,627	1,52	0,795	2211
# 12	Camada tripla	0,492	0,664	1,34	0,796	4017
Vidro Low-E	-	Tsol: 0,706	0,87	-	-	1209

Fonte: Lee et al. (2013).

As cinco cidades foram definidas de acordo com a classificação climática da ASHRAE para cobrir todas as zonas climáticas da Ásia. Um gráfico com as cidades escolhidas e seus graus-dia de resfriamento (CDD) e aquecimento (HDD) são mostrados na Figura 22.

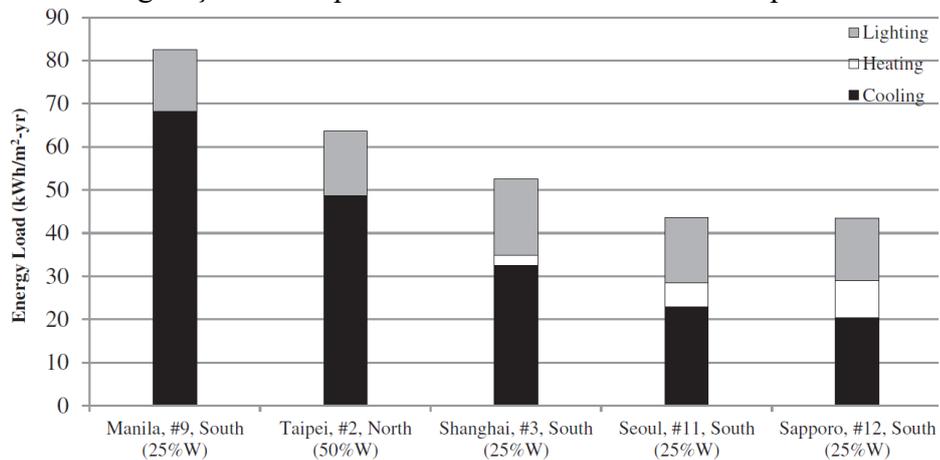
Figura 22 - Informações dos climas do leste asiático.



Fonte: Lee et al. (2013).

As melhores configurações de esquadrias encontradas para cada clima em função do desempenho, bem como as respectivas cargas de energia elétrica, estão apresentadas na Figura 23.

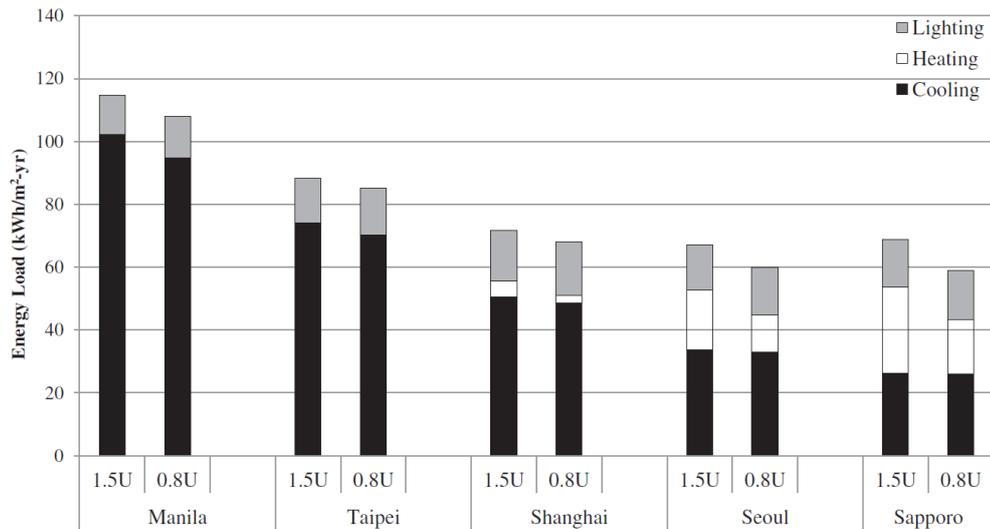
Figura 23 - Configurações de esquadrias mais eficientes definidos por Lee et al (2013).



Fonte: Lee et al. (2013).

O efeito das variações de coeficiente U das esquadrias é mostrado na Figura 24. De acordo com os resultados da simulação, as mudanças de coeficiente U têm efeito maior na redução da carga de energia de aquecimento do que na carga de energia de resfriamento. Assim, para regiões onde a carga de energia de aquecimento é de grande importância para o consumo do edifício, há mais vantagem na adoção de esquadrias de baixo coeficiente U.

Figura 24 - Efeito da mudança do coeficiente U no consumo de energia para os climas asiáticos.

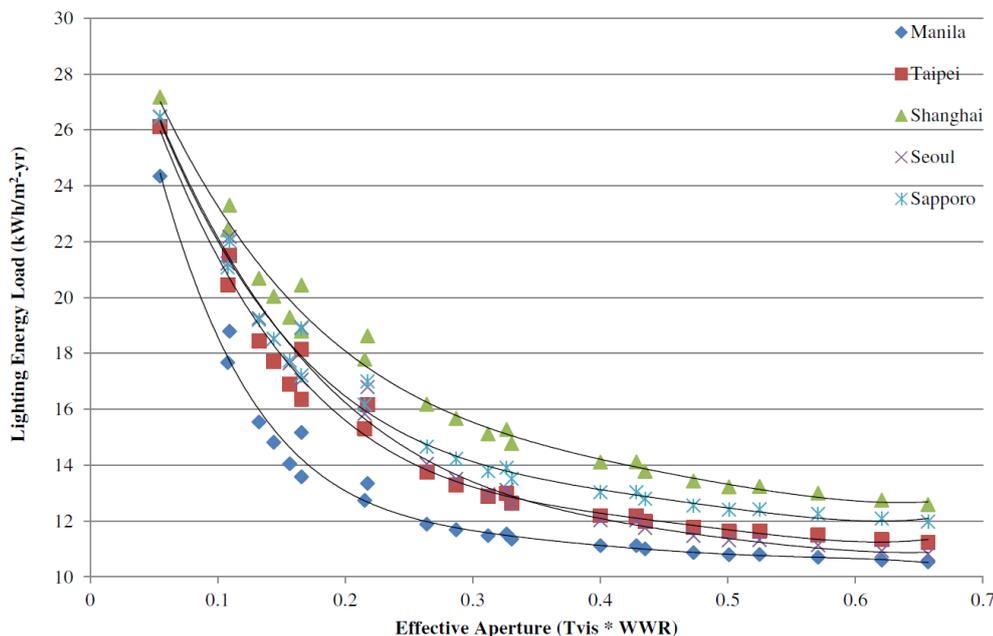


Fonte: Lee et al. (2013).

Um elevado SHGC significa que o edifício obtém uma quantidade considerável de ganho de calor solar através das esquadrias, o que tem um efeito positivo no inverno por meio da redução da energia de aquecimento, mas um efeito negativo no verão. Pelo menos nas 5 regiões asiáticas escolhidas para este estudo, que possuem características climáticas diferentes, um valor mais baixo de SHGC é vantajoso no consumo de carga de aquecimento e resfriamento somadas.

O consumo de energia anual por iluminação diminui proporcionalmente com o aumento do WWR (*Window to Wall Ratio*) ou PAF, conforme observado na Figura 25. Fatores influentes que afetam a carga de energia de iluminação incluem a radiação solar (que pode ser expressa como transmissão visível), latitude e tamanho da esquadria.

Figura 25 - Uso anual esperado de energia de iluminação em função do PAF (WWR) nas cinco cidades asiáticas analisadas.



Fonte: Lee et al. (2013).

Os autores concluíram que, de acordo com os resultados da simulação, as melhores configurações das esquadrias - tipo, tamanho e orientação - podem ser recomendadas como uma diretriz de projeto. Ainda foi observado que:

- O PAF deve ser minimizado para os climas analisados;
- No que diz respeito a orientação das esquadrias, depende muito do clima local para definir a melhor orientação para o seu posicionamento;
- Com base no efeito do coeficiente U no consumo de energia, o vidro triplo, com baixa transmitância térmica, ofereceu uma vantagem de desempenho, particularmente na economia de energia de aquecimento;
- As propriedades ideais de desempenho da esquadria variam conforme o clima;
- Ao projetar ou reformar um edifício, um processo de simulação de energia que avalia as propriedades ideais de desempenho da esquadria deve ser considerado.

Singh e Garg (2009), realizaram a classificação energética de dez tipos de vidros, para cinco zonas climáticas da Índia (Tabela 10), aplicados em três tipologias de edifícios residenciais. O consumo total de energia elétrica economizado pelos vidros a partir de um vidro de referência (vidro simples, incolor com 6 mm de espessura) foi encontrado por meio dos resultados de simulações computacionais desenvolvidas no programa TRNSYS. Finalmente,

foi realizada uma análise de regressão para desenvolver equações de classificação para diferentes vidros, edifícios e climas.

Tabela 10 - Valores médios mensais da radiação solar global e temperatura das cinco cidades indianas.

Month	Delhi (28° 35'N, 77° 12'E)		Jodhpur (26° 18'N, 73° 01'E)		Chennai (13° 00'N, 80° 11'E)		Banglore (12° 58'N, 77° 35'E)		Shillong (25° 34'N, 91° 53'E)	
	Global Radiation (kWh/m ² day)	Temp. (°C)	Global Radiation (kWh/m ² day)	Temp. (°C)	Global Radiation (kWh/m ² day)	Temp. (°C)	Global Radiation (kWh/m ² day)	Temp. (°C)	Global Radiation (kWh/m ² day)	Temp. (°C)
Jan	4.0	14.2	4.7	17.8	5.2	24.8	4.2	21.1	3.7	9.5
Feb	5.0	18.0	5.6	20.8	6.3	26.0	5.3	23.5	4.6	11.7
Mar	6.1	22.8	6.5	26.2	6.9	28.1	5.2	25.6	5.0	16.1
Apr	6.9	28.9	7.2	30.9	6.9	30.3	5.3	27.8	4.8	19.1
May	7.3	32.5	7.5	33.8	6.5	32.3	4.1	27.1	4.3	19.5
Jun	6.5	34.1	7.1	34.1	5.8	31.7	3.6	24.2	3.3	20.5
Jul	5.3	31.1	6.0	31.3	5.4	30.3	3.6	23.7	3.5	21.1
Aug	5.1	29.4	5.5	29.8	5.6	29.6	3.5	23.2	3.6	20.8
Sep	5.6	28.8	6.1	29.3	5.7	29.3	3.8	23.1	3.4	20.1
Oct	5.4	26.1	5.8	28.1	4.8	27.7	3.7	23.2	3.6	17.3
Nov	4.5	20.4	4.9	23.1	4.3	25.7	4.2	21.9	3.6	13.3
Dec	3.8	15.2	4.4	19.3	4.3	24.8	4.1	20.7	3.8	10.4

Fonte: Singh e Garg (2009).

Os diferentes vidros utilizados neste estudo e os respectivos coeficiente U e SHGC estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Diferentes vidros utilizados no estudo de Singh e Garg (2009) e suas propriedades.

Glazing no.	Glazing type	Glazing Abbreviation	U-value (Wm ⁻² K ⁻¹)	SHGC (g-value)
1	Single, 6 mm, clear	S Cl	5.65	0.83
2	Double, 6 mm, 12 mm air gap, clear	D Cl	2.95	0.73
3	Double, 6 mm, low-e coated, 12 mm air gap, clear	D LE 1	1.80	0.68
4	Double, 6 mm, low-e coated, 12 mm air gap, clear	D LE 2	1.74	0.54
5	Double, 6 mm, low-e coated, 12 mm air gap, clear	D LE 3	1.63	0.52
6	Double, 6 mm, green, 12 mm air gap, clear	D Grn	2.95	0.49
7	Double, 6 mm, grey, 12 mm air gap, clear	D Gry	2.95	0.47
8	Double, 6 mm, absorbing film coated gap, 12 mm air, clear ^a	D A SC1	2.90	0.35
9	Double, 6 mm, absorbing film coated gap, 12 mm air, clear ^a	D A SC2	2.80	0.24
10	Double, 6 mm, reflective film coated, 12 mm air gap, clear	D R SC	1.95	0.1

^a Glazing films and their spectral properties are different and hence different SHGC.

Fonte: Singh e Garg (2009).

Três tipos de edifícios são considerados. O *Building-I* é um edifício convencional, o *Building-II* é moderadamente isolado enquanto o *Building-III* apresenta alto índice de isolamento térmico (Tabela 12). O consumo total de energia elétrica para aquecimento e resfriamento foram encontrados separadamente para cada um dos três edifícios, cada clima e orientação geográfica.

Tabela 12 – Detalhes dos três tipos de edifícios analisados na Índia.

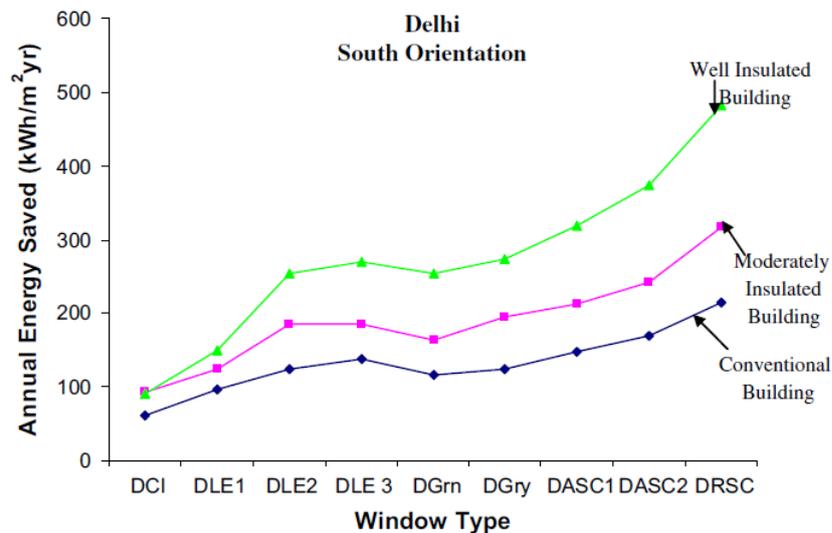
Tipo de construção	Dimensões do edifício	Parede U (W / m^2 K)	Telhado U (W / m^2 K)	K_{tot} (W / m^2 K)
Convencional (Building-I)	9 m × 9 m × 3 m	2,07	2,34	2,43
Moderadamente isolado (Building-II)	9 m × 9 m × 3 m	1,46	1,59	1,74
Bem isolado (Building-III)	10 m × 10 m × 3 m	0,52	0,54	0,76

Fonte: Singh e Garg (2009).

A área da esquadria é fixada em 20% da área da parede. Os edifícios são tratados como zonas únicas isoladas e simulações por hora são realizadas durante um ano. Na pesquisa de Singh e Garg (2009), esquadria implica apenas a área envidraçada sem qualquer área de perfil.

A Figura 26 mostra o efeito da transmissão térmica das paredes e tetos na economia de energia somada para resfriamento e aquecimento, voltadas para orientação sul em Nova Delhi. É percebido que quanto menor o coeficiente U da edificação, maior é a economia de energia.

Figura 26 - Energia anual economizada (aquecimento + resfriamento) por diferentes tipos de janelas e para diferentes edificios em Nova Delhi.



Fonte: Singh e Garg (2009).

Em resumo, para a cidade de Nova Delhi, que tem clima composto (inverno é ameno enquanto o verão é severo) bem como para Jodhpur, Chennai e Bangalore (onde o resfriamento é predominante) as esquadrias de controle solar são indicadas. Para Shillong, onde o

aquecimento é necessário por cerca de 6 meses, as esquadrias de baixa emissividade são as mais apropriadas.

Depois de efetuar diversas regressões multivariadas (com base no método do erro quadrático mínimo) entre a energia economizada e as variáveis (FS da esquadria e coeficiente U da esquadria e do edifício) as duas equações a seguir, uma para aquecimento e outra para resfriamento, foram encontradas por Singh e Garg (2009). Os autores elaboraram dois fatores de correção: um para diferentes climas (chamado fator climático, *CF*) e outro para orientação geográfica (chamado fator de orientação, *OF*). A Equação 2 de consumo de energia de aquecimento economizada, Q_{hes} (kWh/m² ano) e a Equação 3 de economia de energia para resfriamento economizada, Q_{ces} (kWh/m².ano) são dadas como:

$$Q_{he} = CF \cdot OF [- 7,30 + 55,92 \cdot g - 3,67 \cdot U - OCFH (1,84 - g) - 2,05 \cdot K_{tot} (g+1)] \quad (2)$$

$$Q_{ces} = CF \cdot OF [519,96 - 500,77 \cdot g - 12,45 \cdot U + 96,69 \cdot K_{tot} (g - 1)] \quad (3)$$

Onde:

g = FS;

U = Coeficiente U da esquadria, [W/m².K];

K_{tot} = Coeficiente U do edifício, [W/m².K];

CF = Fator climático;

OF = Fator de orientação;

$OCFH$ = Fator de correção de orientação para aquecimento.

Para conhecer a exatidão das equações encontradas, a energia anual economizada por diferentes esquadrias foi calculada para todos os climas e um coeficiente de correlação (R^2) foi determinado para todos os casos. O coeficiente de correlação (R^2) indica o quanto os resultados das equações de classificação de energia estão próximos aos resultados simulados pelo TRNSYS. Como os valores de R^2 situam-se entre 0,803 e 0,990, os valores calculados pelas equações são muito próximos aos encontrados pela simulação computacional e, portanto, confiáveis. Logo, ressalta-se que para os climas, tipos de construção e orientações analisadas no trabalho, as equações desenvolvidas podem ser utilizadas para selecionar a melhor esquadria dentre as diversas esquadrias disponíveis no mercado indiano.

Os autores concluíram que a economia anual de energia por uma determinada esquadria depende de vários fatores: os parâmetros da própria esquadria (coeficiente U e FS),

sua orientação, condições climáticas e parâmetros de construção. Além disso, foi concluído que a economia de energia proporcionada por diferentes esquadrias pode ser predita na forma de equação, envolvendo as variáveis listadas acima.

Maccari e Zinzi (2001) também desenvolveram equações para classificar esquadrias em edifícios residenciais, para a Itália. Para isso, foi necessário definir índices de desempenho para a classificação das esquadrias e parâmetros para avaliação de desempenho das edificações, realizar simulações computacionais e análises para desenvolver equações e reduzir os dados de simulação.

Os parâmetros considerados para as esquadrias foram T_{vis} , FS, coeficiente U e infiltração de ar. As sete esquadrias foram selecionadas de maneira que cobrisse uma ampla gama para o setor residencial italiano. As esquadrias selecionadas estão apresentadas na Tabela 13. A esquadria “A” foi a que apresentou a menor economia de energia e foi a considerada como a esquadria de referência.

Tabela 13 – Esquadrias selecionadas para as simulações do setor residencial italiano.

Código	Vidro	Quadro, Armação	U_{tot} (W / m ² K)	g (-)
A	Vidro único	Metal sem TB	6.1	0,87
B	Clear DGU	Metal sem TB	4,5	0,76
C	Clear DGU	Metal TB	3.1	0,76
D	DGU low-e (0.2)	Metal TB	2.6	0,72
E	DGU low-e (0.1)	Metal TB	2.4	0,64
F	DGU low-e ^a (0.1)	Metal TB	2.2	0,64
G	DGU low-e ^b (0,2)	Metal TB	2.6	0,47

Fonte: Maccari e Zinzi (2001).

A Itália é dividida em seis zonas climáticas, desde A (temperaturas altas) até F (temperaturas baixas). Para esta análise foi selecionada uma cidade para cada zona, exceto para a Zona A. O parâmetro distintivo de cada localidade são os graus-dia de aquecimento. Na Tabela 14 estão apresentadas as características de cada cidade, onde HDD são os graus-dia de aquecimento normalizados (para todo o ano), HDDc são os graus-dia de aquecimento calculados (apenas na temporada de aquecimento) e CDDc são os graus-dia de resfriamento

calculados com temperatura de referência de 24 °C. O último dado é a média da radiação solar incidindo nas fachadas das quatro orientações geográficas, durante o inverno e o verão, respectivamente.

Tabela 14 – Características dos climas da Itália.

Localidade	HDD (dia)	HDD _c (dia)	CDD _c (dia)	Ganhar. rad. (MJ / m ²)	Soma. rad. (MJ / m ²)
Palermo	751	1395	271,1	671	930
Olbia	1142	1912	180,2	636	934
Roma	1415	2193	152,9	608	932
Turim	2553	3059	136,0	534	901
Venosta	5036	5493	0,00	419	850

Fonte: Maccari e Zinzi (2001).

Foram simuladas três tipologias de edificações consideradas típicas italianas: casas geminadas, um edifício de quatro andares e um edifício de seis andares. No que diz respeito à área da esquadria, foi considerada uma relação fixa de 12,5% da superfície envidraçada para a área de piso, valor derivado de um padrão italiano que impõe um limite mínimo para edifícios residenciais.

Outro fator a tratar foi a orientação geográfica. Em edifícios residenciais a prática comum é usar o mesmo tipo de vidro para qualquer orientação, portanto, as necessidades de energia foram obtidas com a média dos valores obtidos para diferentes orientações, com passos de 45 ° totalizando oito orientações. Para encontrar os dados em que a classificação foi baseada, foram executadas mais de 1000 simulações computacionais com o programa TRNSYS.

Após as simulações, o consumo de energia foi analisado por m² (metro quadrado) e foi observado que as necessidades de energia dos três edifícios e a sua média eram quase as mesmas. Outra análise foi realizada para avaliar a influência do coeficiente U das paredes no balanço energético do edifício e foi concluído que diferenças relativas de economia de energia não dependem realmente de valores de coeficiente U das paredes. Logo, estes parâmetros puderam ser reduzidos.

Os autores observaram que em climas quentes (por exemplo, Palermo), a utilização de vidros com baixo FS são essenciais para obter economia de energia. Em climas frios (Venosta),

é importante a redução de perdas térmicas (coeficiente U de vidros e perfis), pois um melhor isolamento conduzirá, em qualquer caso, a um melhor desempenho da edificação.

O estudo encontrou os resultados que cada esquadria apresentou de economia de energia em comparação à esquadria de referência "A" para aquecimento e resfriamento. Logo após, foram calculadas diferentes curvas de regressão para cada zona climática. Cinco equações de regressão foram obtidas para as cinco localidades selecionadas, com o intuito de classificar as esquadrias.

Também se descobriu que as equações podem ter a precisão incrementada de acordo com o número de parâmetros selecionados. Se apenas os parâmetros da esquadria forem considerados, já é alcançada uma boa precisão. Porém, essa precisão melhora se os dados de radiação solar também forem inseridos.

Duer et al. (2002) desenvolveram um estudo para validar programas computacionais para a classificação de esquadrias em edificações residenciais na Dinamarca. Os cálculos para os vidros foram realizados nos programas *WIS*, *WINDOW*, *VISION*, *CALUMEN* e *GLAD99* e para os perfis (madeira, metal, PVC e misto) nos programas *FRAME*, *THERM* e *Winlso*. Os resultados encontrados para nove tipos de esquadrias, formadas por vidros insulados duplos e triplos, foram comparados com medições *in loco* em uma *hot-box* pelo método descrito na ISO 12567 (ISO, 2000).

Os autores observaram que, em geral, existe uma boa consistência entre os resultados. A diferença entre as temperaturas medidas e calculadas foi em todos os casos inferior a 1°C. Com isso, foi concluído que todos os programas investigados podem ser utilizados para o cálculo de classificação de vidros e esquadrias.

Sun et al. (2018) fizeram uma revisão dos métodos utilizados para prever o comportamento térmico e óptico de esquadrias, de métricas avançadas de avaliação de luz natural e da última geração de ferramentas de simulação energética.

Os autores concluíram que a capacidade de importar caracterização térmica em ferramentas como o *EnergyPlus*, bem como a capacidade de conectar o programa a ferramentas de iluminação, como o *Radiance*, cria uma estrutura onde esses estudos podem ser realizados com assertividade.

2.3 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Recomendações construtivas apropriadas para diferentes climas, orientação solar e tipos de edificação são necessárias para que as soluções não sejam unicamente focadas no condicionamento artificial. Com base no referencial bibliográfico, verificou-se que para os climas onde o resfriamento é predominante, quanto maior a seletividade entre luz e calor, mais eficiente será a esquadria.

Segundo Tian et. al (2010) os métodos utilizados por diversos países para análise e classificação de esquadrias consistem em duas etapas principais:

- a) Simulações computacionais térmicas simplificadas ou detalhadas devem ser conduzidas primeiramente - ferramentas que facilitam a avaliação do desempenho térmico e luminoso, tornando as análises muito mais rápidas, eficientes e com um custo muito menor do que se fossem desenvolvidas em um protótipo real.
- b) Todos os resultados extraídos das simulações devem ser utilizados para gerar uma classificação por meio de equações de regressão, com o intuito de oferecer informações rápidas e precisas quanto ao desempenho das esquadrias e também incentivar o desenvolvimento e o uso apropriado de vidros de alto desempenho.

Também foi observado que uma classificação de esquadrias depende diretamente de diversas variáveis, tais como:

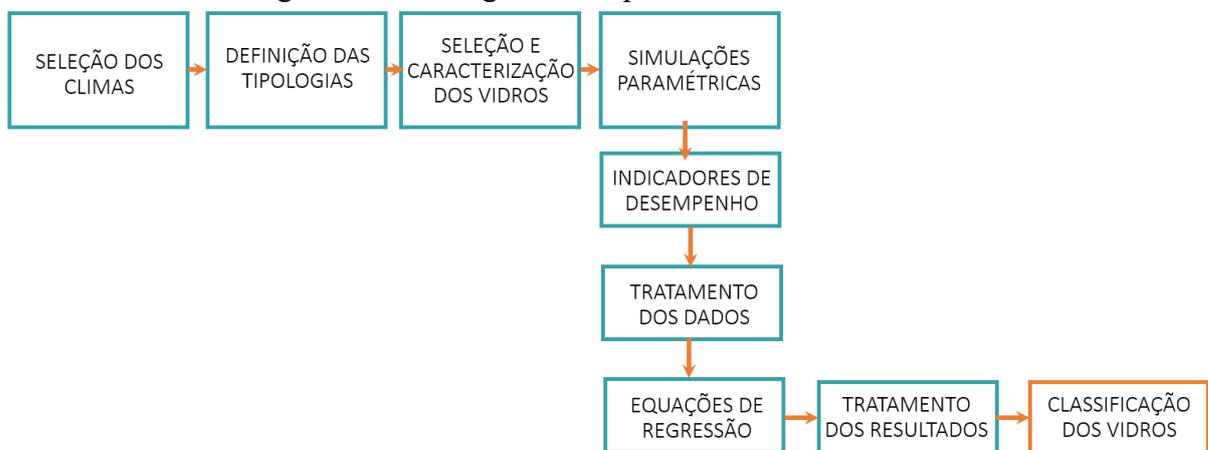
- O modelo da edificação e seu uso (residencial, comercial ou industrial);
- As dimensões dos ambientes em que a esquadria será inserida;
- O comportamento dos usuários - visando estabelecer uma correta dedução das cargas internas;
- A caracterização (propriedades) dos materiais da envoltória da edificação;
- A seleção e caracterização do conjunto da esquadria visando o tipo de perfil, os dispositivos de sombreamento (se houverem) e os vidros a serem analisados, pois a simulação depende diretamente das propriedades térmicas (FS e coeficiente U) e óptica (T_{vis}) das esquadrias.
- A seleção dos climas;
- A relação da área entre parede e esquadria (PAF);
- A orientação geográfica da edificação/esquadria;
- A escolha dos métodos de análise;
- A definição dos indicadores de desempenho das esquadrias.

3 DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO

O método desenvolvido nesta dissertação consiste em classificar diferentes tipos de vidros através de equações de regressão que preveem o consumo de energia para resfriamento e aquecimento de edificações residenciais em todos os climas brasileiros.

Para isto, os seguintes passos foram seguidos: seleção dos climas a serem simulados, definição das tipologias arquitetônicas representativas de edificações residenciais brasileiras, bem como suas cargas internas e ocupação e a seleção e caracterização dos vidros a serem analisados. Logo após, foram desenvolvidas simulações paramétricas, definidos os indicadores de desempenho e, também, os padrões de referência. A partir dos resultados obtidos, foram realizados o tratamento e a análise dos dados, bem como o desenvolvimento das equações de regressão. As equações de regressão permitem que seja possível analisar outros tipos de vidros sem que seja necessário simular novamente. Por último, foi desenvolvida a classificação dos vidros. Estes procedimentos estão ilustrados pelo fluxograma da Figura 27.

Figura 27 – Fluxograma dos procedimentos do método.



Fonte: A autora.

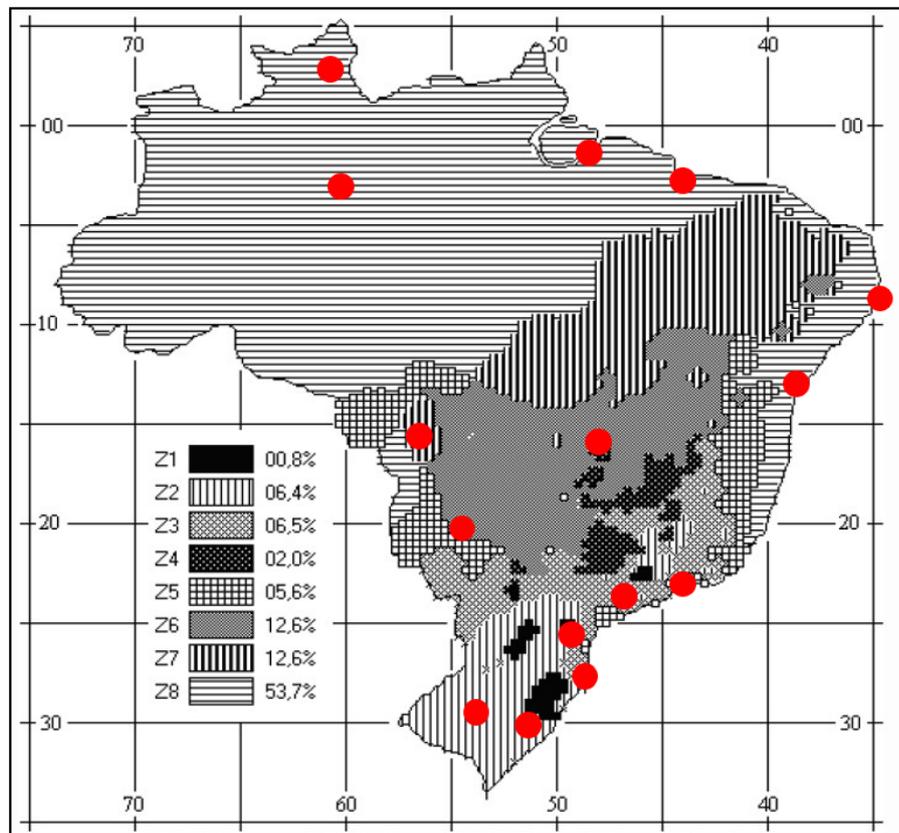
3.1 ZONEAMENTO CLIMÁTICO

As simulações computacionais foram realizadas para quinze cidades brasileiras. A primeira seleção foi definida com base nos principais fatores climáticos que influenciam o desempenho de um vidro: a radiação solar incidente na fachada dos edifícios e a diferença entre a temperatura interna e externa do ar. Desta primeira análise, foram selecionadas nove cidades. Considerando os zoneamentos climáticos da ABNT NBR 15220-3 (ABNT, 2005) e da ASHRAE Standard 169 (ASHRAE, 2013), optou-se por incluir cidades representativas de todas

as zonas climáticas que possuíssem arquivo climático. Logo, foram selecionadas mais seis cidades.

Sendo assim, as cidades representativas dos climas brasileiros foram escolhidas de acordo com sua latitude, disponibilidade de arquivo climático para simulação, radiação solar horizontal global, temperatura do ar externo ao longo do ano, densidade populacional e a abrangência dos zoneamentos climáticos considerados pela ABNT NBR 15220-3 (Figura 28) e pela ASHRAE Standard 169 (Figura 29). As localizações das cidades selecionadas estão representadas pela Figura 30.

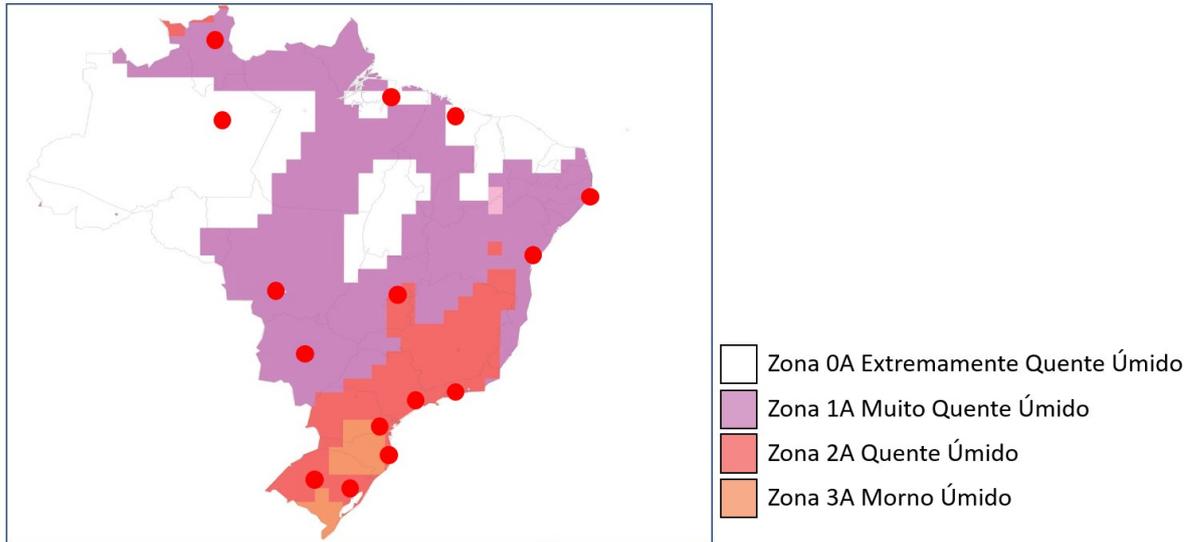
Figura 28 - Zoneamento climático brasileiro sugerido pela ABNT NBR 15220-3 com a localização das cidades selecionadas para esta pesquisa.



● Cidades selecionadas

Fonte: Adaptado de ABNT (2005).

Figura 29 - Zoneamento climático brasileiro sugerido pela ASHRAE Standard 169 e marcação das cidades analisadas.



Fonte: Adaptado de ASHRAE (2013).

Figura 30 - Mapa do Brasil com a divisão das regiões brasileiras e marcação das cidades selecionadas para esta pesquisa.



Fonte: A autora.

Foram utilizados arquivos climáticos do tipo TRY (*Test Reference Year*) disponibilizados pelo Laboratório de Eficiência Energética em Edificações do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina (LABEEE, 2020).

Desta maneira, foram selecionadas quinze cidades, que são: Belém – PA, Boa Vista – RR, Brasília – DF, Campo Grande – MS, Cuiabá – MT, Curitiba – PR, Florianópolis – SC, São Luís – MA, Manaus – AM, Recife – PE, Rio de Janeiro – RJ, Porto Alegre – RS, Salvador – BA, Santa Maria – RS e São Paulo – SP. A lista das cidades e suas características encontram-se detalhadas na Tabela 15.

Tabela 15 - Tabela com características das cidades selecionadas para análise.

Cid	Cidade	Estado	Região	Radiação Solar (kWh/m ² .dia)	Zoneamento Climático ABNT	Zoneamento Climático ASHRAE	Temp. Média Anual °C	Temp. Máx. Anual °C	Temp. Mín. Anual °C
1	Belém	PA	Norte	5,082	Zona 8	Zona 0A	26,5	28,8	23,9
2	Boa Vista	RR	Norte	5,263	Zona 8	Zona 1A	28,5	31,2	18,4
3	Brasília	DF	Centro-Oeste	5,368	Zona 4	Zona 2A	21,3	26,9	15,1
4	Campo Grande	MS	Centro-Oeste	5,275	Zona 6	Zona 1A	24,0	29,8	8,42
5	Cuiabá	MT	Centro-Oeste	5,335	Zona 7	Zona 1A	26,7	34,3	12,5
6	Curitiba	PR	Sul	4,160	Zona 1	Zona 3A	17,2	25,1	7,50
7	Florianópolis	SC	Sul	4,508	Zona 3	Zona 3A	20,7	28,2	10,6
8	São Luís	MA	Nordeste	4,310	Zona 8	Zona 0A	26,8	28,7	23,8
9	Manaus	AM	Norte	4,773	Zona 8	Zona 0A	26,8	30,7	23,0
10	Recife	PE	Nordeste	5,417	Zona 8	Zona 1A	27,1	30,9	22,9
11	Rio de Janeiro	RJ	Sudeste	5,042	Zona 8	Zona 2A	24,0	29,5	16,6
12	Porto Alegre	RS	Sul	3,259	Zona 3	Zona 2A	20,0	29,8	8,27
13	Salvador	BA	Nordeste	5,268	Zona 8	Zona 1A	25,9	29,9	21,9
14	Santa Maria	RS	Sul	4,449	Zona 2	Zona 2A	19,5	30,1	4,07
15	São Paulo	SP	Sudeste	4,591	Zona 3	Zona 2A	19,6	27,6	10,5

Fonte: A autora.

3.2 DEFINIÇÃO DOS MODELOS DE SIMULAÇÃO

Para as simulações computacionais horárias de desempenho térmico e energético de uma edificação, todas as fontes de calor devem ser levadas em consideração, sendo elas: condução de calor pelas paredes, cobertura e piso; condução de calor e ganho térmico pelos vidros; infiltração de ar externo ou perda de ar interno; geração de calor pelo sistema de iluminação e equipamentos elétricos e; geração de calor sensível e latente pelos usuários. Na representação de cada uma dessas trocas de calor, existem diversos parâmetros que irão simular a interação da edificação com o clima da cidade na qual ela está inserida, além da relação entre os diferentes

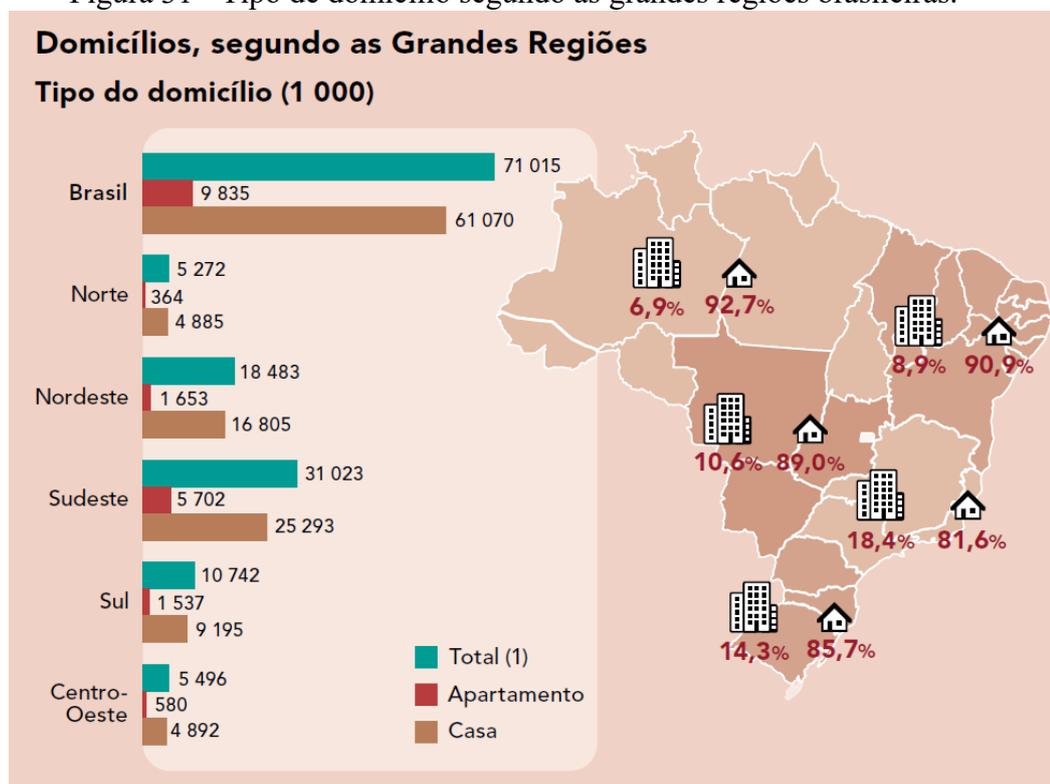
sistemas, que irão, por fim, influenciar no consumo de energia do sistema de condicionamento de ar.

O primeiro passo para as simulações é a definição da edificação. De acordo com estudos realizados em pesquisas elaboradas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2018), Ministério de Minas e Energia (MME, 2007) e Montes (2016), foi observado que os domicílios brasileiros divergem muito entre as classes sociais, motivo pelo qual optou-se criar três tipologias arquitetônicas, uma para cada grupo de classes: Classes A/B, Classe C e Classes D/E.

De acordo com o PPH – Pesquisa de Posse e Hábitos de Uso de Equipamentos Elétricos na Classe Residencial (Eletrobrás, 2019), 22,2% dos brasileiros fazem parte da Classe A/B, 44,90% da classe C e 32,9% da Classe D/E. Apesar de apresentar a menor porcentagem, foi constatado que as Classes A/B são as que consomem mais energia elétrica, com média mensal de 278,55 kWh, seguidas pela Classe C, que apresenta média mensal de 169,45 kWh, e pelas Classes D/E, com a média mensal de 107,81 kWh.

Quanto ao tipo de domicílio, constatou-se que a maioria dos brasileiros vivem em casas (Eletrobrás, 2019; IBGE, 2018; MME, 2007). É possível ver o resultado do estudo feito pelo IBGE em 2018 na Figura 31 .

Figura 31 - Tipo de domicílio segundo as grandes regiões brasileiras.



Fonte: IBGE (2018).

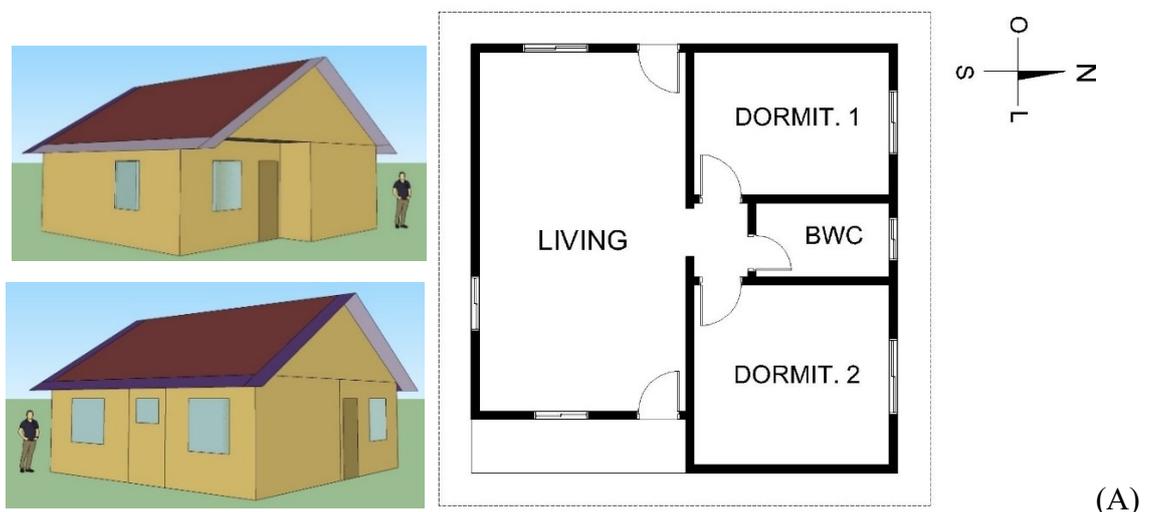
Ademais, de acordo com a Eletrobrás (2019), as residências das classes A/B apresentam uma média de área de 120 m², a cobertura é composta de concreto com telha de barro, possuem 9 cômodos e vivem 4 pessoas em cada casa. Os domicílios da classe C têm uma média de 70 m² de área, a cobertura é composta de telha de barro com forro de madeira, têm 6 cômodos e moram 3 pessoas em cada residência. Por sua vez as casas das classes D/E apresentam uma média de 50 m² de área, a cobertura é de telha de barro, possuem 5 cômodos e moram 3 pessoas em cada domicílio. Além do mais, foi constatado que 83% das residências no Brasil têm paredes de alvenaria com revestimento e 88% possuem telhado inclinado.

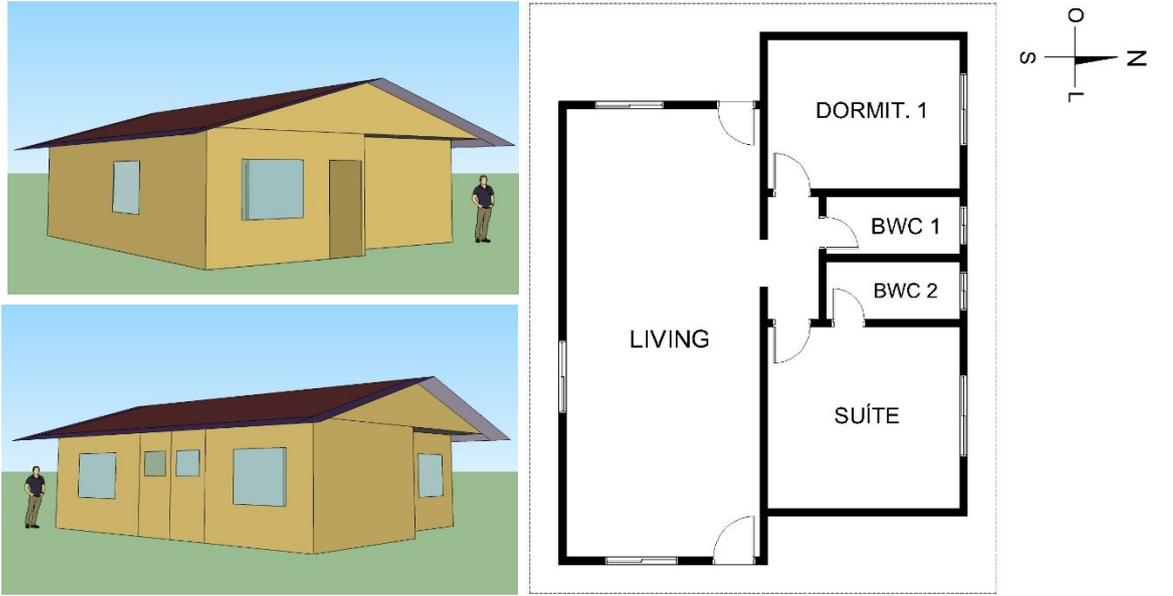
Ainda de acordo com a Eletrobrás (2019), 34% das esquadrias das residências no Brasil estão voltadas para o Norte, 11% para o Nordeste, 20% para o Leste e 19% dividido entre Sul, Sudeste e Oeste (8% não foram informados). Também foi coletada a informação que há esquadrias em mais de uma parede externa e apenas 8% possuem elementos de proteção solar como veneziana ou persiana externa. Além disso, segundo a Eletrobrás (2005), cerca de 90% dos vidros utilizados nas esquadrias das residências são vidros simples incolores.

Para definir a dimensão das aberturas, foi realizada uma pesquisa em Códigos de Obras de diversas cidades brasileiras, onde constatou-se que a maioria exige aproximadamente 14% de abertura para iluminação em relação à área de piso. Logo, as aberturas das tipologias foram calculadas para que tivessem 14% da área do piso de cada ambiente.

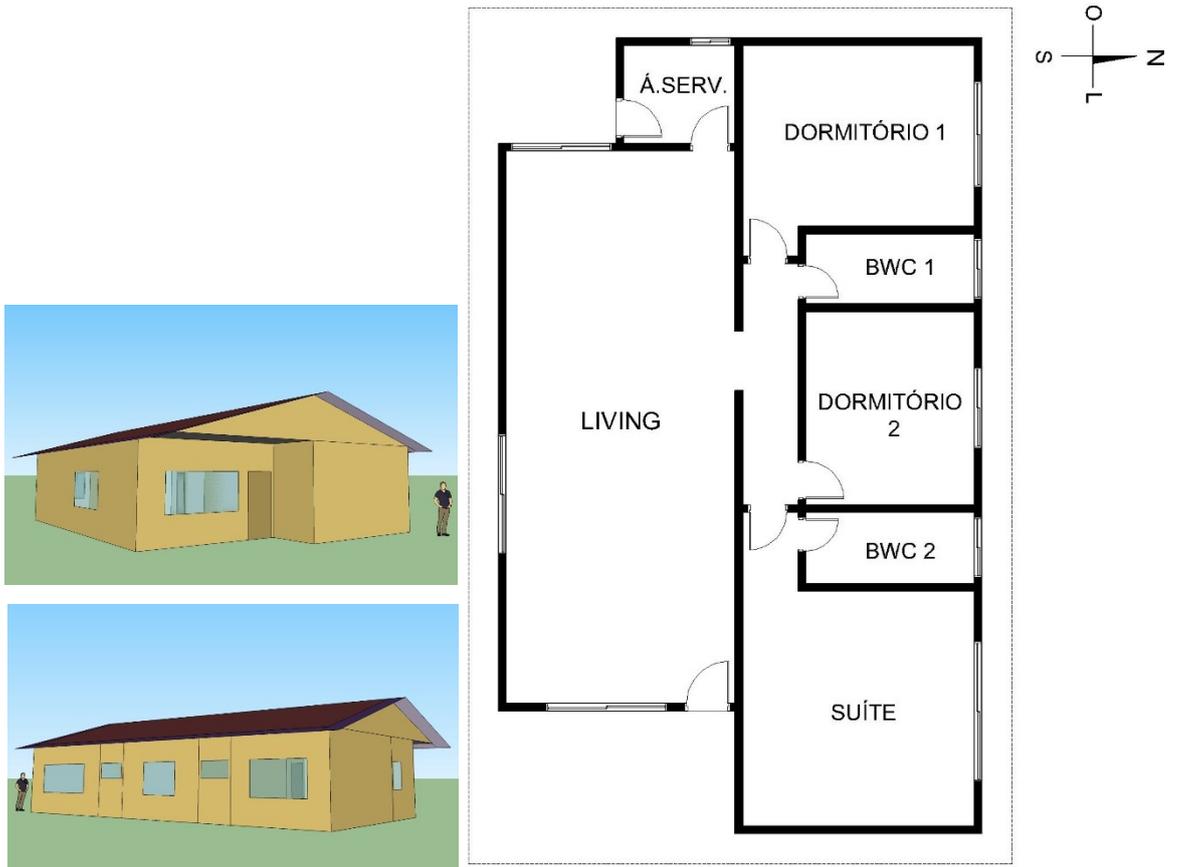
A partir dos dados levantados, foram elaboradas as três tipologias arquitetônicas utilizadas nas simulações: a TP1, com 50 m², representando as classes D/E; a TP2, com 70 m², representando a classe C e a TP3, com 120 m², representando as classes A/B. As tipologias seguem representadas pela Figura 32. Os modelos detalhados e a tabela de esquadrias podem ser encontrados no Apêndice A.

Figura 32- Perspectivas e plantas esquemáticas TP1 (A), TP2 (B) e TP3 (C).





(B)



(C)

Fonte: A autora.

As três tipologias foram consideradas como casas térreas, com laje de concreto de 20 cm de espessura no piso, portas de madeira de 3,5 cm de espessura, paredes de tijolos 6 furos com reboco dos dois lados, pintadas com cores claras, telhado com telhas cerâmicas claras com inclinação de 30%, forro de madeira de 0,5 cm e pé direito de 300 cm. Foi considerado um beiral de 60 cm em todos os lados. As aberturas foram dimensionadas com área de 14% da área de piso de cada ambiente e foi considerado apenas o vidro, sem perfis e elementos de sombreamento. O modelo foi simulado de maneira que a maioria das esquadrias ficassem voltadas para o Norte. As propriedades dos materiais considerados estão listados na Tabela 16 a seguir. Foi considerado o uso do ar condicionado nas três tipologias para os ambientes de sala e dormitórios.

Tabela 16 - Propriedades dos materiais das tipologias simuladas.

Unidade	Materiais						
	Reboco Int.	Laje de Concreto	Madeira Portas	Telha cerâmica branca	Reboco Ext.	Tijolo 6 furos camada cerâmica	Madeira Forro
	Rugoso	Rugoso	Média	Rugoso	Rugoso	Rugoso	Média
cm	2,5	2,0	3,5	1,5	3,5	2,5	0,5
W/m-K	1,2	1,8	0,2	1,0	1,2	0,9	0,2
kg/m ³	2000	2200	750	1800	2000	1500	750
J/kg-K	1000	1000	1340	920	1000	920	1340
Adim.	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Adim.	0,5	0,5	0,7	0,3	0,4	0,5	0,7
Adim.	0,5	0,5	0,7	0,3	0,4	0,5	0,7

Fonte: A autora.

A densidade de carga interna representa a soma das três principais fontes internas de calor: iluminação, equipamentos elétricos e pessoas. Considerou-se a atividade metabólica com calor gerado de 130 W por pessoa. A parcela de calor latente gerado pelas pessoas é calculada pelo programa *EnergyPlus* (ENERGYPLUS, 2019) durante a simulação, utilizando uma equação polinomial em função da taxa metabólica e temperatura do ar interno.

Foram considerados um total de quatro pessoas na TP3 e três na TP2 e TP1. Nos horários em que foi definida ocupação nos dormitórios, na TP3 foram consideradas duas pessoas na suíte, uma pessoa no dormitório 1 e uma pessoa no dormitório 2. Na TP2 duas pessoas na suíte e uma pessoa no dormitório 1. Na TP1 duas pessoas no dormitório 1 e uma pessoa no dormitório 2. Para determinar o padrão de ocupação foi considerado o sugerido pelo Projeto de Emenda ABNT NBR 15575-1 (2021). O padrão de ocupação e o uso da iluminação da sala e dos dormitórios estão detalhados na Tabela 17.

Tabela 17 - Padrão de ocupação e uso da iluminação.

Sala Ocupação		Sala Iluminação	
Período	Percentual	Período	Percentual
22h às 8h	0%	16h às 22h	100%
8h às 14h	25%	22h às 16h	0%
14h às 18h	50%		
18h às 22h	100%		

Dormitório Ocupação		Dormitório Iluminação	
Período	Percentual	Período	Percentual
22h às 8h	100%	00h às 6h	0%
8h às 22h	0%	6h às 8h	100%
		8h às 22h	0%
		22h à 00h	100%

Fonte: A autora.

Quanto à carga, foi considerada uma lâmpada fluorescente compacta de 12W por ambiente, de acordo com as respostas captadas pela Eletrobrás (2019). Também foi considerada 100W de carga do televisor e 50W do refrigerador. O televisor foi considerado ligado das 12h até às 22h e o refrigerador 24 horas por dia.

3.3 SELEÇÃO DOS PARÂMETROS DE ENTRADA

A transferência de calor numa esquadria ocorre por quatro fontes ou formas: radiação solar, convecção e condução, radiação térmica (infravermelha) e infiltração de ar. O tipo de vidro e suas propriedades físicas irão influenciar diretamente na quantidade de ganho ou perda de calor por radiação e convecção (WESTPHAL, 2016).

Para as simulações, foram consideradas as propriedades dos vidros, sem considerar o perfil, pois a principal porção do fluxo de calor através das esquadrias nos climas brasileiros é resultado da radiação solar que atravessa o vidro.

Os vidros classificados foram definidos de acordo com o fator solar (FS), a transmissão visível (Tvis) e a transmitância térmica (U), de forma que abrangessem uma faixa de diferentes valores de FS. Para isto, foi utilizado o programa WINDOW 7.4 (LBNL, 2019), que permite análises das propriedades ópticas e térmicas de vidros e esquadrias, possui uma ampla base de dados de propriedades de vidros produzidos no mundo inteiro (a IGDB – *International Glazing Database*) e permite calcular a Tvis e o FS do vidro de acordo com procedimentos normativos consagrados. Dentro de um padrão estabelecido visando estes parâmetros, foi selecionada uma amostragem de produtos.

Os vidros selecionados para as análises e um resumo das suas propriedades térmicas e luminosas (FS, coeficiente U e T_{vis}) são mostrados na Tabela 18. Os vidros selecionados foram numerados de acordo com o fator solar, sendo o vidro #1 o que possui maior FS e o #14 o que possui menor FS. Os vidros numerados de #15 a #28 são vidros insulados, gerados a partir dos vidros numerados de #1 a #14 adicionando uma camada de ar de 12,70 mm mais o vidro #29, que se trata de um vidro incolor de 6mm de espessura. A última coluna da tabela apresenta o índice de seletividade (IS), que corresponde à razão entre a transmissão visível e o fator solar.

Tabela 18 – Propriedades dos vidros simulados.

Vidro	Composição	FS	U W/(m².K)	T_{vis}	IS
#1	monolítico	0,86	5,89	0,90	1,05
#2	monolítico	0,61	5,79	0,43	0,71
#3	laminado com incolor	0,59	5,63	0,72	1,21
#4	monolítico	0,57	5,56	0,52	0,91
#5	monolítico	0,46	5,57	0,37	0,80
#6	monolítico	0,43	3,23	0,76	1,76
#7	laminado com incolor	0,39	5,63	0,47	1,20
#8	monolítico	0,35	3,23	0,67	1,91
#9	laminado com incolor	0,35	5,63	0,39	1,12
#10	monolítico	0,29	3,14	0,55	1,90
#11	monolítico	0,28	4,88	0,20	0,71
#12	laminado com incolor	0,27	5,7	0,13	0,48
#13	laminado com verde	0,26	5,63	0,33	1,29
#14	monolítico	0,22	4,24	0,14	0,63
#15	#1 + Ar 12,7mm + Incolor 6mm	0,75	2,69	0,80	1,07
#16	#2 + Ar 12,7mm + Incolor 6mm	0,49	2,67	0,38	0,78
#17	#3 + Ar 12,7mm + Incolor 6mm	0,51	2,66	0,64	1,25
#18	#4 + Ar 12,7mm + Incolor 6mm	0,49	2,63	0,47	0,96
#19	#5 + Ar 12,7mm + Incolor 6mm	0,36	2,61	0,33	0,92
#20	#6 + Ar 12,7mm + Incolor 6mm	0,38	1,64	0,67	1,76
#21	#7 + Ar 12,7mm + Incolor 6mm	0,33	2,66	0,42	1,27
#22	#8 + Ar 12,7mm + Incolor 6mm	0,31	1,64	0,59	1,90
#23	#9 + Ar 12,7mm + Incolor 6mm	0,29	2,66	0,35	1,21
#24	#10 + Ar 12,7mm + Incolor 6mm	0,25	1,59	0,50	2,00
#25	#11 + Ar 12,7mm + Incolor 6mm	0,24	2,39	0,18	0,75
#26	#12 + Ar 12,7mm + Incolor 6mm	0,21	2,66	0,12	0,57
#27	#13 + Ar 12,7mm + Incolor 6mm	0,21	2,66	0,30	1,43
#28	#14 + Ar 12,7mm + Incolor 6mm	0,18	2,14	0,13	0,72
#29	monolítico	0,84	5,70	0,89	1,06

Fonte: A autora.

Para as simulações, as propriedades dos vidros foram introduzidas no programa computacional *EnergyPlus* por meio do objeto “*WindowMaterial:Glazing*”. As simulações foram executadas com o uso deste objeto, pois ele permite detalhar as propriedades dos vidros, as quais são conhecidas pois são produtos existentes no mercado. Estas informações são necessárias para este tipo de análise com atenção especial ao comportamento térmico e óptico dos vidros. As propriedades utilizadas no estudo são: transmissão solar (Tsol), reflexão solar pela face externa (Rsol1), reflexão solar pela face interna (Rsol2), transmissão visível (Tvis), reflexão visível pela face externa (Rvis1), reflexão visível pela face interna (Rvis2), emissividade infravermelha da face interna (Emis1) e emissividade infravermelha da face externa (Emis2). Essas propriedades ópticas dos vidros #1 a #14, utilizadas como base para as simulações são apresentadas na Tabela 19.

Tabela 19 – Propriedades dos vidros monolíticos.

Vidros	Esp. (mm)	Tsol	Rsol1	Rsol2	Tvis	Rvis1	Rvis2	Emis1	Emis2
#1	3,00	0,84	0,08	0,08	0,90	0,08	0,08	0,84	0,84
#2	6,00	0,46	0,05	0,05	0,43	0,05	0,05	0,84	0,84
#3	8,00	0,52	0,17	0,14	0,72	0,09	0,09	0,84	0,84
#4	6,00	0,48	0,13	0,16	0,52	0,17	0,17	0,84	0,78
#5	6,00	0,31	0,16	0,22	0,37	0,21	0,18	0,84	0,76
#6	6,00	0,38	0,29	0,43	0,76	0,06	0,04	0,84	0,04
#7	8,00	0,31	0,34	0,27	0,47	0,25	0,19	0,84	0,84
#8	6,00	0,29	0,33	0,50	0,67	0,12	0,11	0,84	0,04
#9	8,00	0,26	0,36	0,27	0,39	0,31	0,19	0,84	0,84
#10	6,00	0,23	0,36	0,52	0,55	0,15	0,18	0,84	0,01
#11	6,00	0,17	0,25	0,27	0,20	0,33	0,25	0,84	0,55
#12	8,00	0,11	0,24	0,31	0,13	0,28	0,38	0,84	0,84
#13	8,00	0,15	0,40	0,13	0,33	0,26	0,19	0,84	0,84
#14	6,00	0,12	0,29	0,42	0,14	0,32	0,40	0,84	0,84

Fonte: A autora.

3.4 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Para este tipo de estudo, tem se utilizado comumente a simulação computacional, (como foi visto no referencial bibliográfico deste trabalho), ferramenta que facilita a avaliação do desempenho térmico, tornando as análises muito mais rápidas, eficientes e com um custo muito menor do que se fossem desenvolvidas em um protótipo real. A simulação tem a vantagem de verificar o desempenho das edificações antes mesmo de serem construídas, além

de possibilitar determinar os dados de entrada e variar apenas um parâmetro a fim de mensurar sua influência no modelo.

Para as simulações deste trabalho foi utilizado o programa *EnergyPlus* (ENERGYPLUS, 2019). O *EnergyPlus* é um programa de simulação térmica e energética integradas, que considera no cálculo do balanço térmico as trocas térmicas pela envoltória e a influência dos ganhos internos no desempenho do sistema de condicionamento de ar da edificação a cada hora ou minuto de cálculo. O programa atende aos requisitos para ser utilizado dentro do escopo da certificação LEED (2013) e da ASHRAE Standard 90.1 (ASHRAE, 2007). Além de ser validado pela ASHRAE Standard 140 (ASHRAE, 2014), também é o programa recomendado para análise por simulação dentro do programa de etiquetagem de edificações do PROCEL/INMETRO (PROCEL, 2019), bem como pela norma brasileira ABNT NBR 15575-1 (ABNT, 2013).

O *EnergyPlus* permite a análise integrada do desempenho térmico da envoltória da edificação (fachadas, coberturas e pisos) frente ao clima, suas cargas internas (equipamentos, iluminação e pessoas), sistema de condicionamento de ar e demais equipamentos elétricos. O programa calcula não apenas o consumo de energia, como também permite prever as condições de desempenho térmico nos ambientes internos da edificação. Os cálculos são desenvolvidos em base horária, permitindo a análise detalhada do desempenho do edifício considerando a variação climática ao longo dos dias, meses e ano (WESTPHAL, 2016).

Para as análises foram realizados 1260 casos de simulações paramétricas. Os ambientes *living* e dormitórios das três tipologias foram condicionados artificialmente com o sistema de condicionamento de ar de expansão direta, representado no *EnergyPlus* com objetos do tipo PTHP (*Packaged Terminal Heat Pump*), equivalente ao uso de aparelhos *splits*. O sistema possui COP 3,0 W/W (*coefficient of performance*) e seu termostato foi configurado com o ponto de ajuste de aquecimento em 20°C e de resfriamento em 24 °C, conforme Tabela 20. Na Tabela 20 também é possível observar os números utilizados para renovação e infiltração de ar. Nesta configuração, o programa considera um sistema de condicionamento individual para cada zona térmica.

Tabela 20 – Características do sistema de condicionamento de ar.

Tipo	PTHP (<i>Packaged Terminal Heat Pump</i>), equivalente a um aparelho <i>Split</i> .
COP	3,0 W/W.
<i>Setpoints</i>	Aquecimento 20°C; Resfriamento 24°C.
Capacidade	Definida pelo auto dimensionamento do <i>EnergyPlus</i> .
Renovação de ar	0,0075 m ³ /s por pessoa.
Taxa de infiltração	0,5 trocas de ar por hora na sala e dormitórios, 1 no ático e 2 nos banheiros.

Fonte: A autora.

3.5 INDICADORES DE DESEMPENHO

Foram extraídos, dos dados de saída das simulações para as 15 cidades, o consumo anual de energia (em kWh) para aquecimento e resfriamento proporcionado por cada um dos 28 vidros aplicados nos três modelos arquitetônicos, totalizando 2520 registros de consumo.

Primeiramente, observou-se como os resultados se comportavam em cada clima e em cada tipologia separadamente, depois disso foi possível observar um padrão de comportamento e a possibilidade de agrupar aqueles que apresentavam uma tendência análoga em seu comportamento.

Também foi observado que os resultados obtidos pela simulação, em consumo anual de energia em kWh, apresentaram-se de maneira proporcional à área de piso e de vidro. Logo, as análises puderam ser realizadas considerando o consumo anual em kWh por m² de vidro, pois o vidro é o objeto principal desta pesquisa.

Após agrupar os resultados análogos, foram elaboradas análises de regressão multivariada para fornecer equações que preveem o consumo de energia por cada um dos 28 vidros. Primeiramente, foi gerada uma equação para cada tipo de clima e tipologia, depois disso percebeu-se a possibilidade de adicionar os indicadores de clima – GDR, GDA (graus-dia de resfriamento e de aquecimento) e radiação solar - em uma única equação, excluindo a necessidade de haver coeficientes diferentes para cada zona climática.

Para verificar a correlação, os resultados obtidos através das equações de regressão foram comparados com os resultados obtidos pelas simulações computacionais. Após inúmeros testes, as equações que apresentaram uma melhor correlação estão apresentadas no próximo capítulo deste trabalho.

Para analisar esta correlação foi calculado e adotado o R², que é o coeficiente de determinação que compara os valores “y” estimados e reais e os intervalos no valor de 0 a 1. Se o resultado for 1, existe uma correlação perfeita no exemplo — não há diferença entre o

valor “y” estimado e o valor “y” real. No outro extremo, se o coeficiente de determinação for 0, a equação de regressão não será útil na previsão de um valor “y” (Microsoft, 2019).

Logo após, foi feita uma classificação da economia de energia proporcionada por cada vidro para aquecimento e resfriamento. Esta classificação visa informar a porcentagem com que o vidro analisado é melhor em relação ao vidro de referência em termos de economia de energia. Para isto, a classificação foi desenvolvida da seguinte forma: primeiramente, foi identificado o vidro de referência, ou seja, o que proporcionou maior consumo para resfriamento e aquecimento para cada tipologia e clima. Na sequência, foi aplicada a Equação 4 para encontrar o percentual de economia de energia proporcionado por cada vidro em relação ao vidro de referência.

$$P = [1 - (V_a/V_r)].100 \quad (4)$$

Onde:

P = percentual de economia de energia em relação ao vidro de referência, [%];

V_a = consumo anual do modelo com o vidro analisado [kWh];

V_r = consumo anual do modelo com o vidro de referência [kWh].

Observou-se que a unidade amostral (28 vidros) apresentou um comportamento diretamente proporcional em todos os grupos de cidades e tipologias, porém com ordens de grandeza diferentes. Para poder compará-los eles foram normalizados. O vidro que apresentou maior economia em relação ao vidro de referência de cada cidade foi considerado como uma economia de 100% e as economias dos demais vidros foram ajustadas proporcionalmente a este valor máximo. Sendo assim, os vidros foram trazidos para a mesma ordem de grandeza por meio da Equação 5.

$$C = (P.100) / M \quad (5)$$

Onde:

C = percentual de economia de energia em relação ao vidro de referência normalizado [%];

P = percentual de economia de energia em relação ao vidro de referência, [%];

M = vidro que apresentou maior economia em relação ao vidro de referência em cada grupo de cidades e tipologias.

A partir dos resultados da Equação 5 foi possível observar que a unidade amostral (28 vidros) se comportou de forma diretamente proporcional em todos os grupos de cidades e tipologias. Dessa forma, foi possível fazer uma classificação dos vidros de A (mais eficiente) até E (menos eficiente), com base nos percentuais normalizados de economia de energia estimados pela equação.

4 RESULTADOS

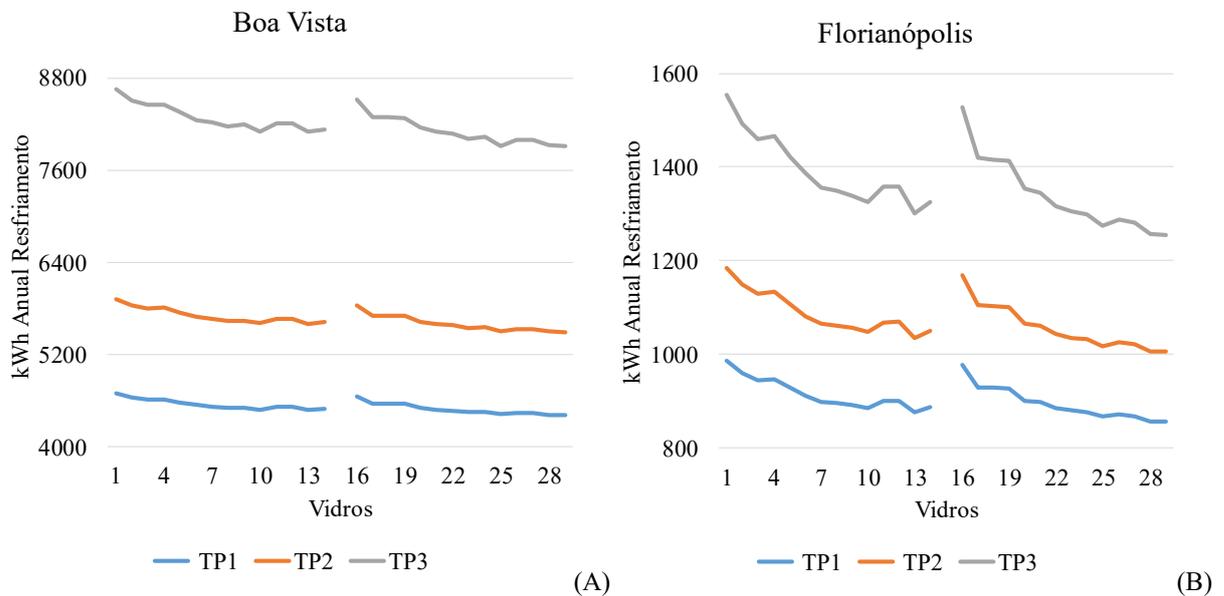
4.1 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES PARAMÉTRICAS

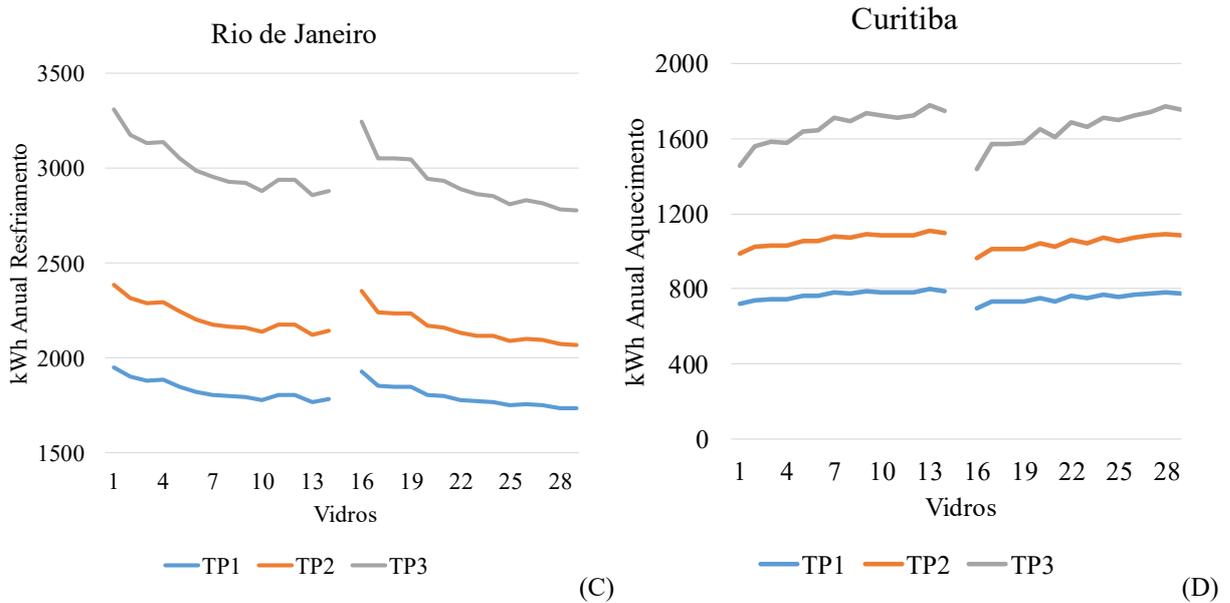
Inicialmente, apresenta-se uma análise da relação dos parâmetros variados nas simulações paramétricas com o consumo anual de energia elétrica para condicionamento de ar, de cada tipologia e clima, para avaliar o comportamento energético dos vidros.

Na Figura 33 mostra-se o comportamento das tipologias em relação ao consumo anual de energia para resfriamento nas cidades de Boa Vista, Rio de Janeiro e Florianópolis e para aquecimento na cidade de Curitiba, em kWh. Esta última foi escolhida para esta representação pois apresentou o maior consumo em aquecimento.

Observando os gráficos fica evidente o comportamento análogo entre as cidades, as tipologias arquitetônicas e os tipos de vidros. Apesar de apresentarem ordens de grandeza diferentes, eles seguem uma tendência semelhante de variação de consumo pelo tipo de vidro.

Figura 33 - Comportamento do consumo de energia (kWh) anual por resfriamento nas cidades de Boa Vista, Florianópolis e Rio de Janeiro e para aquecimento na cidade de Curitiba, para os 28 tipos de vidros em relação as três tipologias.



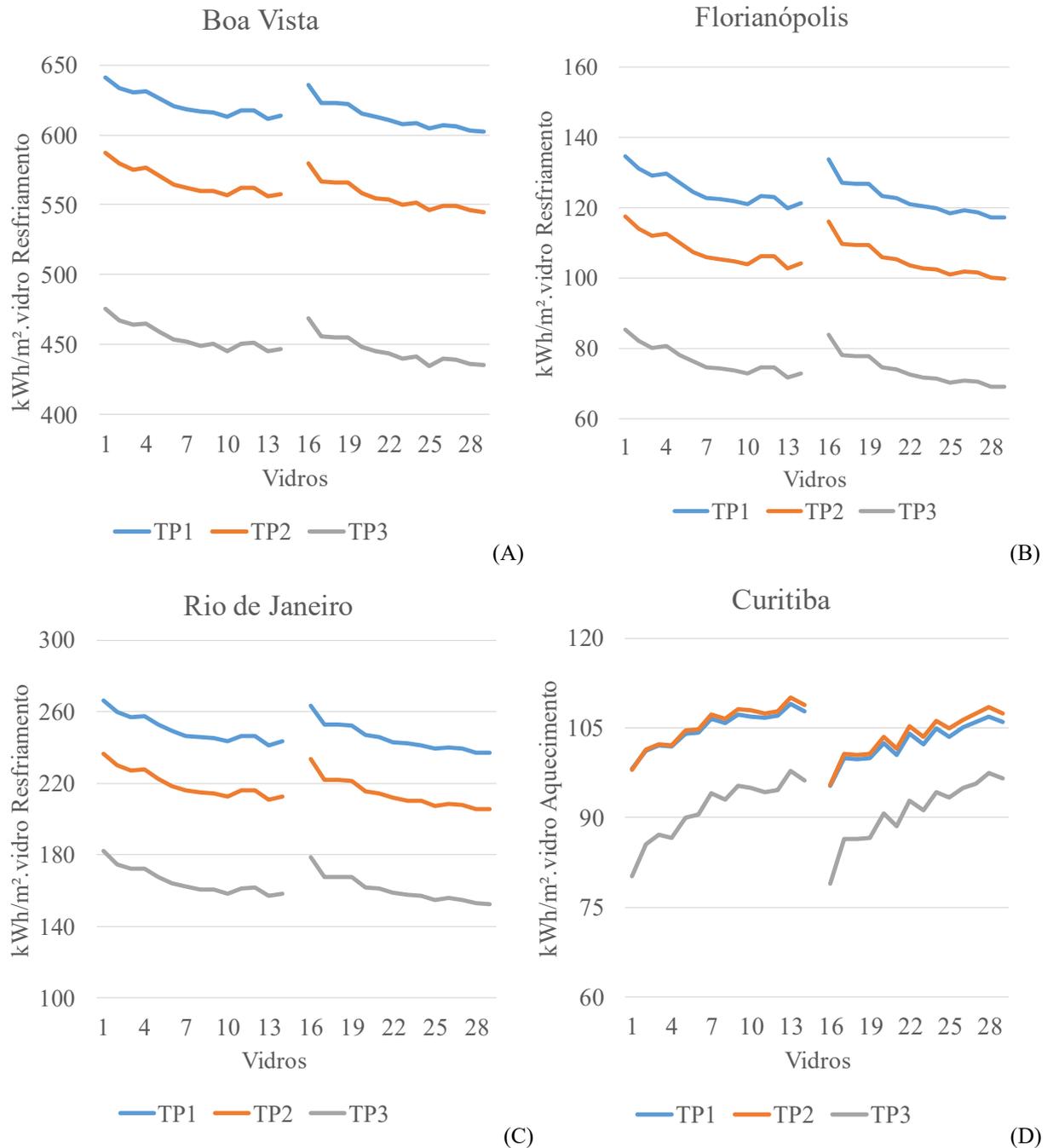


Fonte: A autora.

Como era esperado, o consumo de energia total foi maior para a tipologia de 120 m² de área (TP3), seguida pela TP2 (70 m²) e por último a TP1 (50 m²). Porém, quando é analisado o consumo de energia anual para resfriamento da edificação dividido por m² de vidro, esta tendência é invertida, e a tipologia que apresenta maior consumo é a TP1 e menor é a TP3, como pode ser observado na Figura 34-A, B e C a seguir. A densidade de carga interna da TP1 é 79W/m², da TP2 57W/m² e da TP3 39W/m², os resultados para consumo de energia por m² de vidro estão relacionados à essas densidades de cargas internas, sendo maior para as edificações mais compactas, fazendo com que o consumo de energia anual por m² de vidro também seja maior.

No caso do consumo de energia anual por aquecimento por m² de vidro, a tipologia que apresentou maior consumo foi a TP2, com valores ligeiramente mais altos que a TP1 (Figura 34). A TP3 foi a que apresentou menor consumo, em todos os casos de consumo de energia para aquecimento por m² de vidro. Esse comportamento pode ser observado na Figura 34-D. Em virtude do diferente comportamento para resfriamento e aquecimento entre as tipologias, decidiu-se tratar a relação dos parâmetros do vidro com esses dois usos finais de forma separada.

Figura 34 - Consumo de energia anual por metro quadrado de vidro (kWh/m² vidro) por resfriamento nas cidades de Boa Vista, Florianópolis e Rio de Janeiro e para aquecimento na cidade de Curitiba em relação aos 28 tipos de vidros e às três tipologias.

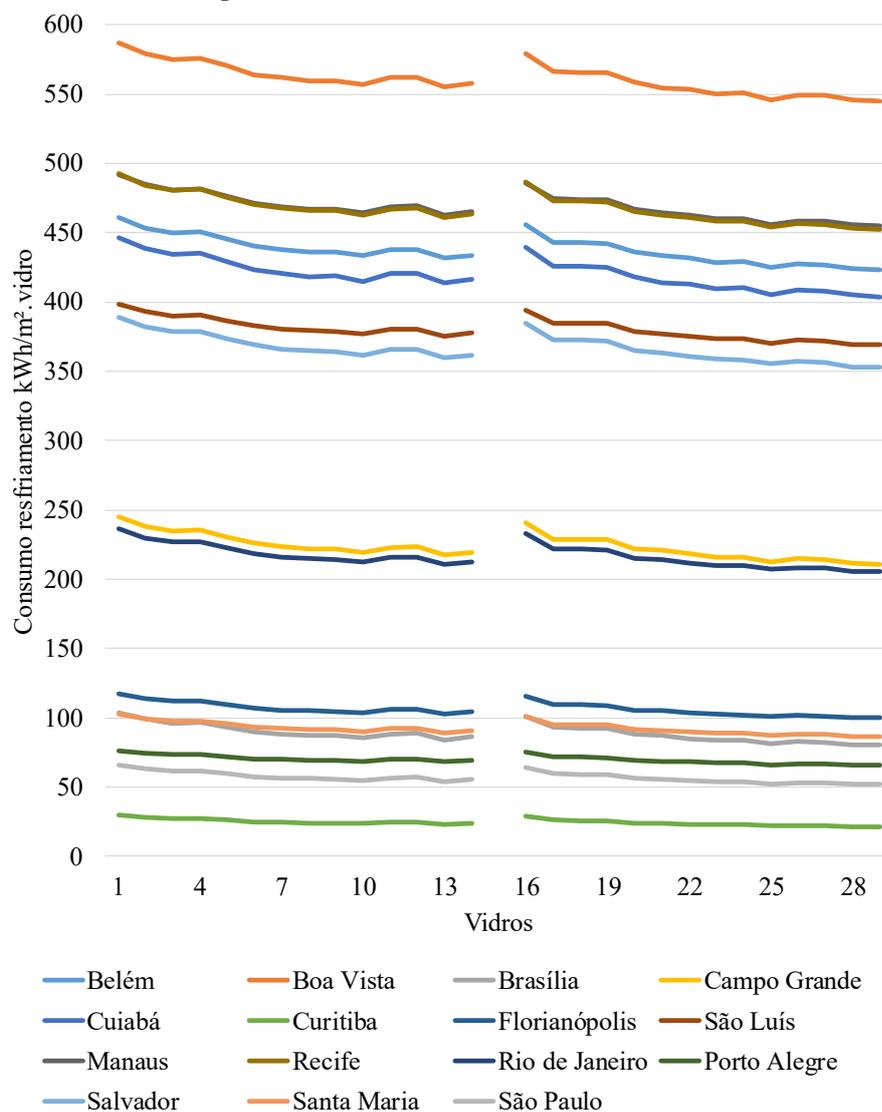


Fonte: A autora.

Na Figura 35 é possível observar o consumo anual para resfriamento em kWh/m² de vidro proporcionado por cada um dos 28 vidros para a TP2 em todas as cidades simuladas. Os resultados completos para consumo de energia por resfriamento e aquecimento, estão apresentados no Apêndice B. Primeiramente é possível observar um comportamento análogo

quanto à variação dos vidros em relação ao consumo em todas as cidades. Também é possível identificar que os climas se dividem em grupos. As cidades de Belém, Boa Vista, Cuiabá, São Luís, Manaus, Recife e Salvador apresentam um consumo acima de 350 kWh/m².vidro e possuem GDR acima de 700 °C dia. Campo Grande e Rio de Janeiro apresentam um consumo entre 200 e 250kWh/m² de vidro e possuem GDR entre 300 e 500°C.dia. Brasília, Curitiba, Florianópolis, Porto Alegre, Santa Maria e São Paulo apresentam um consumo abaixo de 150 kWh/m² de vidro e possuem GDR abaixo de 200°C.dia. Logo, pode-se constatar que o consumo depende diretamente do clima em que a edificação está inserida, apesar de apresentar uma tendência de variação em função do total de graus-dia de resfriamento de cada clima, observando assim a possibilidade de integrar este indicador à análise geral.

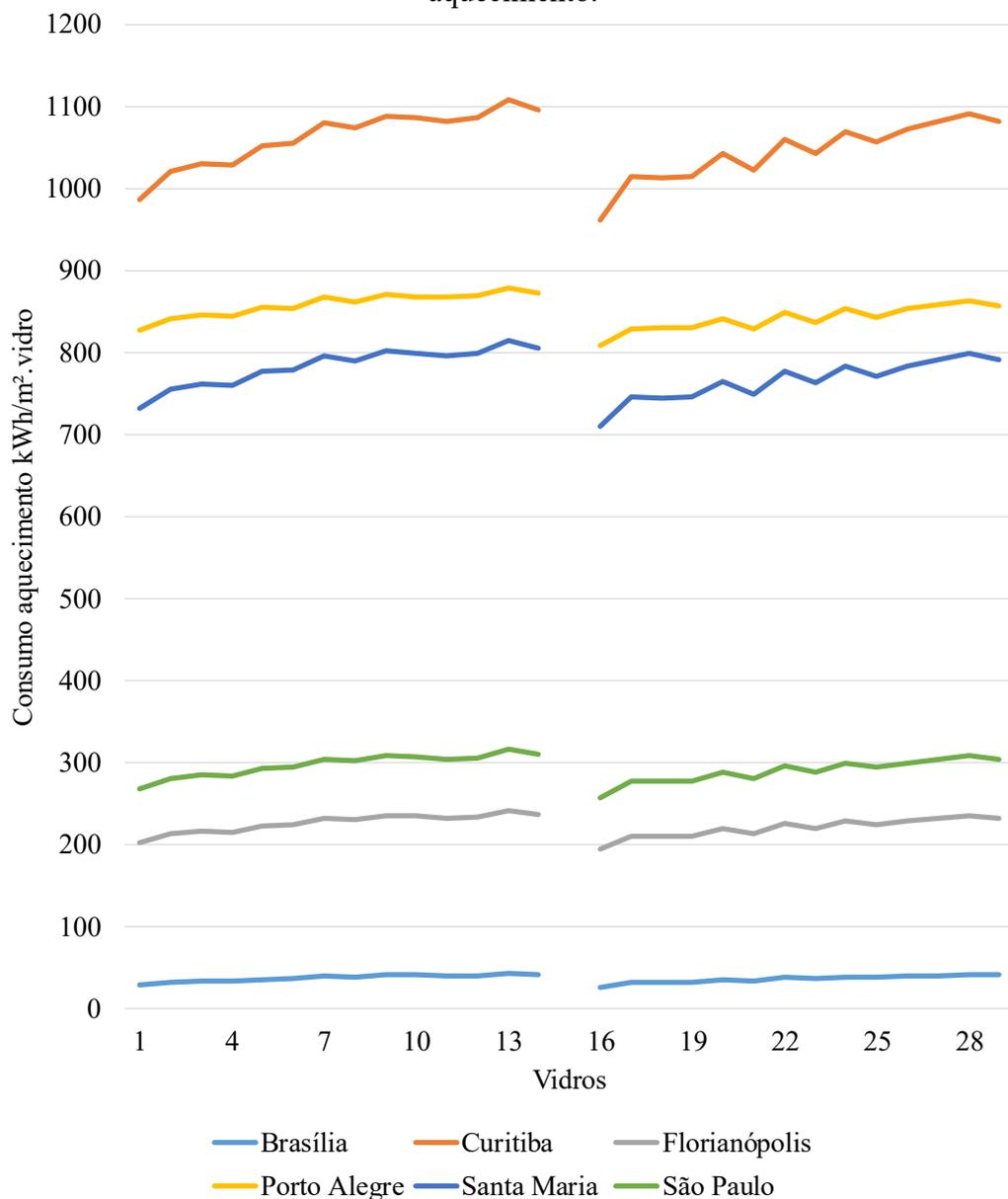
Figura 35 - Consumo anual para resfriamento em kWh/m² proporcionado por cada um dos 28 vidros para a TP2 em todas as cidades simuladas.



Fonte: A autora.

As cidades que apresentam GDR abaixo de $200^{\circ}\text{C}\cdot\text{dia}$ são as que registram GDA acima de zero. Na Figura 36 é possível observar o consumo de energia anual por aquecimento em kWh/m^2 de vidro proporcionado por cada um dos 28 vidros das cidades que registram GDA acima de zero: Brasília, Curitiba, Florianópolis, Porto Alegre, Santa Maria e São Paulo.

Figura 36- Consumo anual para aquecimento em kWh/m^2 proporcionado por cada um dos 28 vidros para a TP2 em todas as cidades simuladas que apresentaram consumo para aquecimento.

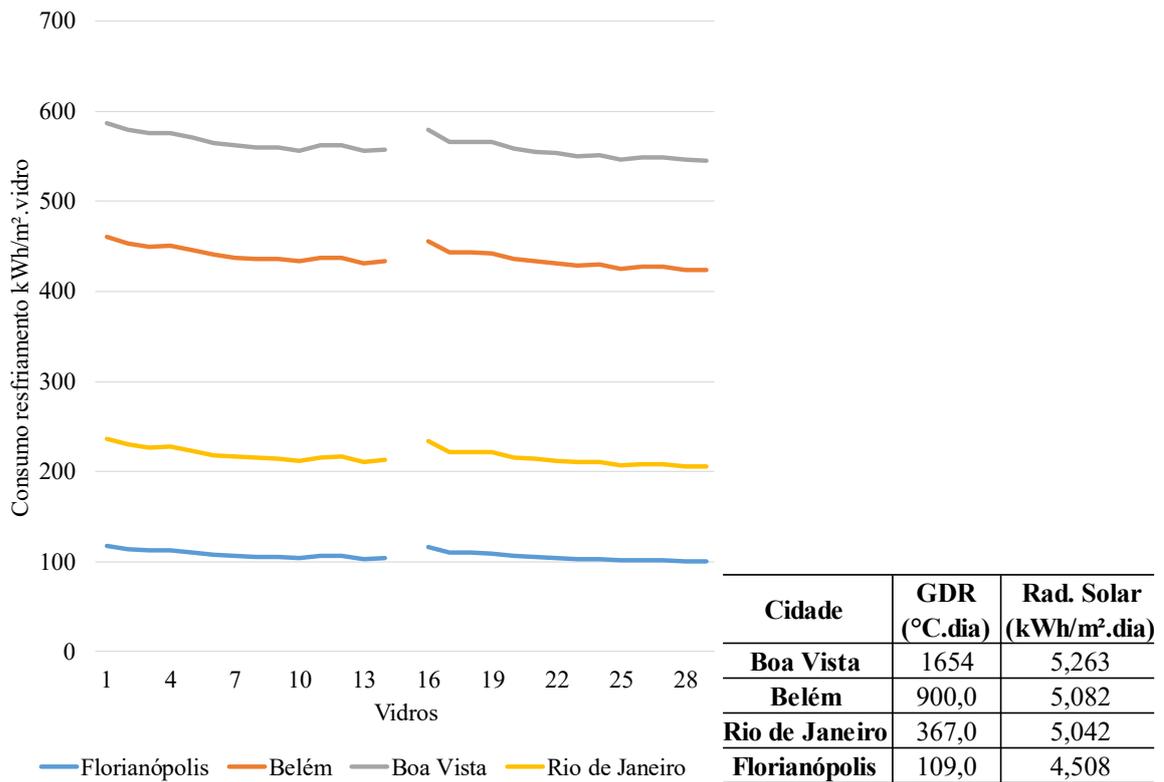


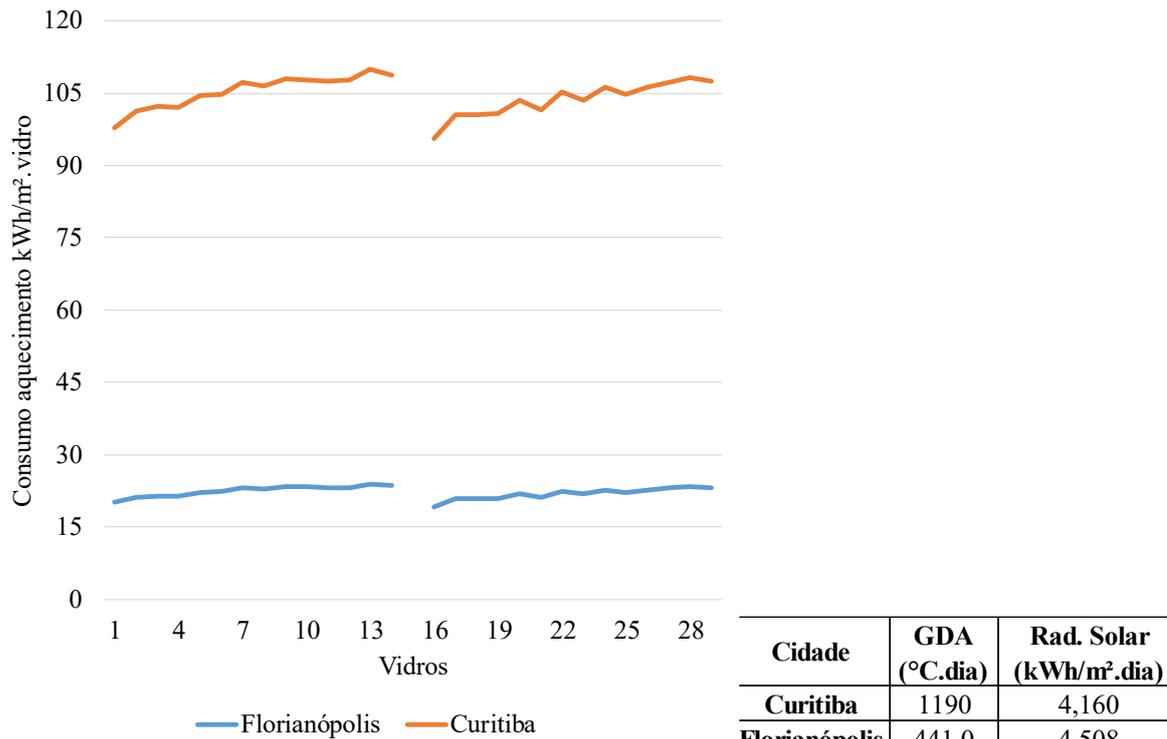
Fonte: A autora.

Na Figura 37 podemos comparar o consumo de energia (kWh) para resfriamento e aquecimento da TP2 (tipologia de 70m^2) com as variáveis climáticas (GDR, GDA e radiação solar) nas cidades de Florianópolis, Belém, Boa Vista e Rio de Janeiro. Podemos observar

claramente que o consumo se comporta de forma análoga às variáveis climáticas, apesar de apresentarem ordens de grandeza diferentes. Com isso, também foi constatada a possibilidade de analisar o GDR, o GDA e a radiação solar integrados com os demais parâmetros.

Figura 37 - Consumo de energia (kWh) para resfriamento e aquecimento da TP2 e GDR, GDA e radiação solar das cidades de Florianópolis, Boa Vista, Belém, Rio de Janeiro e Curitiba.

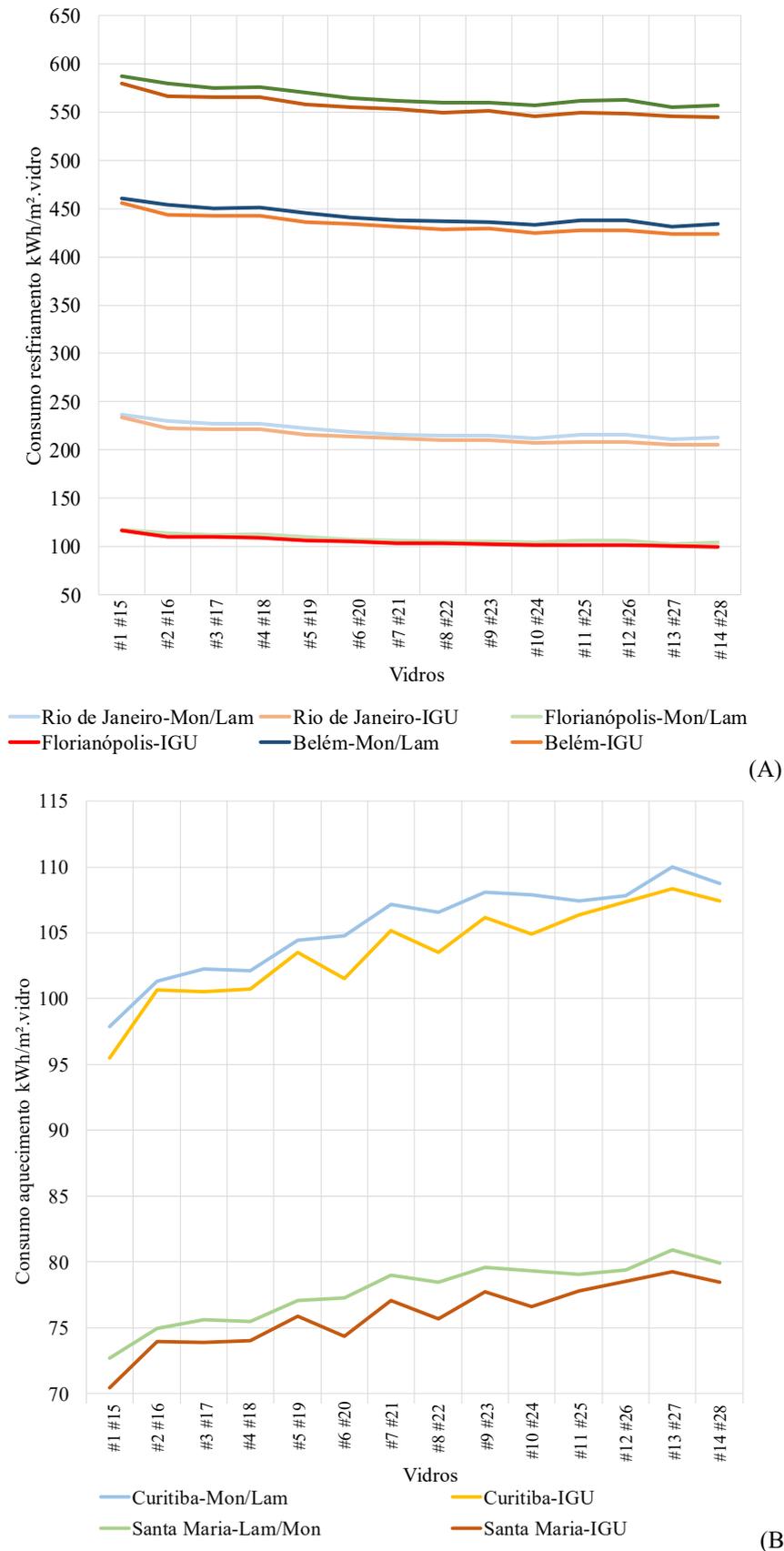




Fonte: A autora.

A Figura 38-A mostra o comportamento das cidades de Florianópolis, Belém, Boa Vista e Rio de Janeiro frente ao consumo de energia para resfriamento e a Figura 38-B ilustra o comportamento da cidade de Curitiba e Santa Maria frente ao consumo por aquecimento dos 28 vidros. Os vidros foram divididos em dois grupos: monolíticos (Mon) e laminados (Lam), que são os vidros numerados de #1 à #14 e vidros insulados ou IGU (*Insulated Glass Unit*), que são os vidros numerados de #15 à #28.

Figura 38 – Comportamento dos vidros monolíticos, laminados e insulados de Florianópolis, Belém, Boa Vista e Rio de Janeiro frente ao consumo de energia para resfriamento por m² de vidro e da cidade de Curitiba e Santa Maria para aquecimento.



Fonte: A autora.

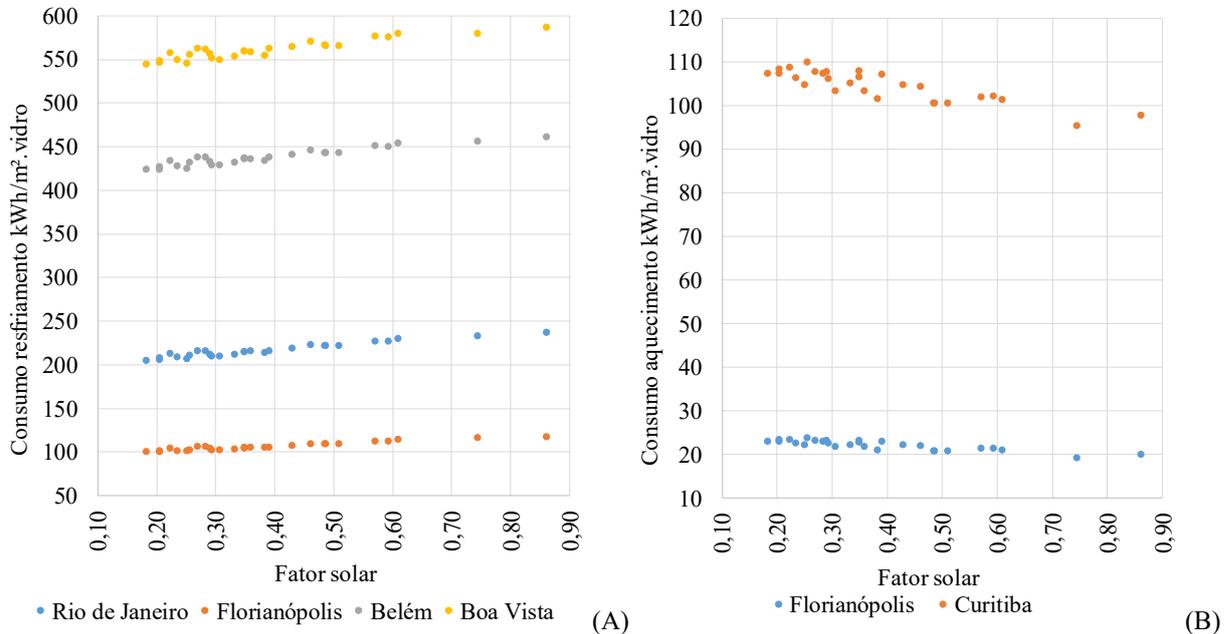
A transmitância térmica, é um parâmetro físico medido em laboratório que representa o quanto de calor atravessa um metro quadrado de componente construtivo, quando submetido a uma diferença de temperatura. Os vidros de número #15 a #28 (Tabela 18), apresentam a transmitância mais baixa que os demais pois são vidros insulados, os mais eficazes para reduzir a transferência de calor por condução através do vidro. Por este motivo, os vidros insulados apresentam menor consumo de energia tanto para resfriamento quanto para aquecimento. Esses vidros são compostos por duas chapas de vidro unidas hermeticamente em suas bordas, formando uma câmara de ar entre elas, criando um conjunto unitário chamado de "unidade insulada" ou em inglês *Insulated Glass Unit* (IGU).

Esse parâmetro tem maior influência no consumo de energia para aquecimento, principalmente nos vidros insulados. Quanto menor o calor que atravessa um metro quadrado do vidro, mais eficiente é o vidro, pois ele apresenta uma menor perda térmica. Essa perda térmica do interior aquecido para o exterior com temperaturas mais baixas é favorável para o aquecimento. Porém, a baixa transmitância térmica também é favorável para o resfriamento, pois evita o ganho térmico do exterior com temperaturas mais altas para o interior da edificação.

O fator solar é um índice apresentado pelos fabricantes dos vidros a partir de medições em laboratório, sob condições padrão. Segundo a NBR 16023 (ABNT, 2020) este índice corresponde a soma do calor da atmosfera por transmissão solar direta, mais a transmissão indireta dos corpos aquecidos pelo sol. Em outras palavras, o fator solar representa o total de calor da radiação solar que passa pelo vidro, ou seja, é a soma da radiação transmitida diretamente com a radiação absorvida pelo vidro e emitida para o ambiente interno.

Comparando os resultados de consumo anual por aquecimento e resfriamento com o FS dos vidros, é possível observar uma clara tendência de variação do consumo, conforme observa-se na Figura 39. Quanto mais baixo o FS, menor o consumo de energia para resfriamento e maior para aquecimento, pois a radiação solar incidente no vidro que o atravessa na forma de calor é favorável nos dias frios e desvantajoso nos dias quentes.

Figura 39 - Consumo de energia (kWh/m² de vidro) de resfriamento e aquecimento da TP2 comparado com o FS dos vidros nas cidades de Rio de Janeiro, Florianópolis, Belém e Boa Vista para resfriamento e Florianópolis e Curitiba para aquecimento.



Fonte: A autora.

4.2 DESENVOLVIMENTO DAS EQUAÇÕES

Após inúmeros testes, as equações foram obtidas com uso do programa Microsoft Excel, que calculou, através do método dos mínimos quadrados, os coeficientes da reta que melhor ajustam os dados estimados pela equação com os observados por simulação (Equação 6).

$$y = a.x_1 + b.x_2 + \dots + c.x_n + d \quad (6)$$

A variável dependente “y” corresponde ao consumo anual de energia elétrica da edificação para resfriamento e aquecimento em kWh/m² de vidro. As variáveis independentes “x1”, “x2”, ... , “xn” representam as variáveis independentes climáticas (Tabela 21), da tipologia (Tabela 22) e dos vidros (Tabela 23). As constantes “a”, “b”, “c” são os coeficientes de regressão linear correspondentes a cada parâmetro da edificação, ou seja, a cada variável independente. A constante “d” representa a intersecção da reta no eixo “y”.

As variáveis climáticas (GDR, GDA e radiação solar global horizontal) foram incorporadas na análise de regressão multivariada, de maneira que a equação pudesse ser aplicada em diferentes climas brasileiros.

Tabela 21 - Variáveis independentes climáticas GDR, GDA e radiação solar global horizontal (média anual).

Cid	Cidade	GDR (°C.dia) Tb24	GDA (°C.dia) Tb20	RadSol (Wh/m ² .dia)
1	Belém	900,3	-	5082
2	Boa Vista	1654	-	5263
3	Brasília	18,12	126,4	5638
4	Campo Grande	434,9	-	5275
5	Cuiabá	1156	-	5335
6	Curitiba	2,380	1190	4160
7	Florianópolis	108,5	440,8	4508
8	São Luís	1004	-	4310
9	Manaus	1027	-	4773
10	Recife	1154	-	5417
11	Rio de Janeiro	367,3	-	5042
12	Porto Alegre	153,5	683,3	3259
13	Salvador	744,7	-	5268
14	Santa Maria	143,8	884,8	4449
15	São Paulo	37,04	584,5	4591

Fonte: A autora.

Cada tipologia arquitetônica corresponde a um formato e tamanho de edificação, com uma divisão específica de suas áreas internas em zonas térmicas e determinadas parcelas de área condicionada. Foram simuladas somente edificações artificialmente climatizadas e com padrões de uso semelhantes a atividades residenciais, de forma que as equações sejam aplicáveis apenas a esses tipos de edificações. As variáveis de tipologia foram incorporadas na equação representadas pela área de vidro (Tabela 22). Desta maneira, é possível utilizar a mesma equação para diferentes tipos de edificações residenciais.

Tabela 22 - Área de piso e de vidro das três tipologias.

Tipologia	Área de Piso (m²)	Área de Vidro (m²)
TP1	50	7,32
TP2	70	10,08
TP3	120	18,20

Fonte: A autora.

Da mesma forma, foram incorporados na equação os parâmetros dos vidros (Tabela 23), tornando possível utilizar a mesma equação para prever o consumo de energia elétrica para condicionamento de ar por m² de vidro, para vidros fora da amostragem simulada, com valores dos parâmetros dentro dos limites testados nesta pesquisa.

Tabela 23 - Parâmetros dos vidros testados nesta pesquisa.

Vidro	FS	U W/(m².K)	IS
1	0,86	5,89	1,05
2	0,61	5,79	0,71
3	0,59	5,63	1,21
4	0,57	5,56	0,91
5	0,46	5,57	0,80
6	0,43	3,23	1,76
7	0,39	5,63	1,20
8	0,35	3,23	1,91
9	0,35	5,63	1,12
10	0,29	3,14	1,90
11	0,28	4,88	0,71
12	0,27	5,70	0,48
13	0,26	5,63	1,29
14	0,22	4,24	0,63
15	0,75	2,69	1,07
16	0,49	2,67	0,78
17	0,51	2,66	1,25
18	0,49	2,63	0,96
19	0,36	2,61	0,92
20	0,38	1,64	1,76
21	0,33	2,66	1,27
22	0,31	1,64	1,90
23	0,29	2,66	1,21
24	0,25	1,59	2,00
25	0,24	2,39	0,75
26	0,21	2,66	0,57
27	0,21	2,66	1,43
28	0,18	2,14	0,72

Fonte: A autora.

Finalmente, foram geradas duas equações: A Equação 7, para estimar o consumo de energia em resfriamento e a Equação 8, para estimar o consumo de energia em aquecimento. As equações estão apresentadas a seguir.

$$\text{ConsumoRES} = 0,8162.U + -3,0998.IS + 37,5079.FS + -7,7313.AV + 0,3174.GDR + 0,0326.RadSOL + -11,5562 \quad (7)$$

Onde:

ConsumoRES = consumo anual de energia elétrica para resfriamento, [kWh/m² de vidro];

U = Transmitância térmica do vidro analisado, [W/(m².K)];

IS = Índice de seletividade do vidro analisado;

FS = Fator solar do vidro analisado;

AV = Área de vidro da edificação analisada, [m²];

GDR = Graus-dia de resfriamento do clima analisado, [°C.dia];

RadSOL = Radiação solar global anual no plano horizontal do clima analisado, [Wh/m².dia].

As 15 cidades simuladas foram consideradas para as análises de resfriamento, porém para as análises de aquecimento foram adotadas apenas as cidades que apresentaram consumo significativo para aquecimento, quais sejam: Curitiba, Florianópolis, Santa Maria e São Paulo. As quatro cidades apresentam GDR abaixo de 200°C.dia, como pode ser verificado na Tabela 21.

$$\text{ConsumoAQ} = 0,7816.U + 1,4062.IS + -14,0971.FS + -1,0806.AV + 0,1064.GDA + -0,0148.RadSOL + 51,7557 \quad (8)$$

Onde:

ConsumoAQ = consumo anual de energia elétrica para aquecimento, [kWh/m² de vidro];

U = Transmitância térmica do vidro analisado, [W/(m².K)];

IS = Índice de seletividade do vidro analisado;

FS = Fator solar do vidro analisado;

AV = Área de vidro da edificação analisada, [m²];

GDA = Graus-dia de aquecimento do clima analisado, [$^{\circ}\text{C}\cdot\text{dia}$];

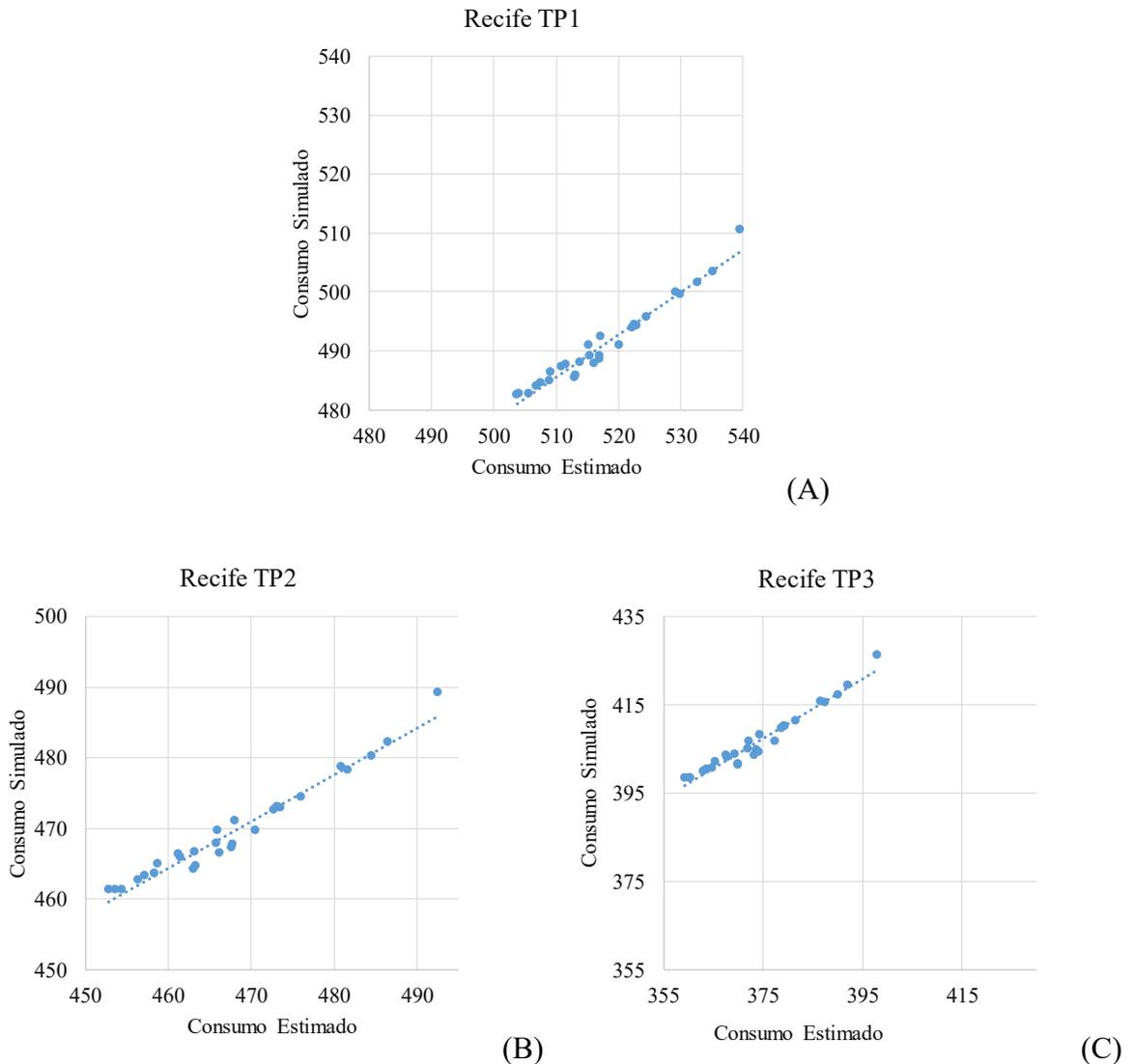
RadSOL = Radiação solar global anual no plano horizontal do clima analisado, [Wh/m^2].

Para relacionar os resultados encontrados pelas simulações aos resultados preditos pelas equações, foi calculado e avaliado o coeficiente de determinação R^2 . Se o resultado for 1, existe uma correlação perfeita entre os valores simulados e preditos — não há diferença entre o valor “y” estimado e o valor “y” obtido por simulação computacional. No outro extremo, se o coeficiente de determinação for 0, a equação de regressão não será útil na previsão de um valor “y”.

A Equação 7 apresentou um R^2 de 0,94 e a Equação 8 de 0,98. Ambos resultados são satisfatórios, visto que estão perto de 1, apresentando uma boa correlação entre o consumo de energia estimado e o simulado.

A seguir estão apresentados, em forma de gráfico, os resultados simulados e estimados para resfriamento das cidades de Recife e Rio de Janeiro (Figura 40 e Figura 41) e para aquecimento da cidade de Curitiba (Figura 42). Foram selecionadas estas cidades como representativas de cada “grupo” de consumo de energia elétrica para resfriamento. Recife apresenta um consumo acima de $350 \text{ kWh}/\text{m}^2$ de vidro, Rio de Janeiro um consumo entre 200 e $250 \text{ kWh}/\text{m}^2$ de vidro e Curitiba abaixo de $150 \text{ kWh}/\text{m}^2$ de vidro.

Figura 40 - Gráficos comparando o consumo anual de energia elétrica por m² de vidro para resfriamento encontrados por simulação e estimados pela equação 7, para as três tipologias, na cidade de Recife.

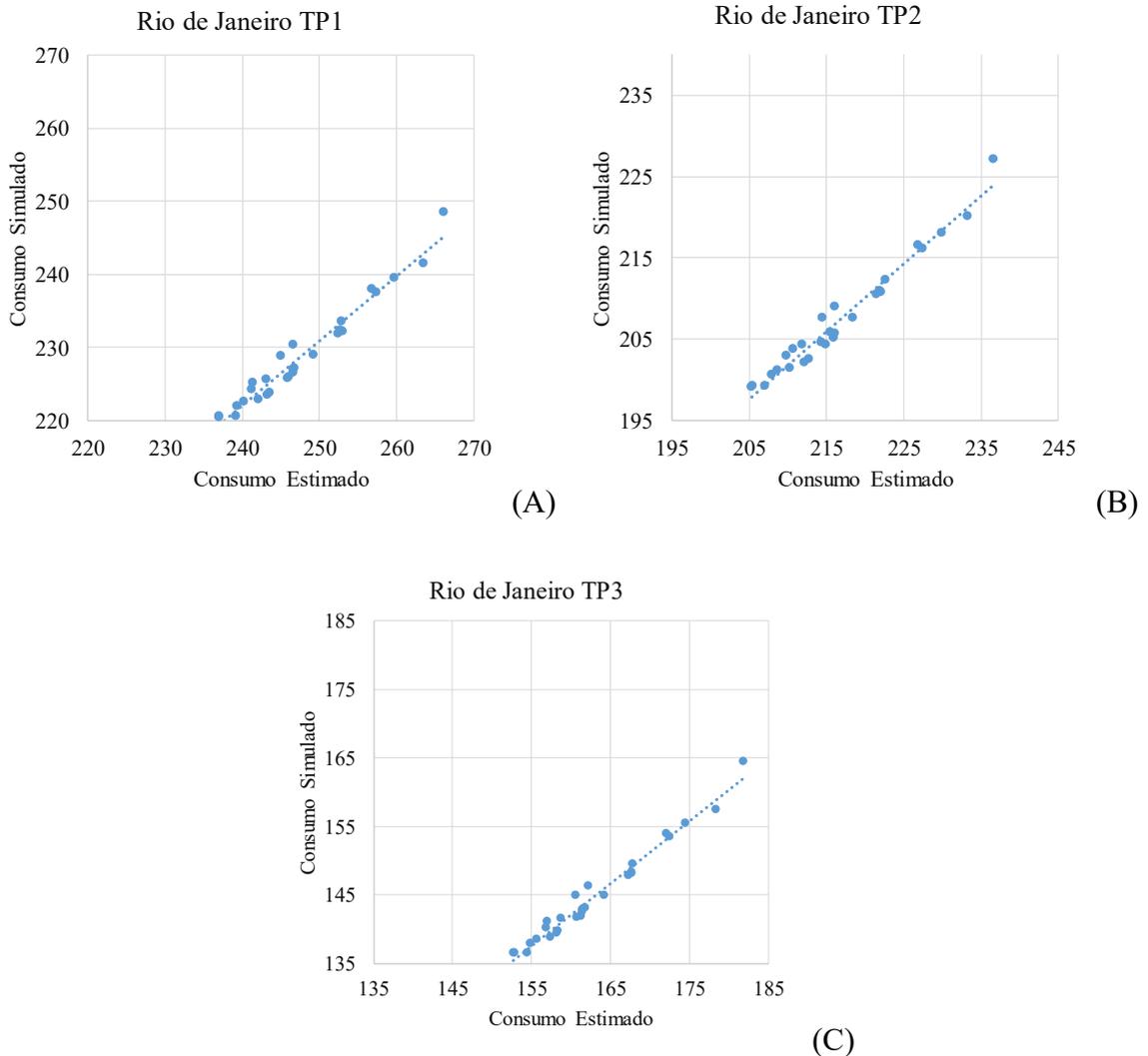


Fonte: A autora.

A Figura 40-A trata da comparação dos resultados para consumo anual de energia elétrica para resfriamento simulados e estimados para a TP1 (50m²), a Figura 40-B apresenta para a TP2 e a Figura 40-C para a TP3, na cidade de Recife. Todos os gráficos evidenciam uma tendência satisfatória, sendo que o R² está próximo de 1 (0,96) nas três tipologias.

Da mesma forma, o consumo anual de energia elétrica para resfriamento da cidade do Rio de Janeiro encontrado por simulação paramétrica foi comparado com o consumo estimado pela equação 7 (Figura 41). Todos os gráficos evidenciam uma tendência satisfatória, sendo que o R² é próximo de 1 nas três tipologias. A TP1 apresenta R² de 0,96 e a TP2 e TP3 apresentam R² de 0,97.

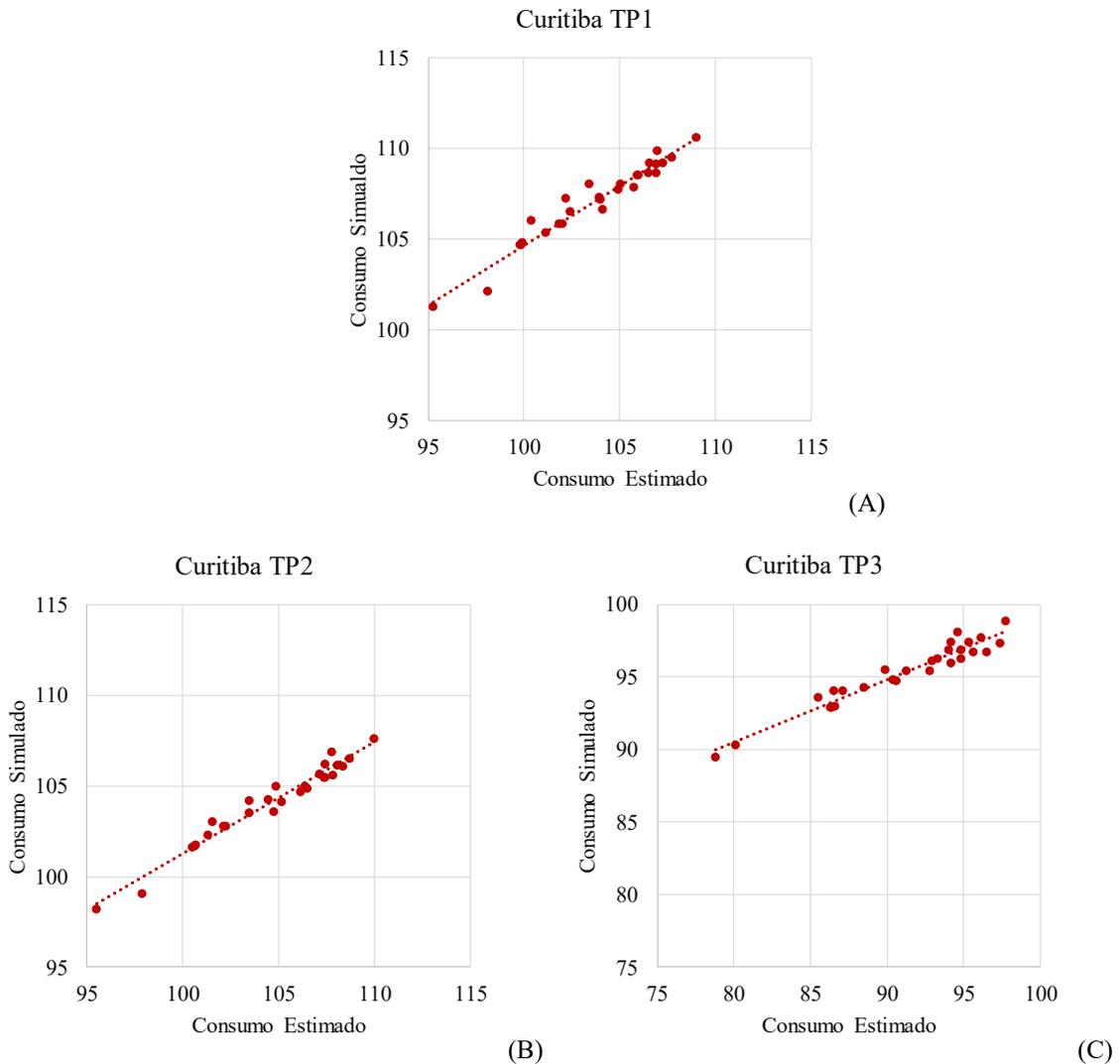
Figura 41- Gráficos comparando o consumo anual de energia elétrica por m² de vidro para resfriamento encontrados por simulação e estimados pela equação 7, para as três tipologias, na cidade do Rio de Janeiro.



Fonte: A autora.

Por fim, a Figura 42-A trata da comparação dos resultados para consumo anual de energia elétrica para aquecimento simulado e estimado para a TP1 (50m²), a Figura 42-B para a TP2 e a Figura 42-C para a TP3, na cidade de Curitiba. Todos os gráficos evidenciam uma tendência satisfatória, sendo que o R² é próximo de 1 nas três tipologias. A TP1 e TP3 apresentam R² de 0,94 e a TP2 apresenta R² de 0,96.

Figura 42- Gráficos comparando o consumo anual de energia elétrica por m² de vidro para aquecimento encontrados por simulação e estimados pela equação 8, para as três tipologias, na cidade de Curitiba.



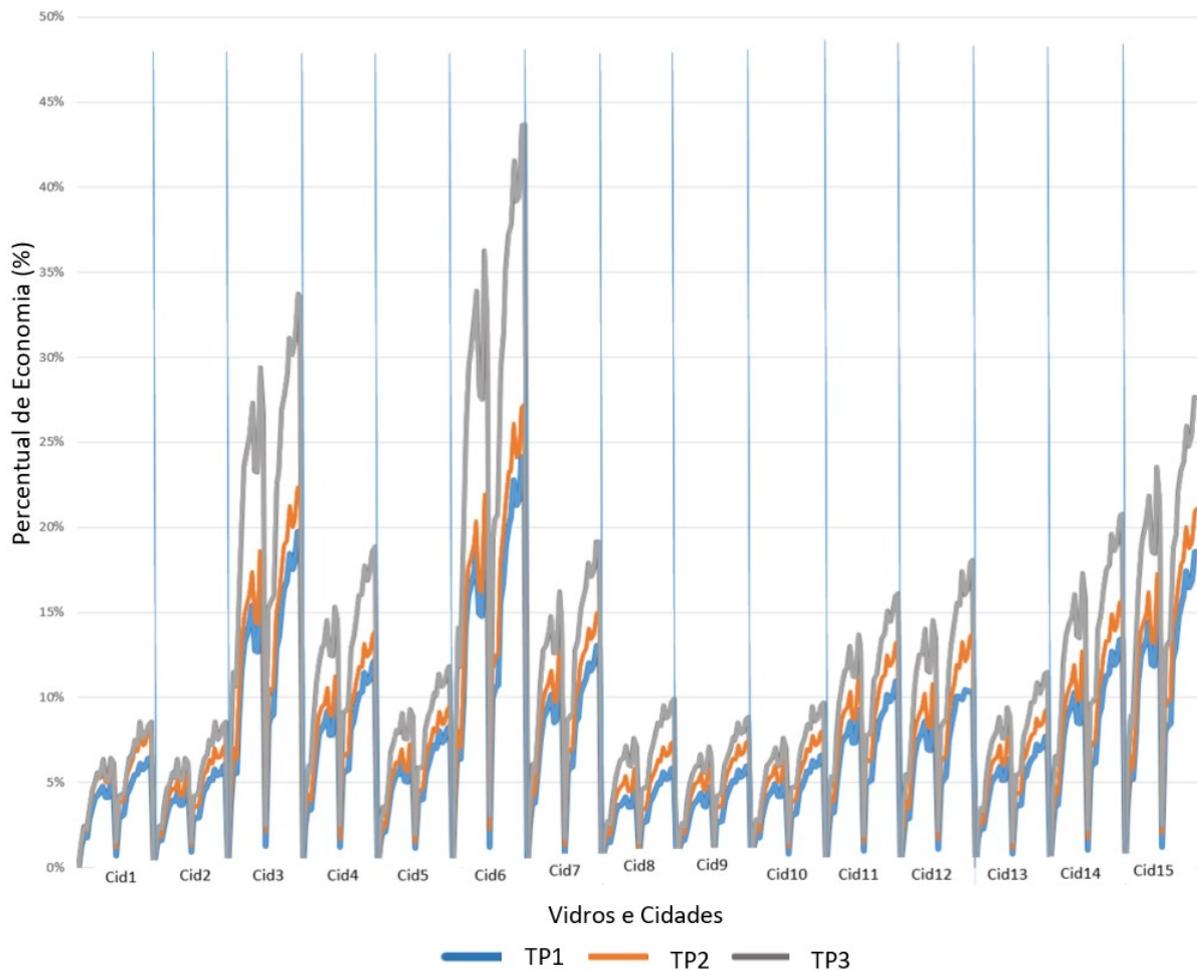
Fonte: A autora.

Com as equações e os coeficientes encontrados por esta pesquisa, é possível que seja previsto o consumo de energia para resfriamento e aquecimento de uma residência típica brasileira. Para isto, é preciso conhecer os dados de área de vidro, o GDR (ou GDA) e a Radiação Solar da cidade onde ela será inserida, além das propriedades dos vidros a serem testados (Coeficiente U, FS e IS).

4.3 CLASSIFICAÇÃO DOS VIDROS

Inicialmente foi realizada uma classificação da economia de energia proporcionada por cada vidro considerando o consumo anual para aquecimento e resfriamento (Equação 4). Esta classificação visa informar quanto (em %) o vidro analisado é melhor que o vidro de referência em termos de economia de energia resultante para cada tipologia e clima. O percentual de economia de energia para resfriamento e o comportamento dos 28 vidros, das 15 cidades (Belém [Cid1], Boa Vista [Cid2], Brasília [Cid3], Campo Grande [Cid4], Cuiabá [Cid5], Curitiba [Cid6], Florianópolis [Cid7], São Luís [Cid8], Manaus [Cid9], Recife [Cid10], Rio de Janeiro [Cid11], Porto Alegre [Cid12], Salvador [Cid13], Santa Maria [Cid14] e São Paulo [Cid15]) nas 3 tipologias estão representados em forma de gráfico na Figura 43.

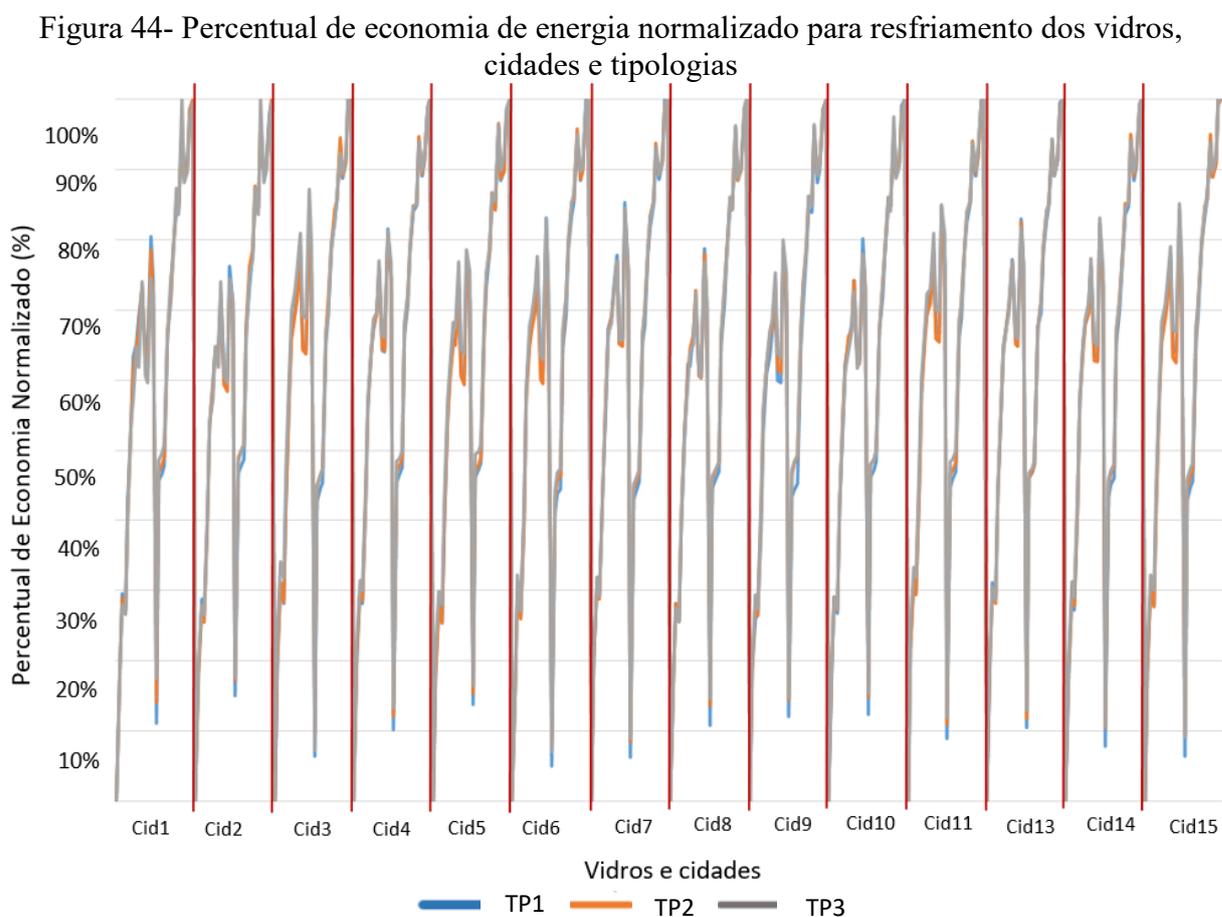
Figura 43 - Percentual de economia de energia para resfriamento dos 28 vidros, 15 cidades e 3 tipologias.



Fonte: A autora.

As linhas verticais dividem os dados por cidades. A linha azul representa o comportamento dos vidros na TP1, a laranja na TP2 e a cinza na TP3. Como observado anteriormente para o consumo de energia, existe a mesma tendência de variação de economia por vidro e tipologia em todas as cidades, apesar de resultarem em ordens de grandeza diferentes. Na TP3, por exemplo, os vidros oferecem um percentual de economia de energia maior que na TP1 e TP2 em todas as cidades, apesar de apresentar ordens de grandeza diferentes. Na cidade 1, os vidros apresentam percentuais de economia de energia muito parecidos na TP2 e na TP3. Nas cidades 3 e 6, os vidros apresentam uma economia de energia nitidamente maior do que nas demais cidades.

Desta forma, não seria possível fazer uma classificação única para os vidros, sendo que cada tipologia e cidade apresenta uma variação de consumo diferente. Por isso, os resultados foram normalizados e para isto utilizou-se a Equação 5. Os resultados normalizados estão representados em forma de gráfico na Figura 44. As linhas vermelhas verticais marcam as cidades.

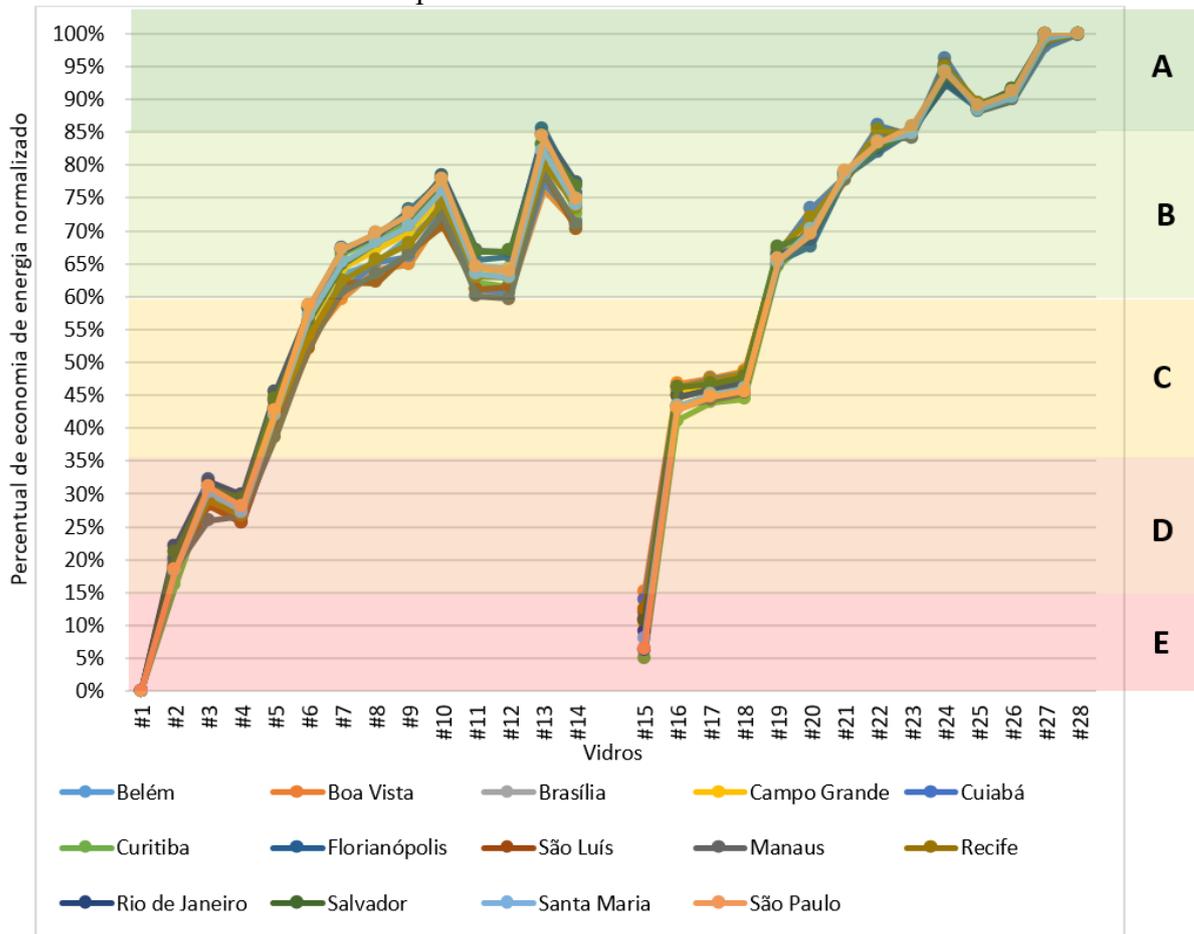


Fonte: A autora.

Conforme o gráfico da Figura 44, é possível verificar que o percentual de economia de energia elétrica para resfriamento normalizado tem praticamente o mesmo comportamento nas três tipologias e em todos os climas. Por isso concluiu-se que é possível desenvolver e adotar um mesmo método de classificação para todos os climas e tipologias.

Na Figura 45 é possível observar os resultados de percentual de economia de energia para resfriamento normalizados e agrupados para cada cidade. A partir desses resultados, dividiu-se o percentual de economia de energia para resfriamento em cinco faixas de desempenho: abaixo de 15%, de 16% a 35%, de 36% a 60%, de 61% a 85% e acima de 86%. Desta forma, estabeleceu-se uma classificação de desempenho dividida em cinco faixas: de A (mais eficiente) até E (menos eficiente).

Figura 45 - Percentual de economia de energia para resfriamento normalizado dos vidros e seu comportamento nas cidades analisadas.



Fonte: A autora.

Na Tabela 24 é possível observar os resultados, em percentual de economia de energia para resfriamento normalizados, de cada um dos vidros para cada cidade. A classificação final dos vidros é apresentada na última coluna da tabela.

Tabela 24 - Percentual de economia de energia para resfriamento normalizados e classificação de cada um dos vidros, nas cidades analisadas.

VID	Cid1 (%)	Cid2 (%)	Cid3 (%)	Cid4 (%)	Cid5 (%)	Cid6 (%)	Cid7 (%)	Cid8 (%)	Cid9 (%)	Cid10 (%)	Cid11 (%)	Cid13 (%)	Cid14 (%)	Cid15 (%)	CLASS
#1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	E
#2	19,24	18,02	19,34	21,01	17,48	15,59	20,38	17,76	18,42	19,88	21,59	20,78	19,09	18,32	D
#3	28,91	27,73	31,14	30,59	27,50	29,70	31,31	28,18	29,04	29,15	31,34	30,30	30,16	30,72	D
#4	27,03	25,56	28,38	28,60	25,42	26,05	28,74	25,86	26,52	27,18	29,45	28,19	27,85	27,74	D
#5	40,93	39,43	42,96	43,43	39,30	39,42	43,84	40,22	40,92	41,52	44,53	43,47	41,90	42,03	C
#6	54,21	53,86	58,35	56,83	54,60	57,07	57,85	53,27	55,20	55,33	58,14	56,43	57,13	57,95	C
#7	61,55	58,79	65,97	63,85	59,86	64,78	66,31	60,92	61,95	61,58	65,50	64,47	64,18	65,48	B
#8	64,99	64,12	69,24	67,85	65,15	67,22	69,16	64,48	66,21	66,21	69,35	68,06	67,92	68,63	B
#9	67,02	63,81	71,42	69,29	65,01	69,85	72,02	66,43	67,38	66,95	70,91	70,16	69,57	70,80	B
#10	73,50	71,53	77,40	76,17	73,57	74,85	76,99	72,72	73,99	74,21	77,92	76,88	76,18	76,73	B
#11	62,38	59,29	64,29	64,57	60,64	60,18	65,17	60,61	61,74	62,73	65,93	65,12	62,80	63,18	B
#12	61,73	58,41	63,75	64,19	59,38	59,45	64,84	60,25	61,02	62,28	65,47	64,78	62,58	62,53	B
#13	78,58	74,19	82,80	80,85	76,41	80,68	83,78	78,04	78,52	77,99	82,75	82,43	81,08	81,97	B
#14	72,09	69,78	74,42	74,83	70,98	69,75	75,49	71,10	72,28	73,31	76,36	75,88	73,19	73,18	B
#15	14,09	17,26	9,34	12,11	15,33	8,09	8,48	13,62	14,43	14,95	10,95	11,71	10,51	9,36	E
#16	46,81	48,95	44,75	46,96	46,89	42,93	44,41	45,86	46,45	47,88	46,43	45,99	45,09	44,41	C
#17	47,92	49,74	46,47	47,63	47,97	45,68	45,77	47,16	48,14	48,65	47,14	47,01	46,62	46,40	C
#18	48,99	50,91	47,34	48,82	49,01	46,28	46,76	48,17	49,03	49,73	48,26	48,09	47,57	47,17	C
#19	66,97	67,82	66,50	67,44	66,78	65,39	66,32	66,58	66,74	67,31	67,31	67,27	66,60	66,21	B
#20	72,58	76,23	71,06	72,01	75,37	72,05	69,80	72,78	73,78	73,71	71,24	71,33	71,85	71,53	B
#21	78,24	78,67	79,29	78,78	78,26	79,25	78,86	78,09	79,05	78,73	79,02	78,92	78,88	79,29	B
#22	85,68	87,69	84,41	84,87	86,75	85,55	83,52	85,88	86,16	85,90	84,14	83,98	85,15	84,91	B
#23	84,38	84,56	85,65	84,98	84,21	85,61	85,51	84,34	85,16	84,90	85,39	85,17	85,19	85,65	B
#24	95,64	97,34	94,54	94,75	96,57	95,80	93,70	95,93	96,20	95,76	94,15	94,30	95,08	94,99	A
#25	88,79	89,00	89,14	89,33	88,80	88,60	89,22	88,50	89,22	89,06	89,47	89,26	89,12	88,95	A
#26	90,32	89,92	90,92	91,20	89,68	89,77	91,34	89,90	90,60	91,06	91,56	91,32	90,74	90,57	A
#27	98,35	96,93	99,52	98,63	97,51	99,24	99,56	98,28	98,48	98,06	99,35	99,09	99,25	99,31	A
#28	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	A

Fonte: A autora.

No caso de aquecimento, as cidades selecionadas para gerar a classificação foram Curitiba, Florianópolis, Santa Maria e São Paulo. O método utilizado foi o mesmo da classificação do consumo para resfriamento pois a tendência apresentada foi similar. A Tabela 25 demonstra os resultados para as quatro cidades, em percentual de economia de energia para aquecimento normalizado, e a classificação dos vidros.

Tabela 25 - Percentual de economia de energia para aquecimento normalizados e classificação de cada um dos vidros, nas cidades analisadas.

VID	Cid6 (%)	Cid7 (%)	Cid14 (%)	Cid15 (%)	CLASS
#1	83,66	82,01	78,34	81,18	A
#2	59,80	60,24	57,01	60,69	B
#3	53,51	53,35	50,44	53,13	B
#4	54,43	54,43	51,53	54,56	B
#5	38,24	38,66	36,48	39,35	C
#6	36,30	34,58	34,88	35,78	C
#7	19,53	19,30	18,08	19,13	D
#8	23,91	22,26	23,43	23,69	D
#9	13,40	13,23	12,40	13,10	D
#10	14,82	13,04	15,04	14,71	D
#11	17,69	17,88	17,44	19,12	D
#12	15,08	15,87	14,71	16,84	D
#13	-	-	-	-	E
#14	8,69	8,39	9,33	10,09	E
#15	100,00	100,00	100,00	100,00	A
#16	64,61	65,74	66,32	66,65	B
#17	65,37	66,16	66,77	66,62	B
#18	64,21	65,14	65,82	65,78	B
#19	45,03	46,18	47,72	47,02	C
#20	58,35	59,78	62,64	60,55	B
#21	33,45	34,14	36,40	34,52	C
#22	44,84	46,27	49,92	47,05	C
#23	26,67	27,37	30,03	27,68	D
#24	35,27	36,76	41,16	37,50	C
#25	25,04	26,02	29,34	26,96	D
#26	18,20	19,11	22,36	20,20	D
#27	11,36	12,03	15,74	12,37	D
#28	17,82	18,92	23,28	19,73	D

Fonte: A autora.

A classificação para aquecimento também foi dividida em faixas, da seguinte forma: os vidros que apresentaram economia de energia para aquecimento de até 10% foram considerados classe E, de 11% a 30% classe D, de 31% a 50% classe C, de 51% a 75% classe B e a partir de 76% classe A. As faixas de classificação foram definidas de forma que o mesmo vidro ficasse dentro da mesma faixa em cada cidade, motivo pelo qual as faixas para resfriamento diferem das faixas para aquecimento.

Na Tabela 26 estão apresentados os vidros, suas propriedades e classificação. A principal evidência é que os vidros mais eficientes para consumo de energia para resfriamento são os menos eficientes para consumo por aquecimento.

Tabela 26 - Tabela dos vidros, propriedades e classificação energética para resfriamento e aquecimento.

Vidro	Composição	FS	U W/(m ² .K)	T _{vis}	IS	Classificação Resfriamento	Classificação Aquecimento
#1	monolítico 3mm	0,86	5,89	0,90	1,05	E	A
#2	monolítico 6mm	0,61	5,79	0,43	0,71	D	B
#3	laminado com incolor 8mm	0,59	5,63	0,72	1,21	D	B
#4	monolítico 6mm	0,57	5,56	0,52	0,91	D	B
#5	monolítico 6mm	0,46	5,57	0,37	0,80	C	C
#6	monolítico 6mm	0,43	3,23	0,76	1,76	C	C
#7	laminado com incolor 8mm	0,39	5,63	0,47	1,20	B	D
#8	monolítico 6mm	0,35	3,23	0,67	1,91	B	D
#9	laminado com incolor 8mm	0,35	5,63	0,39	1,12	B	D
#10	monolítico 6mm	0,29	3,14	0,55	1,90	B	D
#11	monolítico 6mm	0,28	4,88	0,20	0,71	B	D
#12	laminado com incolor 8mm	0,27	5,7	0,13	0,48	B	D
#13	laminado com verde 8mm	0,26	5,63	0,33	1,29	B	E
#14	monolítico 6mm	0,22	4,24	0,14	0,63	B	E
#15	#1 + Ar 12,7mm + Incolor 6mm	0,75	2,69	0,80	1,07	E	A
#16	#2 + Ar 12,7mm + Incolor 6mm	0,49	2,67	0,38	0,78	C	B
#17	#3 + Ar 12,7mm + Incolor 6mm	0,51	2,66	0,64	1,25	C	B
#18	#4 + Ar 12,7mm + Incolor 6mm	0,49	2,63	0,47	0,96	C	B
#19	#5 + Ar 12,7mm + Incolor 6mm	0,36	2,61	0,33	0,92	B	C
#20	#6 + Ar 12,7mm + Incolor 6mm	0,38	1,64	0,67	1,76	B	B
#21	#7 + Ar 12,7mm + Incolor 6mm	0,33	2,66	0,42	1,27	B	C
#22	#8 + Ar 12,7mm + Incolor 6mm	0,31	1,64	0,59	1,90	B	C
#23	#9 + Ar 12,7mm + Incolor 6mm	0,29	2,66	0,35	1,21	B	D
#24	#10 + Ar 12,7mm + Incolor 6mm	0,25	1,59	0,50	2,00	A	C
#25	#11 + Ar 12,7mm + Incolor 6mm	0,24	2,39	0,18	0,75	A	D
#26	#12 + Ar 12,7mm + Incolor 6mm	0,21	2,66	0,12	0,57	A	D
#27	#13 + Ar 12,7mm + Incolor 6mm	0,21	2,66	0,30	1,43	A	D
#28	#14 + Ar 12,7mm + Incolor 6mm	0,18	2,14	0,13	0,72	A	D

Fonte: A autora.

O fator solar foi o parâmetro que apresentou maior influência na classificação dos vidros. Por exemplo, no caso do vidro #2 que apresenta fator solar de 0,61, significa que 61% da radiação solar incidente no vidro o atravessa na forma de calor. O #14, que é um vidro de controle solar de mesma espessura, tem FS de 0,22 (22%). Isto significa que há uma redução de aproximadamente um terço no ganho de calor entre o vidro #2 e o vidro #14.

Este ganho de calor é desfavorável para resfriamento e vantajoso para aquecimento. Sendo assim, o vidro #2 está dentro da faixa de classificação D para resfriamento e B para aquecimento e o vidro #14 mantém-se dentro da faixa de classificação B para resfriamento e E para aquecimento.

A influência da T_{vis} não é tão clara quanto do FS, porém é possível observar que quanto mais alta, maior economia para aquecimento apresenta o vidro. Para resfriamento ocorre o oposto. Normalmente os vidros que apresentam menor FS, apresentam maior T_{vis} , portanto o comportamento quanto à classificação segue uma tendência semelhante.

O IS, que é a relação entre o FS e a T_{vis} , não apresenta uma clara tendência quanto à classificação para consumo de energia com resfriamento e aquecimento. Porém podemos observar que o vidro #20, por exemplo, apresenta boa classificação tanto para aquecimento, quanto para resfriamento e ainda apresenta um bom IS, este vidro se trata de um vidro de controle solar insulado, com baixo coeficiente U (transmitância térmica). Isso significa que este vidro proporciona um bom ganho de iluminação natural sem que o resfriamento da edificação seja prejudicado.

O coeficiente U é a quantidade de calor que passa por uma unidade de tempo, em regime estacionário, através de uma superfície de vidro, para cada grau de diferença de temperatura entre o interior e o exterior. O coeficiente U baixo normalmente é favorável para o resfriamento da edificação pois o vidro conduzirá menos calor do exterior para o interior, bem como é vantajoso para o aquecimento, pois o ambiente interno perderá menos calor para o ambiente externo.

A classificação de vidros dividiu-se claramente em dois grupos: um grupo representou os vidros monolíticos e laminados e o outro os vidros insulados. Os vidros de #15 à #28 são insulados, eles apresentam baixa transmitância térmica e por isso apresentaram-se, gradualmente, com uma melhor classificação tanto para resfriamento quanto para aquecimento em comparação com o primeiro grupo de vidros (de #1 à #14).

Dessa forma, é possível concluir que o estudo realizado atingiu seus objetivos, contribuindo assim com a comunidade acadêmica, científica e industrial. A pesquisa demonstrou que esquadrias são cabíveis de classificação e que o estudo da eficiência energética de esquadrias pode contribuir significativamente para o desempenho térmico das edificações.

5 CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho é propor um método para classificação do desempenho de vidros presentes no mercado do país, considerando o consumo de energia resultante para resfriamento e aquecimento de edificações residenciais típicas para todos os climas brasileiros.

Para tanto, foi necessário primeiramente definir uma relação de cidades características dos climas brasileiros e estabelecer um modelo de simulação representativo das residências do país. Em seguida, foi definida e caracterizada uma amostra de vidros a serem avaliados por simulação computacional nos modelos de residência. Logo depois foram selecionados e avaliados padrões de referência de desempenho energético em função do tipo de vidro, clima e tipologia arquitetônica, desenvolvendo-se equações de regressão que permitissem a classificação dos vidros com base nas suas características físicas.

Os resultados foram tratados e apresentados em três partes, são elas:

- a) Tratamento e análise dos resultados das simulações computacionais para ponderar sobre as variáveis que poderiam ser integradas às equações e as que deveriam ser separadas;
- b) Desenvolvimento das equações de regressão para estimar o consumo em kWh.m² de vidro para resfriamento e aquecimento;
- c) Elaboração da classificação energética dos vidros.

Por meio das simulações de desempenho energético dos modelos desenvolvidos, obteve-se o consumo energético com condicionamento de ar, separadamente para resfriamento e aquecimento. Estes resultados foram tratados em planilhas e gráficos do programa Microsoft Excel. Por meio deste tratamento e análise dos resultados das simulações computacionais, foi possível investigar as tendências e as principais variáveis que influenciam o consumo de energia para resfriamento e aquecimento e além disso, ponderar o que poderia ser analisado de forma integrada.

Ao analisar os resultados foi possível observar um comportamento análogo de variação de consumo por tipo de vidro entre as cidades e as tipologias de edificação. Logo observou-se a possibilidade de avaliar o desempenho dos vidros por clima e tipologia de forma integrada.

Em contrapartida, constatou-se que a variação de consumo de energia por aquecimento se comportou de forma diferente do consumo de energia por resfriamento, necessitando de uma avaliação dos usos finais de forma separada.

Ademais, confirmou-se que o consumo de energia em climatização depende fortemente do clima em que a edificação está inserida. Por esse motivo, foi possível integrar as variáveis climáticas em uma única equação de regressão, representativa do consumo de energia proporcionado por cada tipo de vidro instalado na edificação.

Foi observado que os climas se dividem em três grupos. As cidades de Belém, Boa Vista, Cuiabá, São Luís, Manaus, Recife e Salvador apresentaram maior nível de consumo (acima de 350 kWh/m² de vidro) e possuem graus-dia de resfriamento (GDR) acima de 700°C.dia. As cidades de Campo Grande e Rio de Janeiro foram agrupadas em um nível intermediário, com consumo entre 200 e 250kWh/m² de vidro e apresentam GDR entre 300 e 500°C.dia. Por fim, as cidades de Brasília, Curitiba, Florianópolis, Porto Alegre, Santa Maria e São Paulo apresentaram menor nível de consumo (abaixo de 150 kWh/m² de vidro) e dispõem GDR abaixo de 200°C.dia.

Comparando os resultados de consumo anual por aquecimento e resfriamento com as propriedades dos vidros, foi possível observar que quanto maior o fator solar, mais alto é o consumo de energia para resfriamento e mais baixo para aquecimento.

Por meio de análises de regressão multivariada foram geradas equações para predição do consumo de energia em climatização em função do tipo de vidro, da tipologia, da edificação e do clima.

A equação oferece o resultado do consumo por kWh/m² de vidro instalado na edificação em função das seguintes variáveis dependentes:

- a) Variáveis climáticas: graus-dia de resfriamento, graus-dia de aquecimento e radiação solar global anual no plano horizontal;
- b) Variáveis da tipologia: área de vidro;
- c) Variáveis dos vidros: FS, coeficiente U e IS.

As equações apresentaram bons níveis de R²: 0,94 para a equação da estimativa do consumo para resfriamento e 0,98 para a equação da estimativa do consumo para aquecimento.

Desta forma, foi possível desenvolver uma classificação energética dos vidros para resfriamento e outra para aquecimento, por meio dos seguintes passos:

- a) Classificação de economia de energia em relação a um vidro de referência;
- b) Normalização dos resultados, para serem tratados com a mesma unidade de grandeza;
- c) Classificação dos vidros em 5 faixas de eficiência energética, de A (mais eficiente) até E (menos eficiente).

A maior evidência é que os vidros que apresentaram maior economia de energia para resfriamento foram os que apresentaram menor economia de energia para aquecimento. Isso acontece porque alguns parâmetros que favorecem o resfriamento, desfavorecem o aquecimento e vice-versa. O fator solar, por exemplo, que foi o parâmetro que apresentou maior influência em relação à classificação, representa a radiação solar incidente no vidro que o atravessa na forma de calor, sendo desfavorável para resfriamento e vantajoso para aquecimento.

A transmitância térmica, por outro lado, geralmente é vantajosa tanto para resfriamento quanto para aquecimento. Os vidros classificados dividiram-se claramente em dois grupos: um grupo de vidros monolíticos e laminados e outro de vidros insulados. Isso aconteceu, pois, os vidros insulados dispõem de transmitância térmica mais baixa. Logo, estes apresentaram melhores classificações de energia, proporcionalmente aos demais parâmetros.

Os resultados da pesquisa foram satisfatórios. O objetivo geral, que era propor um método para classificação do desempenho de vidros considerando o consumo de energia resultante para resfriamento e aquecimento de edificações residenciais para os climas brasileiros, foi atingido. Os resultados do consumo estimado para o consumo simulado obtiveram elevado valor de R^2 e, ainda, foi possível propor uma classificação dos vidros, colaborando para as futuras pesquisas de revisão da norma ABNT NBR 10821.

5.1 LIMITAÇÕES DO MÉTODO

Este método só pode ser aplicado para edificações residenciais. As características, o padrão de uso e as cargas internas são exclusivas para este tipo de edificação, não sendo possível aplicá-lo em edificações comerciais ou industriais.

O método foi desenvolvido com base em três tipologias padrão brasileiras (50m², 70m² e 120m²) em 15 climas e para 28 vidros. Estas amostras foram escolhidas de forma a abranger o máximo possível de casos. Entretanto, caso o método seja aplicado em edificações com características muito diferentes das testadas no método, pode haver variações para mais ou para menos. Contudo, o método foi desenvolvido de acordo com os procedimentos de teste da maioria das normas, os quais são realizados em ambientes controlados e estes são informados para conhecimento do usuário.

Este método não inclui a ventilação natural, que pode influenciar de forma positiva ou negativa no consumo de energia das edificações. É de suma importância que a ventilação seja analisada de forma precisa, e para isso é necessário estimar a forma como os usuários das

edificações residenciais utilizam as esquadrias. Entretanto, tal forma de utilização é bastante variada, o que torna complexa sua estimativa e padronização.

Além disso, os vidros foram analisados sem perfil. Os perfis podem influenciar no consumo de energia para resfriamento e aquecimento das edificações. Ademais, não foram considerados elementos de sombreamento além do beiral do telhado, característica que também pode influenciar no consumo de energia para condicionamento de ar.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Dando continuidade a esta pesquisa, sugere-se o desenvolvimento de outras atividades, buscando sempre o aperfeiçoamento e prováveis correções no método proposto. Para isso, salienta-se a necessidade de:

- a) Adicionar e analisar os efeitos dos perfis nas esquadrias;
- b) Adicionar e analisar o potencial de aproveitamento da ventilação natural;
- c) Adicionar e analisar os efeitos de elementos de sombreamento anexados às esquadrias;
- d) Adicionar análises de iluminação, pois alguns vidros apresentam bom desempenho térmico, mas podem apresentar um baixo desempenho lumínico.

REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10821-1**: Esquadrias para edificações. Parte 1: Esquadrias externas e internas — Terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 2017a.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10821-4**: Esquadrias para edificações. Parte 4: Esquadrias externas - Requisitos adicionais de desempenho. Rio de Janeiro: ABNT, 2017b.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-1**: Desempenho térmico de edificações. Parte 1: Definições, símbolos e unidades. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-2**: Desempenho térmico de edificações. Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-3**: Desempenho térmico de edificações. Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-1**: Edificações habitacionais - Desempenho. Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16023**: Vidros revestidos para controle solar — Requisitos, classificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto de Emenda NBR 15575-1**: Edificações habitacionais - Desempenho. Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

AGWA. **Australian glass and window association**. Disponível em: <<https://www.agwa.com.au/>>, Acesso em: 10 ago. 2019.

AS - AUSTRALIAN STANDARD. **AS 2047:2014** - Windows and external glazed doors in buildings. Austrália, 2014.

ASHRAE - AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **Standard 55** - Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta, Georgia: ASHRAE, 2017.

ASHRAE - AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **Standard 62.2** - Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality in Residential Buildings. Atlanta, Georgia: ASHRAE, 2016.

ASHRAE - AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **Standard 90.1** - Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings. Atlanta, Georgia: ASHRAE, 2007.

ASHRAE - AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **Standard 140** - Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs. Atlanta, Georgia: ASHRAE, 2014.

ASHRAE - AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **Standard 169** - Climatic Data for Building Design Standards. Atlanta, Georgia: ASHRAE, 2013.

BALLINGER, J. A.; LYONS, P. R. Advanced glazing technology for Australia - research and application. **Renewable Energy**, v. 8, Issues 1-4, p. 61-65, 1996.

BFRC. **British Fenestration Rating Council**. Disponível em: <<https://www.bfrc.org/>>, Acesso em: 10 ago. 2019.

BURGESS, J.C.; SKATES, H. **A New Zealand window efficiency rating system**. In: Proceedings of International Conference on Building Envelope Systems and Technology, Ottawa, p. 94–102. 2001.

CANADÁ. **Government of Canada**. Disponível em: <<https://www.nrcan.gc.ca/home>>, Acesso em: 10 ago. 2019.

Carpenter, S.C. et al.; **Window annual energy rating systems: what they tell us about residential window design and selection**. ASHRAE Transactions v. 104 (2), p. 806–813. 1998.

CEN. **EN 15251: Indoor Environmental Input Parameters for Design and Assessment of Energy Performance of Buildings Addressing Indoor Air Quality, Thermal Environment, Lighting and Acoustics**. European Committee for Standardization. Bruxelas, 2007.

Crooks B. et al. **Progress in the development of NFRC's residential fenestration annual energy rating methodology**. In Proceed-ings of Windows Innovations, Toronto, p. 202. 1995.

DUER, K. et al. Energy labelling of glazings and windows in Denmark: calculated and measured values. **Solar Energy**, v.73, n.1, p. 23-31. 2002.

ELETROBRÁS. **Pesquisa de Posse e Hábitos de Uso de Equipamentos Elétricos na Classe Residencial 2005**. 2005. Disponível em: <<http://www.procel.gov.br/>>, Acesso em: 01 out. 2019.

ELETROBRÁS. **Pesquisa de Posse e Hábitos de Uso de Equipamentos Elétricos na Classe Residencial 2019**. 2019. Disponível em: <<https://eletrobras.com/pt/Paginas/PPH-2019.aspx>>, Acesso em: 20 out. 2020.

EN - EUROPEAN STANDARD. **DIN EN 15251** - Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics. República Tcheca, 2012.

ENERGY STAR. **The simple choice for energy efficiency**. Disponível em: <<https://www.energystar.gov>>, Acesso em: 20 ago. 2019.

ENERGYPLUS. **EnergyPlus: versão 8.8.0**. Disponível em < <https://energyplus.net/>>, Acesso em: 28 jul. 2019.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Uso de Ar Condicionado no Setor Residencial Brasileiro: Perspectivas e contribuições para o avanço em eficiência energética.** – Rio de Janeiro: EPE, 2018. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/>>, Acesso em: 15/08/2019.

GRYNNING, S. et al. Windows in the buildings of tomorrow: Energy losers or energy gainers? **Energy and Buildings**, v. 61, p. 185-192. 2013.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo de 2010.** Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/>>, Acesso em: 10 ago. 2019.

IEA. International Energy Agency. **Developing Mechanisms for Promoting Demand-side Management and Energy Efficiency.** In Changing Electricity Businesses, Research Report nº 3, Task VI of the International Energy Agency, Demand Side Management Programme. OECD/IEA: Paris, 2000.

IEA. International Energy Agency. **The Future of Cooling: Opportunities for energy-efficient air conditioning.** OECD/IEA: Paris, 2018.

INSEL. **Doppelintegral GmbH: User Manual.** 8ª ed., MS Windows. Stuttgart, Alemanha, 2009.

ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 12567-1** - Thermal performance of windows and doors - Determination of thermal transmittance by hot box method. Geneva, Suíça: ISO, 2000.

ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 18292** - Energy performance of fenestration systems for residential buildings - Calculation procedure. Geneva, Suíça: ISO, 2011.

JABER S.; AJIB S. Thermal and economic windows design for different climate zones. **Energy and Buildings**, v. 43, p. 3208-3215. 2011.

LABEEE – LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES. Downloads, **Arquivos climáticos.** Disponível em: <<http://www.labee.ufsc.br/downloads/arqclim>>. Acesso em: 10 mar. 2020.

LBNL - LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY. **WINDOW 7.4.** Disponível em: <<https://windows.lbl.gov/software/window>>, Acesso em 10 jan. 2019.

LEE J.W. et al. Optimization of building window system in Asian regions by analyzing solar heat gain and daylighting elements. **Renewable Energy**, v. 50, p. 522-531. 2013.

LEED - LEADERSHIP IN ENERGY & ENVIRONMENTAL DESIGN. **Reference Guide for Building and Construction.** Washington, 2013.

LOPES, M. et al. **O uso da simulação no processo de avaliação do nível de eficiência energética de edifícios comerciais.** XI CONBRAVA. São Paulo, 2009.

MACCARI, A.; ZINZI, M. Simplified algorithms for the italian energy rating scheme for fenestration in residential buildings. **Solar Energy**, v. 69, n. 6, p. 75-92. 2001.

MARINOSKI, D. L. **Aperfeiçoamento de um sistema de medição de ganho de calor solar através de aberturas.** Dissertação de Mestrado, UFSC, 2005.

MICROSOFT. **Office support.** Disponível em: <<https://support.office.com/pt-br/article/proj-lin-fun%C3%A7%C3%A3o-proj-lin-84d7d0d9-6e50-4101-977a-fa7abf772b6d>>, Acesso em: 16 ago. 2019.

MME. Ministério de Minas e Energia. **BEN – Balanço Energético Nacional 2018: ano base 2017.** – Rio de Janeiro: MME, 2018. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/mme>> Acesso em: 28 jan. 2018.

MME. Ministério de Minas e Energia. **Pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso: ano base 2005.** – Rio de Janeiro: MME, 2007. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/mme>> Acesso em: 28 jan. 2018.

NFRC. **National Fenestration Rating Council.** Disponível em: <<https://www.nfrc.org/>>, Acesso em: 10 ago. 2019.

NS - NORWAY STANDARD. **Samlingen inneholder standarder referert til i NS 3031:2014** - Beregning av bygningers energiytelse - Metode og data. Noruega, 2014.

OROUJI, P. et al. Methodology of standardizing the energy labeling and rating of window fenestration in IRAN. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 33, p. 24-33. 2019.

PROCEL - PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procel Edifica.** Disponível em: < <http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View={02A05065-372B-4133-B054-4369D8F37B3F}#1>>, Acesso em: 15 fev. 2019.

REILLY, S.; HAWTHORNE, W. **The impact of windows on residential energy use.** ASHRAE Transactions, p. 791-798. 1998.

SINGH, M. C.; GARG S. N. Energy rating of different glazings for Indian climates. **Energy**, v. 34, n. 11, p. 1986-1992. 2009.

SUN Y.; WU Y.; WILSON R. A review of thermal and optical characterisation of complex window systems and their building performance prediction, **Applied Energy**, v. 222, p. 729-747. 2018.

TIAN, C. et al. A generalized window energy rating system for typical office buildings. **Solar Energy**, v. 84, n. 7, p. 1232-1243. 2010.

TRNSYS. **Transient System Simulation Tool.** Disponível em: < <http://www.trnsys.com/>>, Acesso em: 12 mai. 2021.

TRZĄSKI A.; RUCIŃSKA J. Energy labeling of windows – Possibilities and limitations, **Solar Energy**, v. 120, p. 158-174. 2015.

TSIKALOUDAKI K.; LASKOS K.; THEODOSIOU T.; BIKAS D. The energy performance of windows in Mediterranean regions. **Energy and Buildings**, v. 92, p. 180-187. 2015.

URBIKAIN M.K.; SALA J.M. Analysis of different models to estimate energy savings related to windows in residential buildings. **Energy and Buildings**, v 41, p. 687-695. 2009.

WERS. **Window energy rating scheme.** Disponível em: <<https://www.wers.net/>>, Acesso em: 10 ago. 2019.

WESTPHAL, S. F. **Manual técnico do vidro plano para edificações.** São Paulo: Câmara Brasileira do Livro, 2016.

MITCHELL, R. et al. **WINDOW 7 User Manual.** Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2019.

APÊNDICE

APÊNDICE A – PLANTAS BAIXAS TP1, TP2, TP3 E TABELA DE ESQUADRIAS.

Figura A. 1: Planta Baixa TP1.

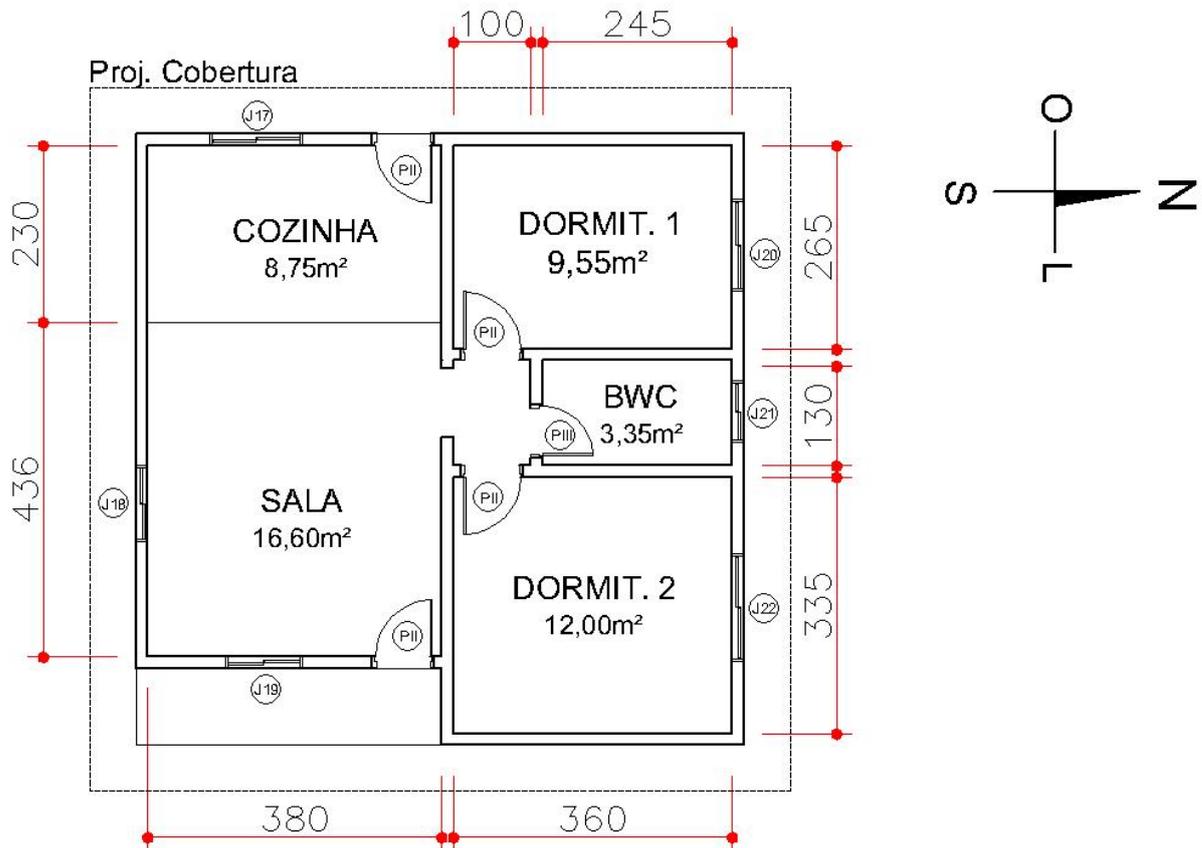


Figura A. 2: Planta Baixa TP1.

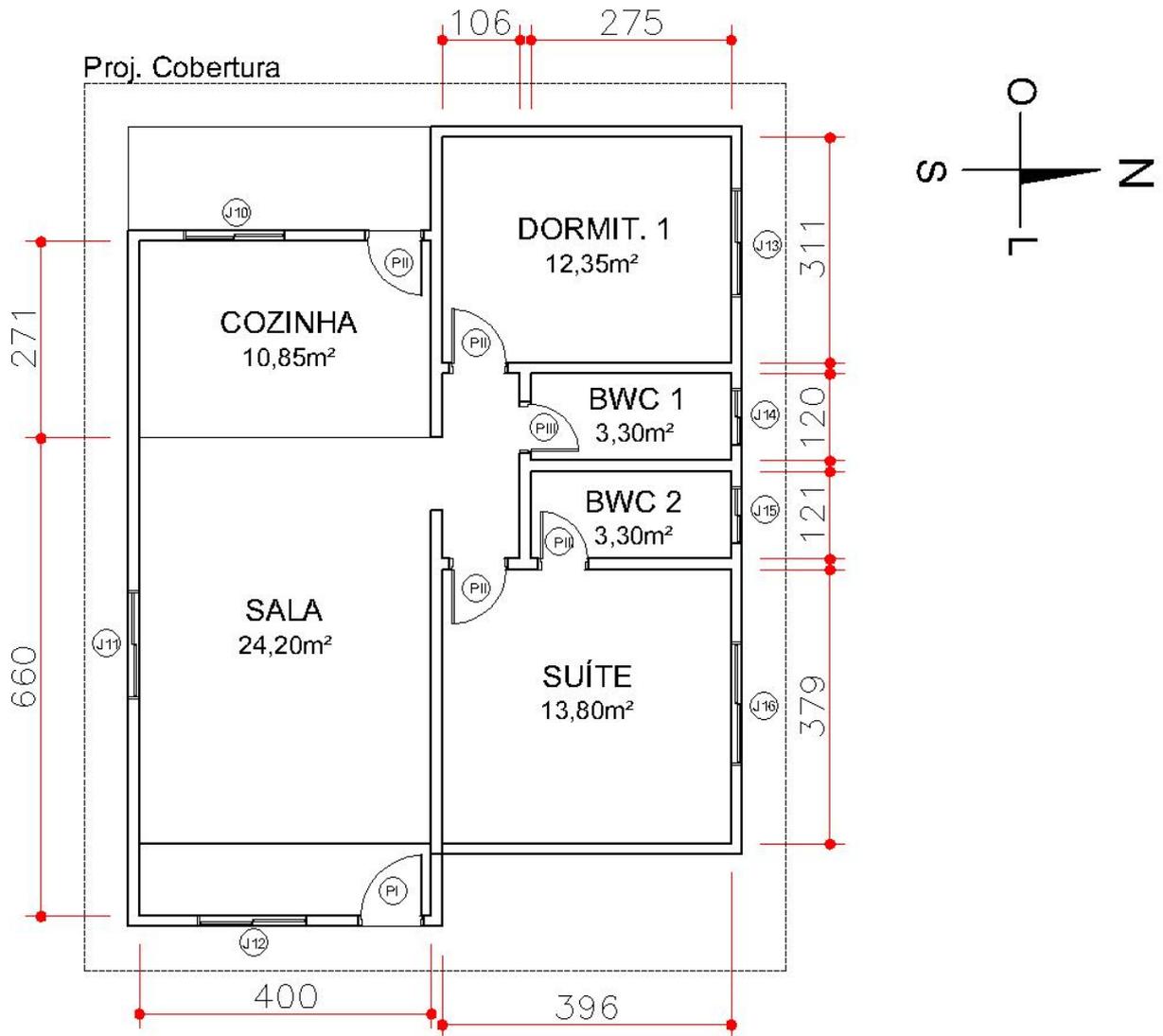


Figura A. 3: Planta Baixa TP3.

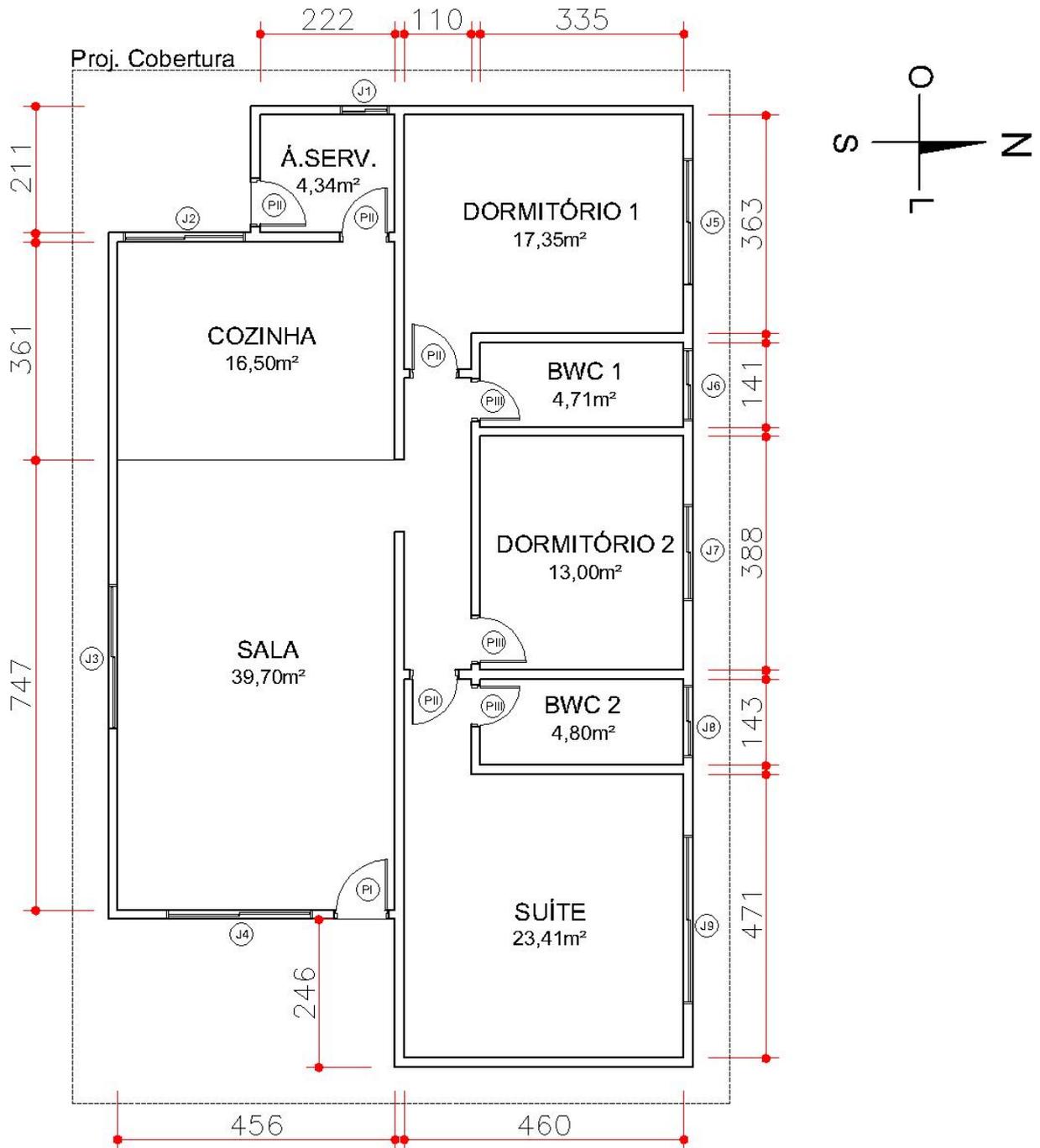


Tabela A. 1: Tabela de esquadrias.

	Cômodo	Área	Largura	Altura
TP120		m ²	m	m
J1	Á.Serv.	0,8	0,8	1
J2	Cozinha	2,4	2	1,2
J3	Sala	2,88	2,4	1,2
J4	Sala	2,88	2,4	1,2
J5	Dormit.1	2,52	2,1	1,2
J6	BWC 1	0,72	1,2	0,6
J7	Dormit.2	1,92	1,6	1,2
J8	BWC 2	0,72	1,2	0,6
J9	Suíte	3,36	2,8	1,2
Área		18,2		
TP70				
J10	Cozinha	1,68	1,4	1,2
J11	Sala	1,8	1,5	1,2
J12	Sala	1,8	1,5	1,2
J13	Dormit.1	1,8	1,5	1,2
J14	BWC 1	0,48	0,8	0,6
J15	BWC 2	0,48	0,8	0,6
J16	Suíte	2,04	1,7	1,2
Área		10,08		
TP50				
J17	Cozinha	1,32	1,1	1,2
J18	Sala	1,2	1	1,2
J19	Sala	1,2	1	1,2
J20	Dormit.1	1,44	1,2	1,2
J21	BWC 1	0,48	0,8	0,6
J22	Dormit.2	1,68	1,4	1,2
Área		7,32		

APÊNDICE B – CONSUMO ANUAL DE ENERGIA PARA RESFRIAMENTO E AQUECIMENTO EM KWH/M² DE CADA UM DOS 28 VIDROS NAS 15 CIDADES PARA AS TRÊS TIPOLOGIAS.

Tabela B. 1: Consumo anual de energia para resfriamento dos 28 vidros na cidade de Belém para as três tipologias.

CIDADE	VIDROS	TP50	TP70	TP120	TP50	TP70	TP120
		Resfriamento kWh/m ² de Vidro	Resfriamento kWh/m ² de Vidro	Resfriamento kWh/m ² de Vidro	Aquecimento kWh/m ² de Vidro	Aquecimento kWh/m ² de Vidro	Aquecimento kWh/m ² de Vidro
BELÉM	1	511	461	476	-	-	-
	2	505	454	467	-	-	-
	3	501	450	464	-	-	-
	4	502	451	465	-	-	-
	5	497	446	459	-	-	-
	6	493	441	453	-	-	-
	7	490	438	452	-	-	-
	8	489	437	449	-	-	-
	9	488	436	450	-	-	-
	10	487	433	445	-	-	-
	11	490	438	451	-	-	-
	12	490	438	451	-	-	-
	13	484	432	445	-	-	-
	14	486	434	446	-	-	-
	15	507	456	468	-	-	-
	16	496	443	456	-	-	-
	17	496	443	455	-	-	-
	18	495	443	455	-	-	-
	19	489	436	448	-	-	-
	20	487	434	445	-	-	-
	21	485	432	444	-	-	-
	22	483	429	440	-	-	-
	23	483	429	441	-	-	-
	24	480	425	435	-	-	-
	25	481	428	440	-	-	-
	26	481	427	439	-	-	-
	27	478	424	436	-	-	-
	28	478	424	435	-	-	-

Tabela B. 2: Consumo anual de energia para resfriamento dos 28 vidros na cidade de Boa Vista para as três tipologias.

CIDADE	VIDROS	TP50	TP70	TP120	TP50	TP70	TP120
		Resfriamento kWh/m ² de Vidro	Resfriamento kWh/m ² de Vidro	Resfriamento kWh/m ² de Vidro	Aquecimento kWh/m ² de Vidro	Aquecimento kWh/m ² de Vidro	Aquecimento kWh/m ² de Vidro
BOA VISTA	1	641	587	476	-	-	-
	2	634	580	467	-	-	-
	3	630	575	464	-	-	-
	4	631	576	465	-	-	-
	5	626	570	459	-	-	-
	6	621	564	453	-	-	-
	7	618	562	452	-	-	-
	8	617	560	449	-	-	-
	9	616	560	450	-	-	-
	10	613	557	445	-	-	-
	11	618	562	451	-	-	-
	12	618	562	451	-	-	-
	13	612	556	445	-	-	-
	14	614	558	446	-	-	-
	15	636	580	468	-	-	-
	16	623	566	456	-	-	-
	17	623	566	455	-	-	-
	18	623	566	455	-	-	-
	19	616	558	448	-	-	-
	20	613	555	445	-	-	-
	21	611	554	444	-	-	-
	22	608	550	440	-	-	-
	23	609	551	441	-	-	-
	24	605	546	435	-	-	-
	25	607	549	440	-	-	-
	26	606	549	439	-	-	-
	27	603	546	436	-	-	-
	28	603	545	435	-	-	-

Tabela B. 3: Consumo anual de energia para resfriamento e aquecimento dos 28 vidros na cidade de Florianópolis para as três tipologias.

CIDADE	VIDROS	TP50	TP70	TP120	TP50	TP70	TP120
		Resfriamento kWh/m ² de Vidro	Resfriamento kWh/m ² de Vidro	Resfriamento kWh/m ² de Vidro	Aquecimento kWh/m ² de Vidro	Aquecimento kWh/m ² de Vidro	Aquecimento kWh/m ² de Vidro
FLORIANÓPOLIS	1	135	118	85,3	19,1	20,1	13,0
	2	131	114	81,9	20,0	21,1	14,2
	3	129	112	80,1	20,3	21,4	14,5
	4	130	112	80,5	20,2	21,4	14,5
	5	127	110	78,1	20,9	22,1	15,4
	6	124	107	76,2	21,0	22,3	15,7
	7	123	106	74,4	21,7	23,0	16,4
	8	122	105	74,2	21,5	22,9	16,4
	9	122	105	73,5	22,0	23,3	16,7
	10	121	104	72,8	21,9	23,3	16,9
	11	123	106	74,6	21,7	23,1	16,6
	12	123	106	74,6	21,8	23,2	16,7
	13	120	103	71,5	22,5	23,9	17,5
	14	121	104	72,8	22,1	23,5	17,2
	15	134	116	83,9	18,2	19,2	12,4
	16	127	110	78,0	19,6	20,8	14,3
	17	127	109	77,8	19,6	20,8	14,3
	18	127	109	77,6	19,6	20,9	14,3
	19	123	106	74,4	20,4	21,8	15,4
	20	123	105	73,9	19,8	21,1	14,8
	21	121	104	72,4	20,9	22,3	16,0
	22	120	103	71,8	20,3	21,8	15,6
	23	120	102	71,4	21,2	22,6	16,4
	24	118	101	70,1	20,7	22,2	16,1
	25	119	102	70,7	21,2	22,7	16,6
	26	119	101	70,3	21,5	23,0	16,9
	27	117	100	69,0	21,8	23,4	17,3
	28	117	100	69,0	21,5	23,0	17,0

Tabela B. 4: Consumo anual de energia para resfriamento dos 28 vidros na cidade do Rio de Janeiro para as três tipologias.

CIDADE	VIDROS	TP50	TP70	TP120	TP50	TP70	TP120
		Resfriamento kWh/m ² de Vidro	Resfriamento kWh/m ² de Vidro	Resfriamento kWh/m ² de Vidro	Aquecimento kWh/m ² de Vidro	Aquecimento kWh/m ² de Vidro	Aquecimento kWh/m ² de Vidro
RIO DE JANEIRO	1	266	237	182	-	-	-
	2	260	230	175	-	-	-
	3	257	227	172	-	-	-
	4	257	227	173	-	-	-
	5	253	223	168	-	-	-
	6	249	218	164	-	-	-
	7	247	216	162	-	-	-
	8	246	215	161	-	-	-
	9	245	214	161	-	-	-
	10	243	212	158	-	-	-
	11	247	216	161	-	-	-
	12	247	216	162	-	-	-
	13	241	211	157	-	-	-
	14	244	213	158	-	-	-
	15	264	233	178	-	-	-
	16	253	222	168	-	-	-
	17	253	222	168	-	-	-
	18	252	222	167	-	-	-
	19	247	216	162	-	-	-
	20	246	214	161	-	-	-
	21	243	212	159	-	-	-
	22	242	210	157	-	-	-
	23	241	210	157	-	-	-
	24	239	207	154	-	-	-
	25	240	209	156	-	-	-
	26	239	208	155	-	-	-
	27	237	205	153	-	-	-
	28	237	205	153	-	-	-

Tabela B. 5: Consumo anual de energia para resfriamento dos 28 vidros na cidade de Brasília para as três tipologias.

		TP50	TP70	TP120	TP50	TP70	TP120
CIDADE	VIDROS	Resfriamento kWh/m ² de Vidro	Resfriamento kWh/m ² de Vidro	Resfriamento kWh/m ² de Vidro	Aquecimento kWh/m ² de Vidro	Aquecimento kWh/m ² de Vidro	Aquecimento kWh/m ² de Vidro
BRASÍLIA	1	119	104	57,8	-	-	-
	2	115	99,2	53,3	-	-	-
	3	112	96,4	51,2	-	-	-
	4	112	97,0	51,6	-	-	-
	5	109	93,7	48,6	-	-	-
	6	105	90,1	45,9	-	-	-
	7	103	88,3	44,2	-	-	-
	8	103	87,5	43,7	-	-	-
	9	102	87,0	43,1	-	-	-
	10	101	85,6	42,0	-	-	-
	11	104	88,7	44,4	-	-	-
	12	104	88,8	44,4	-	-	-
	13	99,2	84,4	40,8	-	-	-
	14	101	86,3	42,4	-	-	-
	15	117	101	56,4	-	-	-
	16	109	93,2	49,1	-	-	-
	17	108	92,8	48,8	-	-	-
	18	108	92,6	48,6	-	-	-
	19	104	88,2	44,8	-	-	-
	20	103	87,1	44,4	-	-	-
	21	100	85,2	42,3	-	-	-
	22	99,5	84,0	41,8	-	-	-
	23	98,9	83,7	41,0	-	-	-
	24	97,0	81,7	39,8	-	-	-
	25	98,1	82,9	40,4	-	-	-
	26	97,6	82,5	39,9	-	-	-
	27	95,5	80,5	38,3	-	-	-
	28	95,5	80,4	38,4	-	-	-

Tabela B. 6: Consumo anual de energia para resfriamento e aquecimento dos 28 vidros na cidade de Curitiba para as três tipologias.

		TP50	TP70	TP120	TP50	TP70	TP120
CIDADE	VIDROS	Resfriamento kWh/m ² de Vidro	Resfriamento kWh/m ² de Vidro	Resfriamento kWh/m ² de Vidro	Aquecimento kWh/m ² de Vidro	Aquecimento kWh/m ² de Vidro	Aquecimento kWh/m ² de Vidro
CURITIBA	1	35,9	29,7	11,2	98,1	97,9	80,1
	2	34,5	28,4	10,4	101,1	101,3	85,5
	3	33,2	27,3	9,60	102,0	102,2	87,1
	4	33,6	27,6	9,85	101,9	102,1	86,5
	5	32,4	26,5	9,14	103,9	104,5	89,9
	6	30,8	25,1	8,31	104,1	104,7	90,4
	7	30,1	24,5	7,87	106,5	107,2	94,0
	8	29,9	24,3	7,79	105,7	106,5	93,0
	9	29,6	24,1	7,60	107,3	108,1	95,3
	10	29,2	23,7	7,39	106,9	107,9	94,8
	11	30,5	24,8	8,07	106,6	107,4	94,2
	12	30,5	24,9	8,10	107,0	107,8	94,6
	13	28,7	23,2	7,13	109,0	110,0	97,7
	14	29,6	24,1	7,58	107,7	108,7	96,1
	15	35,4	29,0	10,8	95,2	95,5	78,8
	16	32,3	26,2	9,01	99,9	100,6	86,4
	17	32,1	26,0	8,89	99,8	100,5	86,3
	18	32,0	26,0	8,86	99,9	100,7	86,6
	19	30,3	24,4	7,90	102,4	103,5	90,6
	20	29,9	23,9	7,67	100,4	101,5	88,5
	21	29,0	23,3	7,25	104,0	105,2	92,8
	22	28,6	22,8	7,02	102,2	103,5	91,3
	23	28,5	22,8	6,95	104,9	106,1	94,2
	24	27,7	22,0	6,54	103,4	104,9	93,3
	25	28,2	22,5	6,80	105,0	106,4	94,9
	26	28,1	22,4	6,77	106,0	107,4	95,6
	27	27,2	21,7	6,30	106,9	108,4	97,4
	28	27,2	21,6	6,29	105,9	107,4	96,5

Tabela B. 7: Consumo anual de energia para resfriamento e aquecimento dos 28 vidros na cidade de Porto Alegre para as três tipologias.

CIDADE	VIDROS	TP50	TP70	TP120	TP50	TP70	TP120
		Resfriamento kWh/m ² de Vidro	Resfriamento kWh/m ² de Vidro	Resfriamento kWh/m ² de Vidro	Aquecimento kWh/m ² de Vidro	Aquecimento kWh/m ² de Vidro	Aquecimento kWh/m ² de Vidro
PORTO ALEGRE	1	87,4	76,5	50,7	78,3	82,1	67,2
	2	85,9	74,8	48,9	79,4	83,5	69,1
	3	84,5	73,5	47,9	79,9	83,9	69,5
	4	84,8	73,9	48,1	79,8	83,8	69,5
	5	83,5	72,4	46,8	80,7	84,8	70,7
	6	81,8	70,6	45,3	80,6	84,8	70,7
	7	81,0	69,9	44,8	81,8	86,1	72,0
	8	80,7	69,6	44,4	81,3	85,6	71,6
	9	80,4	69,4	44,3	82,2	86,4	72,4
	10	79,9	68,7	43,6	81,8	86,1	72,3
	11	81,3	70,2	44,8	81,8	86,1	72,2
	12	81,4	70,3	44,9	82,0	86,3	72,4
	13	79,2	68,3	43,3	82,9	87,2	73,4
	14	80,2	69,2	43,9	82,2	86,6	72,9
	15	86,4	75,3	49,6	76,1	80,2	65,8
	16	83,1	71,8	46,5	78,0	82,3	68,4
	17	82,8	71,6	46,3	78,0	82,3	68,3
	18	82,7	71,5	46,3	78,1	82,4	68,4
	19	80,8	69,6	44,6	79,1	83,5	69,8
	20	80,0	68,8	44,0	77,8	82,2	68,5
	21	79,3	68,2	43,4	79,9	84,3	70,6
	22	78,6	67,4	42,8	78,6	83,1	69,5
	23	78,6	67,5	42,9	80,3	84,7	71,1
	24	78,7	66,4	41,9	79,0	83,6	70,1
	25	78,3	67,2	42,5	80,2	84,7	71,1
	26	78,3	67,1	42,4	80,7	85,2	71,7
	27	78,4	66,2	41,6	81,1	85,7	72,1
	28	78,3	66,0	41,5	80,4	85,0	71,5

Tabela B. 8: Consumo anual de energia para resfriamento e aquecimento dos 28 vidros na cidade de Santa Maria para as três tipologias.

CIDADE	VIDROS	TP50	TP70	TP120	TP50	TP70	TP120
		Resfriamento kWh/m ² de Vidro	Resfriamento kWh/m ² de Vidro	Resfriamento kWh/m ² de Vidro	Aquecimento kWh/m ² de Vidro	Aquecimento kWh/m ² de Vidro	Aquecimento kWh/m ² de Vidro
SANTA MARIA	1	120	103	69,2	73,4	72,7	53,9
	2	117	99,5	66,2	75,5	74,9	56,8
	3	115	97,7	64,7	76,2	75,6	57,5
	4	115	98,1	65,1	76,0	75,5	57,4
	5	113	95,8	62,9	77,5	77,1	59,4
	6	111	93,4	61,0	77,7	77,2	59,5
	7	109	92,3	59,8	79,4	79,0	61,5
	8	109	91,7	59,4	78,8	78,4	61,0
	9	108	91,4	59,0	80,0	79,6	62,2
	10	107	90,3	58,1	79,7	79,3	62,1
	11	110	92,5	59,8	79,4	79,1	61,8
	12	110	92,5	59,9	79,7	79,4	62,1
	13	106	89,6	57,3	81,2	80,9	63,9
	14	108	90,8	58,4	80,2	79,9	62,9
	15	118	101	67,7	70,9	70,4	52,2
	16	113	95,3	62,6	74,2	74,0	56,4
	17	112	95,1	62,5	74,2	73,9	56,3
	18	112	94,9	62,3	74,3	74,0	56,4
	19	109	91,9	59,5	76,1	75,9	58,7
	20	108	91,0	59,0	74,5	74,3	57,2
	21	107	89,9	57,8	77,3	77,1	60,0
	22	106	88,9	57,1	75,8	75,7	58,7
	23	106	88,9	56,9	77,9	77,8	60,8
	24	105	87,3	55,7	76,6	76,6	59,8
	25	105	88,3	56,3	77,9	77,8	61,1
	26	105	88,0	56,1	78,6	78,6	61,9
	27	104	86,6	54,9	79,3	79,2	62,6
	28	104	86,5	54,9	78,5	78,5	61,9

Tabela B. 9: Consumo anual de energia para resfriamento e aquecimento dos 28 vidros na cidade de São Paulo para as três tipologias.

CIDADE	VIDROS	TP50	TP70	TP120	TP50	TP70	TP120
		Resfriamento kWh/m ² de Vidro	Resfriamento kWh/m ² de Vidro	Resfriamento kWh/m ² de Vidro	Aquecimento kWh/m ² de Vidro	Aquecimento kWh/m ² de Vidro	Aquecimento kWh/m ² de Vidro
SÃO PAULO	1	76,5	65,7	38,2	25,8	26,6	17,2
	2	73,9	63,2	35,9	26,7	27,8	18,6
	3	72,1	61,5	34,8	27,2	28,3	19,1
	4	72,5	61,9	35,0	27,1	28,2	19,0
	5	70,4	59,9	33,4	27,8	29,1	20,0
	6	68,2	57,7	31,9	28,0	29,3	20,3
	7	67,0	56,7	31,0	28,9	30,2	21,3
	8	66,6	56,2	30,7	28,6	30,0	21,1
	9	66,2	55,9	30,4	29,2	30,6	21,7
	10	65,4	55,1	29,8	29,0	30,5	21,8
	11	67,3	57,0	31,1	28,8	30,2	21,5
	12	67,4	57,1	31,1	29,0	30,4	21,6
	13	64,5	54,4	29,2	29,9	31,3	22,6
	14	65,9	55,6	30,0	29,3	30,7	22,1
	15	75,6	64,4	37,2	24,6	25,5	16,5
	16	70,4	59,6	33,3	26,2	27,5	18,7
	17	70,1	59,3	33,2	26,2	27,5	18,7
	18	70,0	59,2	33,1	26,3	27,5	18,7
	19	67,2	56,6	31,0	27,2	28,6	20,0
	20	66,6	55,8	30,7	26,4	27,8	19,3
	21	65,2	54,8	29,7	27,9	29,3	20,8
	22	64,6	54,0	29,3	27,1	28,6	20,2
	23	64,3	53,9	29,1	28,2	29,7	21,2
	24	63,2	52,6	28,3	27,6	29,2	20,9
	25	63,9	53,4	28,7	28,2	29,8	21,4
	26	63,6	53,2	28,5	28,6	30,2	21,8
	27	62,3	52,0	27,6	29,0	30,6	22,3
	28	62,3	51,9	27,6	28,6	30,2	21,9

Tabela B. 10: Consumo anual de energia para resfriamento dos 28 vidros na cidade de Campo Grande para as três tipologias.

CIDADE	VIDROS	TP50	TP70	TP120	TP50	TP70	TP120
		Resfriamento kWh/m ² de Vidro	Resfriamento kWh/m ² de Vidro	Resfriamento kWh/m ² de Vidro	Aquecimento kWh/m ² de Vidro	Aquecimento kWh/m ² de Vidro	Aquecimento kWh/m ² de Vidro
CAMPO GRANDE	1	270	245	178	-	-	-
	2	264	238	170	-	-	-
	3	260	235	167	-	-	-
	4	261	235	168	-	-	-
	5	256	230	163	-	-	-
	6	252	226	159	-	-	-
	7	249	223	156	-	-	-
	8	248	222	155	-	-	-
	9	247	222	155	-	-	-
	10	245	219	152	-	-	-
	11	249	223	156	-	-	-
	12	249	223	156	-	-	-
	13	243	218	151	-	-	-
	14	246	220	152	-	-	-
	15	267	241	174	-	-	-
	16	255	229	162	-	-	-
	17	255	229	162	-	-	-
	18	255	229	161	-	-	-
	19	248	222	155	-	-	-
	20	247	221	154	-	-	-
	21	245	218	151	-	-	-
	22	243	216	150	-	-	-
	23	242	216	149	-	-	-
	24	239	213	146	-	-	-
	25	241	215	148	-	-	-
	26	240	214	147	-	-	-
	27	238	212	145	-	-	-
	28	237	211	144	-	-	-

Tabela B. 11: Consumo anual de energia para resfriamento dos 28 vidros na cidade de Cuiabá para as três tipologias.

CIDADE	VIDROS	TP50	TP70	TP120	TP50	TP70	TP120
		Resfriamento kWh/m ² de Vidro	Resfriamento kWh/m ² de Vidro	Resfriamento kWh/m ² de Vidro	Aquecimento kWh/m ² de Vidro	Aquecimento kWh/m ² de Vidro	Aquecimento kWh/m ² de Vidro
CUIABÁ	1	484	446	350	-	-	-
	2	476	439	342	-	-	-
	3	472	435	338	-	-	-
	4	473	435	339	-	-	-
	5	468	430	333	-	-	-
	6	462	423	327	-	-	-
	7	459	421	325	-	-	-
	8	457	419	322	-	-	-
	9	457	419	323	-	-	-
	10	454	415	319	-	-	-
	11	459	421	324	-	-	-
	12	459	421	324	-	-	-
	13	453	414	318	-	-	-
	14	455	416	319	-	-	-
	15	478	440	344	-	-	-
	16	465	426	330	-	-	-
	17	465	426	330	-	-	-
	18	464	426	329	-	-	-
	19	457	418	322	-	-	-
	20	454	414	319	-	-	-
	21	452	413	318	-	-	-
	22	449	410	315	-	-	-
	23	450	411	315	-	-	-
	24	445	405	311	-	-	-
	25	448	409	313	-	-	-
	26	447	408	313	-	-	-
	27	444	405	310	-	-	-
	28	443	404	309	-	-	-

Tabela B. 12: Consumo anual de energia para resfriamento dos 28 vidros na cidade de São Luís para as três tipologias.

CIDADE	VIDROS	TP50	TP70	TP120	TP50	TP70	TP120
		Resfriamento kWh/m ² de Vidro	Resfriamento kWh/m ² de Vidro	Resfriamento kWh/m ² de Vidro	Aquecimento kWh/m ² de Vidro	Aquecimento kWh/m ² de Vidro	Aquecimento kWh/m ² de Vidro
SÃO LUÍS	1	449	399	324	-	-	-
	2	444	393	319	-	-	-
	3	441	390	316	-	-	-
	4	442	391	316	-	-	-
	5	438	387	312	-	-	-
	6	435	383	307	-	-	-
	7	432	381	305	-	-	-
	8	432	380	304	-	-	-
	9	431	379	304	-	-	-
	10	430	377	301	-	-	-
	11	433	381	305	-	-	-
	12	433	381	305	-	-	-
	13	428	376	300	-	-	-
	14	430	378	301	-	-	-
	15	446	395	320	-	-	-
	16	437	385	310	-	-	-
	17	437	385	309	-	-	-
	18	436	385	309	-	-	-
	19	432	379	303	-	-	-
	20	430	377	301	-	-	-
	21	428	376	299	-	-	-
	22	426	373	297	-	-	-
	23	427	374	297	-	-	-
	24	424	370	294	-	-	-
	25	425	373	296	-	-	-
	26	425	372	295	-	-	-
	27	423	370	293	-	-	-
	28	422	369	292	-	-	-

Tabela B. 13: Consumo anual de energia para resfriamento dos 28 vidros na cidade de Manaus para as três tipologias.

CIDADE	VIDROS	TP50	TP70	TP120	TP50	TP70	TP120
		Resfriamento kWh/m ² de Vidro	Resfriamento kWh/m ² de Vidro	Resfriamento kWh/m ² de Vidro	Aquecimento kWh/m ² de Vidro	Aquecimento kWh/m ² de Vidro	Aquecimento kWh/m ² de Vidro
MANAUS	1	541	492	399	-	-	-
	2	535	485	392	-	-	-
	3	533	481	389	-	-	-
	4	533	482	390	-	-	-
	5	529	477	384	-	-	-
	6	524	471	380	-	-	-
	7	521	469	377	-	-	-
	8	521	467	376	-	-	-
	9	520	467	375	-	-	-
	10	518	465	373	-	-	-
	11	522	469	377	-	-	-
	12	522	469	377	-	-	-
	13	516	463	371	-	-	-
	14	518	465	373	-	-	-
	15	537	486	394	-	-	-
	16	527	475	383	-	-	-
	17	527	474	382	-	-	-
	18	527	474	382	-	-	-
	19	520	467	376	-	-	-
	20	518	465	374	-	-	-
	21	516	463	372	-	-	-
	22	514	460	369	-	-	-
	23	514	460	370	-	-	-
	24	510	456	365	-	-	-
	25	513	459	368	-	-	-
	26	512	458	367	-	-	-
	27	509	456	365	-	-	-
	28	509	455	364	-	-	-

Tabela B. 14: Consumo anual de energia para resfriamento dos 28 vidros na cidade de Recife para as três tipologias.

CIDADE	VIDROS	TP50	TP70	TP120	TP50	TP70	TP120
		Resfriamento kWh/m ² de Vidro	Resfriamento kWh/m ² de Vidro	Resfriamento kWh/m ² de Vidro	Aquecimento kWh/m ² de Vidro	Aquecimento kWh/m ² de Vidro	Aquecimento kWh/m ² de Vidro
RECIFE	1	540	492	398	-	-	-
	2	533	485	390	-	-	-
	3	529	481	387	-	-	-
	4	530	482	387	-	-	-
	5	525	476	382	-	-	-
	6	520	470	377	-	-	-
	7	517	468	374	-	-	-
	8	516	466	373	-	-	-
	9	515	466	372	-	-	-
	10	513	463	370	-	-	-
	11	517	468	374	-	-	-
	12	517	468	374	-	-	-
	13	511	461	368	-	-	-
	14	513	463	370	-	-	-
	15	535	487	392	-	-	-
	16	523	473	379	-	-	-
	17	523	473	379	-	-	-
	18	522	473	379	-	-	-
	19	516	466	372	-	-	-
	20	514	463	369	-	-	-
	21	512	461	368	-	-	-
	22	509	458	365	-	-	-
	23	509	459	365	-	-	-
	24	506	454	360	-	-	-
	25	508	457	364	-	-	-
	26	507	456	363	-	-	-
	27	504	454	360	-	-	-
	28	504	453	359	-	-	-

Tabela B. 15: Consumo anual de energia para resfriamento dos 28 vidros na cidade de Salvador para as três tipologias.

CIDADE	VIDROS	TP50	TP70	TP120	TP50	TP70	TP120
		Resfriamento kWh/m ² de Vidro	Resfriamento kWh/m ² de Vidro	Resfriamento kWh/m ² de Vidro	Aquecimento kWh/m ² de Vidro	Aquecimento kWh/m ² de Vidro	Aquecimento kWh/m ² de Vidro
SALVADOR	1	432	389	314	-	-	-
	2	425	382	306	-	-	-
	3	421	378	303	-	-	-
	4	422	379	304	-	-	-
	5	417	374	298	-	-	-
	6	413	369	294	-	-	-
	7	410	366	291	-	-	-
	8	409	365	290	-	-	-
	9	408	364	289	-	-	-
	10	406	362	287	-	-	-
	11	409	366	290	-	-	-
	12	409	366	291	-	-	-
	13	404	360	285	-	-	-
	14	406	362	287	-	-	-
	15	428	385	310	-	-	-
	16	416	373	297	-	-	-
	17	416	372	297	-	-	-
	18	416	372	297	-	-	-
	19	409	365	290	-	-	-
	20	409	364	289	-	-	-
	21	406	361	286	-	-	-
	22	404	359	284	-	-	-
	23	403	359	284	-	-	-
	24	400	355	280	-	-	-
	25	402	357	282	-	-	-
	26	401	356	281	-	-	-
	27	399	354	279	-	-	-
	28	398	353	278	-	-	-