

CARLOS EDILSON CHIARADIA

Aplicação do conceito de edificações de energia zero e seu impacto nas cidades por meio de parâmetros técnicos, tecnológicos e ambientais

Carlos Edilson Chiaradia

Aplicação do conceito de edificações de energia zero e seu impacto nas cidades por meio de parâmetros técnicos, tecnológicos e ambientais

Dissertação apresentada ao Conselho de Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Transmissão e Conversão de Energia.

Orientador: Prof. Dr. José Antônio Perrella Balestieri

Coorientador: Prof. Dr. Rubens Alves Dias

Chiaradia, Carlos Edilson
C532a Aplicação do conceito de edificações de energia zero e seu impacto nas
 cidades por meio de parâmetros técnicos, tecnológicos e ambientais /
 Carlos Edílson Chiaradia – Guaratinguetá, 2020.
 267 f : il.
 Bibliografia: f. 169-179

 Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de
 Engenharia de Guaratinguetá, 2020.
 Orientador: Prof. Dr. José Antônio Perrella Balestieri
 Co-Orientador: Prof. Dr. Rubens Alves Dias

 1. Edificações. 2. Energia elétrica - Consumo. 3. Recursos
 energéticos. 4. Gases estufa. I. Título.

CDU 728(043)

CARLOS EDILSON CHIARADIA

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO: MESTRADO

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO



Prof. Dr. Ivonete Ávila
Coordenadora

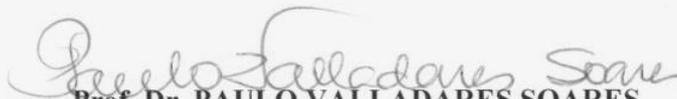
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. JOSÉ ANTONIO PERRELLA BALESTIERI
Orientador / UNESP/FEG



Prof. Dr. CHISTIAN JEREMI RODRIGUEZ CORONADO
UNIFEI



Prof. Dr. PAULO VALLADARES SOARES
UNESP/FEG

DADOS CURRICULARES

CARLOS EDILSON CHIARADIA

NASCIMENTO 26.03.1986 – São Bento do Sapucaí / SP

FILIAÇÃO Antônio Pinto Chiaradia
Maria Benedita dos Santos

2004/2007 Licenciatura em Física
FEG – UNESP

2008/2015 Graduação em Engenharia Mecânica
FEG – UNESP

Dedico este trabalho ao meu avô, João Isabel dos Santos (*in memoriam*), que me ensinou que a felicidade pouco tem a ver com as condições externas, e que se deve sorrir sempre, mesmo nos momentos de dor.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte da vida e da graça. Agradeço pela minha vida, minha inteligência, minha família e meus amigos.

Ao meu orientador, *Prof. Dr. José Antônio Perrella Balestieri*, e coorientador, *Prof. Dr. Rubens Alves Dias*, que jamais deixaram de me incentivar fornecendo dicas valiosas e colaborações imprescindíveis que implicaram diretamente na qualidade do presente trabalho.

Aos meus pais *Antônio Pinto Chiaradia e Maria Benedita dos Santos*, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram meus estudos.

Às funcionárias da Biblioteca do Campus de Guaratinguetá pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar,

Aos funcionários da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá pela dedicação e alegria no atendimento.

Agradeço, também, imensamente ao Departamento de Energia dos Estados Unidos da América (DOE) por disponibilizar o acesso gratuito ao programa de simulação energética de edificações *EnergyPlus* e arquivos climáticos para várias cidades brasileiras, pois, sem essas ferramentas, a realização do presente trabalho seria impossível.

“O sucesso normalmente ocorre para quem está ocupado demais para procurar por ele”

Henry David Thoreau

RESUMO

Atualmente o conceito de Edifício de Energia Zero é aplicado em países da União Europeia visando reduzir o consumo de energia das edificações e, conseqüentemente, as emissões de gases de efeito estufa. O objetivo desta dissertação é realizar um estudo para mensurar o impacto da aplicação de conceitos de edifícios de energia zero em edificações residenciais localizadas em cidades da região sudeste do Brasil, considerando as condições climáticas da cidade de Taubaté (SP) como referência. O estudo foi realizado através de simulação dinâmica computacional utilizando-se o *software EnergyPlus*. Para a realização das simulações foi construído um modelo de base de edifício residencial utilizando-se dados estatísticos disponíveis na literatura sobre as características das edificações residenciais da região sudeste brasileira. Foram simuladas estratégias de projeto passivo e medidas de eficiência energética visando selecionar aquelas com maior potencial de redução do consumo de energia do edifício em base anual de operação. As simulações demonstraram que a substituição dos envidraçados das janelas por modelos de baixo fator solar, a pintura das paredes externas com tinta de baixa absorvância no espectro solar e a utilização de ventilação natural são algumas das estratégias de projeto passivo que mais contribuem para a redução do consumo de energia elétrica. Em relação às medidas de eficiência energética, as simulações demonstraram que a substituição de equipamentos de ar condicionado antigos por modelos novos de alto coeficiente de desempenho e com compressores de rotação variável (*inverter*) conduz a uma grande redução no consumo de energia elétrica. Combinações de estratégias de projeto passivo e medidas de eficiência energética conduziram a reduções no consumo de energia elétrica na faixa de 36,8 a 48,8%, quando simulados modelos com um ou dois equipamentos de ar condicionado por apartamento, respectivamente. As simulações de geração fotovoltaica indicam que é possível gerar energia elétrica suficiente para atender até 59,2% do consumo restante após a aplicação das estratégias de projeto passivo e medidas de eficiência energética, utilizando somente a área de telhado para a instalação de painéis fotovoltaicos. As reduções no consumo de energia elétrica permitem reduzir as emissões de gases de efeito estufa em até 17,6 toneladas por edifício em base anual de operação, o que representa uma redução de 73,8% em relação ao modelo de base.

PALAVRAS-CHAVE: Edificações. Energia elétrica. Consumo. Recursos energéticos. Gases estufa.

ABSTRACT

Currently, the Zero Energy Building concept is applied in the European Union countries aiming to reduce both the buildings' energy consumption and greenhouse gas emissions. The objective of this dissertation is to perform a study to measure the impact of the application of zero energy building concepts in residential buildings located in cities of the Brazilian southeastern region, considering the climate conditions of the city of Taubaté (SP) as a reference. The study was performed through dynamic computational simulation using EnergyPlus software. For the accomplishment of the simulations a residential building base model was constructed using available statistical data in the literature about the characteristics of southeastern Brazilian residential buildings. Passive design strategies and energy efficiency measures were simulated to select those with the highest potential to reduce building energy consumption on an annual basis of operation. The simulations demonstrated that replacing glazing systems in the windows for models with low values of solar heat gain coefficient, painting the external walls with low absorptance paint on the solar spectrum and using natural ventilation are some of the best passive design strategies that leads to significantly electricity consumption reduction. Considering the energy efficiency measures, the simulations demonstrated that the replacement of ancient air conditioning equipments for new models of higher coefficient of performance and with inverter technology leads to significantly electricity consumption reduction. Combinations of passive design strategies and energy efficiency measures led to electricity consumption reduction ranging from 36.8 to 48.8%, to the simulations of models with one or two air conditioning equipments per apartment, respectively. Photovoltaic power generation simulations demonstrated that is possible to produce enough electricity to meet up to 59,2% of the remaining consumption after the applications of passive design strategies and energy efficiency measures, using only the roof area for the photovoltaic panels installation. Electricity consumption reductions allow to reduce the greenhouse gases emissions up to 17.6 tonnes per building in annual operating base, which represents a reduction of 73,8% when compared to the base model.

KEYWORDS: Buildings. Electricity. Consumption. Energy resources. Greenhouse gases.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura do consumo de energia nas edificações residenciais brasileiras	34
Figura 2 – Estrutura do consumo de eletricidade nas edificações residenciais brasileiras.....	35
Figura 3 – Etapas para atingir o padrão de edifício de energia zero	47
Figura 4 – Trajetória do sol ao longo do dia e estações no hemisfério sul.....	50
Figura 5 – Materiais de isolamento térmico mais empregados em edifícios de energia líquida quase zero na União Europeia	58
Figura 6 – Exemplo de declaração de dados de entrada para a descrição do edifício no <i>EnergyPlus</i>	72
Figura 7 – Valores de temperaturas médias do ar da cidade de Taubaté para um ano meteorológico típico	74
Figura 8 – Valores de temperaturas médias de bulbo úmido e ponto de orvalho para a cidade de Taubaté em um ano meteorológico típico	75
Figura 9 – Valores de umidade relativa média para a cidade de Taubaté em um ano meteorológico típico	75
Figura 10 – Valores da pressão atmosférica para a cidade de Taubaté em um ano meteorológico típico	76
Figura 11 – Número de horas para a qual o vento sopra em uma determinada direção em um ano meteorológico típico para a cidade de Taubaté	77
Figura 12 – Carta bioclimática para a cidade de Taubaté.....	78
Figura 13 – Condições de conforto térmico para a cidade de Taubaté.....	80
Figura 14 – Planta baixa utilizada como referência para a elaboração do pavimento tipo do modelo de base do edifício residencial para simulação.....	82
Figura 15 – Planta baixa do pavimento tipo do modelo de base de edifício residencial para simulação	83
Figura 16 – Composição do sistema de pisos para os pavimentos-tipo	88
Figura 17 – Simplificações na planta baixa para definição das zonas térmicas	92
Figura 18 – Partição percentual do consumo anual de energia para o modelo base a partir de estimativas de potências médias e tempos de utilização de aparelhos elétricos.....	99
Figura 19 – Curva de carga de equipamentos eletrodomésticos para a região sudeste	100

Figura 20 – Procedimento utilizado para a determinação aproximada das potências médias horárias para o sistema de iluminação	102
Figura 21 – Curva de carga do sistema de iluminação	106
Figura 22 – Curva de carga dos aparelhos eletrodomésticos.....	109
Figura 23 – Correlação entre os coeficientes de desempenho do ciclo de refrigeração e aquecimento para aparelhos de ar condicionado de ciclo reverso	112
Figura 24 – Modelo de base em 3D do edifício residencial gerado pelo <i>EnergyPlus</i> após a simulação.....	114
Figura 25 – Distribuição das zonas climatizadas no modelo de base de edifício residencial: (a) zonas pares; (b) zonas pares e zonas ímpares b.....	115
Figura 26 – Impacto da aplicação de camadas de EPS nas paredes da envoltória no consumo de energia elétrica com climatização das zonas pares	125
Figura 27 – Variação líquida do consumo anual de energia elétrica com a aplicação de camadas de EPS nas paredes da envoltória para a climatização das zonas pares.....	125
Figura 28 – Impacto da aplicação de camadas de EPS nas paredes da envoltória no consumo de energia elétrica com climatização das zonas pares e ímpares b	126
Figura 29 – Variação líquida do consumo anual de energia elétrica com a aplicação de camadas de EPS nas paredes da envoltória para a climatização das zonas pares e ímpares b	126
Figura 30 – Parâmetros e dimensões dos elementos de sombreamento de aberturas envidraçadas declaradas nas simulações: (a) <i>overhang</i> ; (b) <i>fin</i>	128
Figura 31 – Partições do consumo anual de energia elétrica após a aplicação de estratégias de projeto passivo e medidas de eficiência energética: (a) climatização das zonas pares; (b) climatização das zonas pares e ímpares b	142
Figura 32 – Variação da redução do consumo de energia elétrica em função da absorvância no espectro solar da pintura das paredes externas para o caso de climatização das zonas pares	143
Figura 33 – Modelo geométrico para a determinação do efeito de sombreamento entre painéis fotovoltaicos vizinhos para o hemisfério sul.....	147

Figura 34 – Disposição dos painéis fotovoltaicos modelo CS6-K 275P do fabricante Canadian Solar em circuitos nas regiões de telhado correspondentes às zonas térmicas apresentadas na Figura 17: (a) circuito de painéis fotovoltaicos nas zonas ímpares a; (b) circuito de painéis fotovoltaicos nas zonas pares; (c) circuito de painéis fotovoltaicos nas zonas ímpares b	148
Figura 35 – Instalação de painéis fotovoltaicos modelo CS6-K 275P do fabricante Canadian Solar nas áreas de telhado correspondentes a todas as zonas térmicas	151
Figura 36 – Instalação de painéis fotovoltaicos modelo CS6-K 275P do fabricante Canadian Solar em 70% da área do telhado	153
Figura 37 – Diagrama de geração versus consumo de energia para o caso de climatização de 17,2% da área total de piso e instalação de painéis fotovoltaicos, modelo CS6-K 275P do fabricante Canadian Solar, em 86% da área de telhado	160
Figura 38 – Diagrama de geração versus consumo de energia para o caso de climatização de 40,9% da área total de piso e instalação de painéis fotovoltaicos, modelo CS6-K 275P do fabricante Canadian Solar, em 86% da área de telhado	160
Figura 39 – Diagrama de geração versus consumo de energia para o caso de climatização de 17,2% da área total de piso e instalação de painéis fotovoltaicos, modelo SPR-E20327-COM do fabricante SunPower, em 86% da área de telhado	161
Figura 40 – Diagrama de geração versus consumo de energia para o caso de climatização de 40,9% da área total de piso e instalação de painéis fotovoltaicos, modelo SPR-E20327-COM do fabricante SunPower, em 86% da área de telhado	161

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fatores solares de referência para alguns tipos de envidraçados fabricados pela empresa AGC	56
Tabela 2 – Valores de transmitância térmica da envoltória de nZEB na União Europeia	58
Tabela 3 – Valores de transmitância térmica, fator solar e hermeticidade da envoltória empregados em NZEB na região da APEC	60
Tabela 4 – Estratégias de projeto passivo empregadas em NZEB na região da APEC	60
Tabela 5 – Estratégias de projeto ativo empregadas em NZEB na região da APEC	61
Tabela 6 – Dimensões comerciais das aberturas envidraçadas consideradas na planta baixa do pavimento tipo do modelo de base de edifício residencial	84
Tabela 7 – Propriedades físicas e térmicas das paredes do modelo de base de edifício residencial	85
Tabela 8 – Propriedades térmicas do vidro comum incolor de 4 mm	87
Tabela 9 – Propriedades térmicas e luminosas do vidro “Neutral 70 clear laminado com incolor” de 8 mm de espessura do fabricante GUADIAN	87
Tabela 10 – Propriedades físicas e térmicas dos materiais que compõem o sistema de pisos dos pavimentos-tipo.....	88
Tabela 11 – Densidades de potência de iluminação para os ambientes dos apartamentos	89
Tabela 12 – Cronogramas horários de utilização da potência total instalada para o sistema de iluminação.....	106
Tabela 13 – Cronogramas horários de utilização da potência total instalada para os aparelhos eletrodomésticos.....	108
Tabela 14 – Cronograma de ocupação dos apartamentos.....	110
Tabela 15 – Emissões de dióxido de carbono equivalente associadas à produção da energia elétrica disponibilizada no Sistema Interligado Nacional	163

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Resumo das características encontradas com maior frequência para edifícios residenciais da região sudeste brasileira	31
Quadro 2 – Características construtivas encontradas por Teixeira et al. (2015) para os edifícios residenciais brasileiros	32
Quadro 3 – Algumas definições de edificações de energia zero ou quase zero encontradas na literatura	39
Quadro 4 – Definições em termos de energia primária e participação de geração de energia renovável para novas edificações nos padrões de um nZEB	42
Quadro 5 – Estratégias de projeto passivo e ativo empregadas em edifícios de energia líquida zero na União Europeia	59
Quadro 6 – Redução simulada no consumo de energia anual das medidas aplicadas para um estudo de caso de um edifício histórico da cidade de Évora	63
Quadro 7 – Medidas e estratégias propostas por Duarte (2014) e respectiva redução no consumo de energia	65
Quadro 8 – Síntese da utilização de estratégias bioclimáticas para a cidade de Taubaté ao longo de um ano meteorológico típico	79
Quadro 9 – Áreas equivalentes de paredes internas que devem ser declarados como superfícies de armazenamento térmico para cada zona térmica apresentada na Figura 17.....	93
Quadro 10 – Determinação do consumo de energia elétrica de referência para validação da simulação do modelo de base do edifício residencial.....	95
Quadro 11 – Modelamento da partição do consumo de eletricidade do modelo de base de edifício residencial para os meses de verão.....	97
Quadro 12 – Modelamento da partição do consumo de eletricidade do modelo de base de edifício residencial para os meses de inverno	98
Quadro 13 – Valores aproximados das potências médias horárias para o sistema de iluminação no intervalo entre 19h00min e 24h00min.....	102
Quadro 14 – Ajuste da curva de carga média do sistema de iluminação	103
Quadro 15 – Cronograma das taxas metabólicas dos ocupantes	110

Quadro 16 – Principais variáveis consideradas no dimensionamento do sistema de ar condicionado e inseridas no <i>EnergyPlus</i>	113
Quadro 17 – Consumo de energia elétrica do modelo de base de edifício residencial para cada uma das possibilidades de climatização apresentadas na Figura 25	115
Quadro 18 – Consumos mensais médios de energia elétrica por apartamento em função da área climatizada	116
Quadro 19 – Partições do consumo de energia elétrica do modelo de base de edifício residencial após a calibração do modelo	116
Quadro 20 – Resultados da redução do consumo de energia elétrica para a substituição dos vidros das janelas por modelos com melhores propriedades térmicas considerando a climatização das zonas térmicas de números pares.....	119
Quadro 21 – Resultados da simulação da substituição dos vidros das janelas pelo modelo Cool-lite SKN 144 II do fabricante CEBRACE.....	121
Quadro 22 – Resultados da simulação da substituição dos vidros das portas das sacadas pelo modelo Fumê SNL 37 clear do fabricante GUARDIAN.....	122
Quadro 23 – Resultados da simulação da pintura das paredes externas com tinta branco neve, tipo acrílica, da marca Suvinil, cuja absorvância é de 10,2%	123
Quadro 24 – Resultados da simulação da aplicação de sombreamento externo nas aberturas envidraçadas por meio de <i>overhangs</i> e <i>fins</i>	129
Quadro 25 – Resumo de algumas variáveis definidas nos objetos do grupo “AirflowNetwork” para a simulação da ventilação natural.....	130
Quadro 26 – Resultados da simulação da utilização de ventilação natural	131
Quadro 27 – Resultados da simulação da combinação das estratégias de projeto passivo que conduziram à maior redução do consumo de energia elétrica	132
Quadro 28 – Modelos de iluminação LED empregados nas simulações	134
Quadro 29 – Resultados da simulação da substituição de iluminação fluorescente por iluminação LED.....	135
Quadro 30 – Resultados da simulação da substituição de equipamentos eletrodomésticos por modelos novos.....	136
Quadro 31 – Aparelho de ar condicionado tipo <i>split hi-wall</i> de ciclo reverso, compressor de rotação variável com o maior coeficiente de desempenho encontrado na literatura e disponível no mercado brasileiro.....	138

Quadro 32 – Resultados da simulação da substituição do sistema de ar condicionado pelo modelo apresentado no Quadro 31	139
Quadro 33 – Resultados da simulação da combinação de medidas de eficiência energética.....	140
Quadro 34 – Resultados da simulação da combinação de estratégias de projeto passivo e medidas de eficiência energética	141
Quadro 35 – Propriedades do painel fotovoltaico CS6-K 275P do fabricante Canadian Solar para a definição do modelo equivalente de um diodo	146
Quadro 36 – Potências e tensões máximas para cada associação de circuitos de painéis fotovoltaicos pertencentes ao telhado das zonas pares, ímpares a e ímpares b.....	149
Quadro 37 – Dados de inversores do fabricante Fronius.....	149
Quadro 38 – Comportamento da eficiência dos inversores para teste padrão com tensão de entrada de 270 V	150
Quadro 39 – Resultados da simulação da geração fotovoltaica após a aplicação das estratégias de projeto passivo e medidas de eficiência energética para o caso de instalação de painéis fotovoltaicos, modelo CS6-K 275P do fabricante Canadian Solar, em 86% da área do telhado	152
Quadro 40 – Resultados da simulação da geração fotovoltaica após a aplicação das estratégias de projeto passivo e medidas de eficiência energética para o caso de instalação de painéis fotovoltaicos, modelo CS6-K 275P do fabricante Canadian Solar, em 70% da área do telhado	154
Quadro 41 – Propriedades do painel fotovoltaico SPR-E20327-COM do fabricante SunPower para a definição do modelo equivalente de um diodo	155
Quadro 42 – Resultados da simulação da geração fotovoltaica após a aplicação das estratégias de projeto passivo e medidas de eficiência energética para o caso de instalação de painéis fotovoltaicos, modelo SPR-E20327-COM do fabricante SunPower, em 86% da área do telhado	156
Quadro 43 – Energia líquida local e geração de energia elétrica evitada para o caso de instalação de painéis fotovoltaicos, modelo CS6-K 275P do fabricante Canadian solar, em 86% da área do telhado	158

Quadro 44 – Energia líquida local e geração de energia elétrica evitada para o caso de instalação de painéis fotovoltaicos, modelo CS6-K 275P do fabricante Canadian solar, em 70% da área do telhado	158
Quadro 45 – Energia líquida local e geração de energia elétrica evitada para o caso de instalação de painéis fotovoltaicos, modelo SPR-E20327-COM do fabricante SunPower, em 86% da área do telhado	159
Quadro 46 – Emissões evitadas de dióxido de carbono equivalente com a aplicação das estratégias de projeto passivo, medidas de eficiência energética e geração fotovoltaica	164

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABEP	Associação Brasileira de Empresas de Pesquisa
ABIVIDRO	Associação Técnica Brasileira das Indústrias Automáticas de Vidro
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANFACER	Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimentos, Louças Sanitárias e Congêneres
APEC	<i>Asia-Pacific Economic Cooperation</i>
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers</i>
BLAST	<i>Building Loads Analysis and System Thermodynamics</i>
COP	<i>Coefficient of Performance</i>
DOE	<i>United States Department of Energy</i>
EPBD	<i>Energy Performance of Buildings Directive</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EPP	Estratégias de Projeto Passivo
EPA	Estratégia de Projeto Ativo
EPS	<i>Expanded Polystyrene</i>
HVAC	<i>Heating Ventilation and Air Conditioning</i>
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
MEE	Medidas de Eficiência Energética
NBR	Norma Brasileira Registrada
NIBS	<i>National Institute of Building Sciences</i>
NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i>
nZEB	<i>Nearly Zero Energy Building</i>
NZEB	<i>Net Zero Energy Building</i>
NZEH	<i>Net Zero Energy Housing</i>
PBE	Programa Brasileiro de Etiquetagem
PIB	Produto Interno Bruto
PNADC	Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua
RTQ-R	Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais
SIN	Sistema Interligado Nacional
TMY	<i>Typical Meteorological Year</i>
TRNSYS	<i>Transient System Simulation Tool</i>
UHs	Unidades Habitacionais
ZEB	<i>Zero Energy Building</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	OBJETIVOS	26
1.2	JUSTIFICATIVA DO TRABALHO.....	27
1.3	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	27
2	REVISÃO DA LITERATURA	29
2.1	CARACTERIZAÇÃO DO SETOR DE EDIFÍCIOS.....	29
2.1.1	Caracterização das edificações residenciais da região sudeste do Brasil	30
2.1.2	Estrutura do consumo de energia em edificações	32
2.1.3	Estrutura do consumo de energia em edificações brasileiras	34
2.1.4	Matriz de geração elétrica brasileira e perspectivas com a aplicação do conceito de edifícios de energia zero	36
2.2	DEFINIÇÕES DE EDIFÍCIOS DE ENERGIA ZERO	37
2.2.1	Definição de edifícios de energia zero encontradas na literatura	37
2.2.2	Definição de <i>nearly zero energy building</i> empregada na União Europeia	41
2.2.3	Definições de edifícios de energia zero em países pertencentes à Cooperação Econômica Ásia-Pacífico	42
2.2.4	Equacionamentos referentes às definições e abordagens de edifícios de energia líquida zero, energia líquida quase zero, emissões líquidas zero e custo líquido zero	44
2.2.5	Estratégias para se atingir o padrão de edifício de energia zero	45
3	ESPECIFICAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE PROJETO PASSIVO	49
3.1	DEFINIÇÃO GERAL DE ESTRATÉGIAS DE PROJETO PASSIVO	49
3.2	ORIENTAÇÃO DO EDIFÍCIO E SUA INFLUÊNCIA EM GANHOS SOLARES, ESTRATÉGIAS DE SOMBREAMENTO, AQUECIMENTO E REFRIGERAÇÃO.....	49
3.3	ILUMINAÇÃO NATURAL	51
3.4	ISOLAMENTO TÉRMICO DA ENVOLTÓRIA DO EDIFÍCIO.....	51
3.5	FENESTRAÇÕES ENVIDRAÇADAS	54
4	ANÁLISE DE APLICAÇÕES DO CONCEITO DE EDIFÍCIOS DE ENERGIA ZERO E PRÁTICAS EMPREGADAS	57
4.1	ESTRATÉGIAS EMPREGADAS EM nZEB NA UNIÃO EUROPEIA	57

4.2	ESTRATÉGIAS EMPREGADAS EM NZEB EM ALGUNS PAÍSES PERTENCENTES À APEC	59
4.2.1	Estratégias de projeto passivo empregadas em NZEB na região da APEC...	60
4.2.2	Estratégias de projeto ativo empregadas em NZEB na região da APEC.....	61
4.3	ANÁLISE DE APLICAÇÕES DO CONCEITO DE nZEB POR MEIO DE SIMULAÇÕES ENERGÉTICAS	61
4.3.1	Edifício histórico da cidade de Évora (Portugal).....	61
4.3.2	Edifício de serviços da cidade de Setúbal (Portugal).....	63
4.3.3	Estudos de caso da aplicação do conceito de nZEB em climas quentes.....	66
5	MATERIAL E MÉTODO	68
5.1	VISÃO GERAL DA CARACTERIZAÇÃO DA EDIFICAÇÃO E DO MODELO DE BASE.....	68
5.2	CARACTERÍSTICAS DO <i>ENERGYPLUS</i>	69
5.3	CARACTERIZAÇÃO CLIMÁTICA E ANÁLISE DAS CONDIÇÕES DE CONFORTO TÉRMICO PARA A CIDADE DE TAUBATÉ.....	73
5.3.1	Normais climatológicas para a cidade de Taubaté	73
5.3.2	Determinação da carta bioclimática para a cidade de Taubaté e análise das recomendações de estratégias bioclimáticas.....	78
5.3.3	Determinação das condições médias de conforto térmico para a cidade de Taubaté utilizando a carta bioclimática	80
5.4	DEFINIÇÃO DO MODELO DE BASE DE EDIFÍCIO RESIDENCIAL.....	81
5.4.1	Elaboração da planta baixa do pavimento tipo do modelo de base	81
5.4.2	Determinação de materiais e propriedades dos elementos que compõem a envoltória	84
5.4.2.1	Caracterização das paredes externas.....	84
5.4.2.2	Caracterização dos envidraçados.....	85
5.4.3	Determinação de materiais e propriedades das camadas que compõem o sistema de pisos dos pavimentos-tipo.....	87
5.4.4	Determinação da densidade de potência de iluminação adequada a cada ambiente interno dos apartamentos.....	89
5.4.5	Simplificações na planta baixa do pavimento tipo para fins de zoneamento térmico	89
5.4.6	Determinação do consumo de energia elétrica de referência para validação do modelo de base de edifício residencial e caracterização da família	94

5.4.7	Modelamento da partição do consumo de energia elétrica baseado nas potências e tempos médios de utilização diária dos aparelhos eletrodomésticos	96
5.4.8	Determinação de curvas de carga e cronogramas de utilização para a iluminação e aparelhos eletrodomésticos	100
5.4.8.1	Determinação das curvas de carga e cronogramas de utilização para o sistema de iluminação.....	101
5.4.8.2	Determinação das curvas de carga e cronogramas de utilização para os aparelhos eletrodomésticos.....	107
5.4.9	Modelamento do perfil de ocupação, cronograma de ocupação e cronograma de atividade metabólica dos ocupantes	109
5.4.10	Parâmetros declarados no <i>EnergyPlus</i> para o dimensionamento do sistema de ar condicionado	110
5.4.11	Simulação do modelo de base de edifício residencial, ajustes e validação do modelo	113
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	118
6.1	SIMULAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE PROJETO PASSIVO	118
6.1.1	Substituição de envidraçados das janelas e portas de sacadas por modelos com melhores propriedades térmicas	118
6.1.1.1	Substituição de vidros das janelas	120
6.1.1.2	Substituição de vidros das portas de sacadas.....	122
6.1.2	Pintura das paredes externas com tintas de baixo valor de absorvância no espectro solar	123
6.1.3	Aplicação de camadas de isolamento térmico nas paredes externas	124
6.1.4	Sombreamento das aberturas envidraçadas com <i>overhangs</i> e <i>fins</i> na fachada norte	128
6.1.5	Ventilação natural	129
6.1.6	Combinação das estratégias de projeto passivo	131
6.2	SIMULAÇÃO DE MEDIDAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	133
6.2.1	Substituição da iluminação com lâmpadas fluorescentes por lâmpadas LED	133
6.2.2	Substituição de aparelhos eletrodomésticos por modelos mais eficientes	135

6.2.3	Substituição dos aparelhos de ar condicionado pelo modelo mais eficiente disponível no mercado brasileiro de ciclo reverso e com a tecnologia <i>inverter</i>	137
6.2.4	Combinação das medidas de eficiência energética	139
6.3	SIMULAÇÃO DA COMBINAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE PROJETO PASSIVO E MEDIDAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	140
6.4	SIMULAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE PROJETO ATIVO	143
6.4.1	Simulação da produção de energia elétrica fotovoltaica local com o modelo de painel fotovoltaico CS6-K 275P do fabricante Canadian Solar	145
6.4.1.1	Instalação de painéis fotovoltaicos modelo CS6-K 275P do fabricante Canadian Solar em 86% da área de telhado.....	150
6.4.1.2	Instalação de painéis fotovoltaicos modelo CS6-K 275P do fabricante Canadian Solar em 70% da área de telhado.....	152
6.4.2	Simulação da produção de energia elétrica fotovoltaica local com o modelo SPR-E20327-COM do fabricante SunPower considerando a instalação de painéis fotovoltaicos em 86% da área do telhado	154
6.5	CLASSIFICAÇÃO DO EDIFÍCIO EM RELAÇÃO AO NÍVEL DE ATINGIMENTO DA ENERGIA LÍQUIDA ZERO LOCAL	156
6.6	DETERMINAÇÃO DAS EMISSÕES EVITADAS DE DIÓXIDO DE CARBONO EQUIVALENTE	163
7	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	165
	REFERÊNCIAS	169
	APÊNDICE A – Cálculo da área útil dos apartamentos do modelo de base de edifício residencial	180
	APÊNDICE B – Cálculo das dimensões das aberturas envidraçadas	181
	APÊNDICE C – Definição de propriedades dos materiais de isolamento térmico e equacionamentos para os elementos da envoltória	182
	APÊNDICE D – Cálculo das propriedades físicas e térmicas das paredes	184
	APÊNDICE E – Propriedades dos materiais de isolamento térmico empregados no setor de edifício	189
	APÊNDICE F – Determinação das propriedades térmicas e luminosas do vidro comum incolor de 4 mm de espessura	191
	APÊNDICE G – Caracterização de tipos de vidros e suas propriedades	194

APÊNDICE H – Valores de absorvância de pinturas empregadas em paredes externas	209
APÊNDICE I – Cálculo das áreas equivalentes de sistema de pisos e paredes internas que devem ser declaradas como massa interna no <i>EnergyPlus</i>	213
APÊNDICE J – Determinação da temperatura média do solo para um ano meteorológico típico da cidade de Taubaté	218
APÊNDICE K – Determinação da carta bioclimática para a cidade de Taubaté	221
APÊNDICE L – Determinação das densidades de potência de iluminação dos ambientes internos dos apartamentos	226
APÊNDICE M – Construção de um modelo de classe econômica para a família do modelo de base de edifício residencial	233
APÊNDICE N – Construção de um modelo de consumo residencial de eletricidade	237
APÊNDICE O – Construção de modelos de consumo de eletricidade de aparelhos eletrodomésticos	243
APÊNDICE P – Determinação da idade média e ganhos anuais de eficiência dos aparelhos eletrodomésticos de uma residência	253
APÊNDICE Q – Características de equipamentos de ar condicionado	256
APÊNDICE R – Estudo de otimização para a instalação de painéis fotovoltaicos no telhado do modelo de base de edifício residencial.....	261

1 INTRODUÇÃO

Estimativas da Agência Internacional de Energia (IEA, 2016a) preveem um crescimento populacional mundial dos atuais 7,3 bilhões de habitantes para 9,2 bilhões em 2040, um crescimento de 26%. Paralelamente ao crescimento populacional é previsto um crescimento médio do PIB global em torno de 3,4% ao ano. O crescimento populacional associado ao crescimento econômico provoca o aumento do consumo de energia, bens e serviços, com conseqüente aumento na geração de poluentes e emissão de gases de efeito estufa. Neste contexto, um dos maiores desafios da atualidade é desacoplar o crescimento do consumo de energia do aumento das emissões de gases de efeito estufa. Para vencer este desafio será necessário reduzir a intensidade das emissões nos diversos setores que compõem a sociedade, em especial no setor de energia.

Um dos setores que mais contribui para a emissão de gases de efeito estufa é constituído pelas edificações. Diversos autores apontam as edificações como sendo responsáveis pelo consumo de 30 a 40% da energia total consumida em nível global (IEA, 2013; WEI; SHICONG, 2017; PAVEL; BLAGOEVA, 2018; SILVA *et al.*, 2016; SCHIAVONI *et al.*, 2016; CUNHA, 2015; GEORGIU, 2015). Em 2014, as edificações foram responsáveis por praticamente metade do consumo mundial de energia elétrica. Esta alta participação no consumo de energia levou este setor a emitir 26,5% das emissões totais de gases de efeito estufa, em nível global, no ano de 2014 (IEA, 2016a). Segundo Wei e Shicong (2017), as edificações são responsáveis por, pelo menos, 24% das emissões mundiais de gases de efeito estufa.

Proporcionar o crescimento populacional e econômico, ao mesmo tempo em que se reduzem as emissões de gases de efeito estufa para a atmosfera é, sem dúvida, um dos maiores desafios da atualidade. Do início do século XVIII até o momento atual, a concentração de dióxido de carbono equivalente¹ (CO₂eq) na atmosfera cresceu de 280 para mais 400 ppm. Tal crescimento é um efeito colateral das atividades iniciadas a partir das revoluções industriais (TORGAL *et al.*, 2013).

¹ O dióxido de carbono equivalente (CO₂eq) é uma métrica que considera o potencial de aquecimento global de gases causadores do efeito estufa como, por exemplo, o próprio dióxido de carbono (CO₂), o gás metano (CH₄), o óxido nitroso (N₂O), o clorotrifluormetano (CClF₃), também conhecido como fluido refrigerante R-13, entre outros. O potencial de aquecimento global dos gases é mensurado pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) por meio da utilização de um indicador denominado GWP₁₀₀ (potencial de aquecimento global no horizonte de tempo de 100 anos), os valores do indicador GWP₁₀₀ determinado no quinto relatório do IPCC sobre mudanças climáticas (IPCC, 2014) para os gases referidos anteriormente são: CH₄ (GWP₁₀₀ = 28); N₂O (GWP₁₀₀ = 265) e CClF₃ (GWP₁₀₀ = 13900).

De acordo com Henderson *et al.* (2017), em 2016, a concentração de dióxido de carbono equivalente na atmosfera atingiu um valor próximo a 404 ppm, um crescimento de 7% em relação ao nível de 2007. O aumento acumulado de gases de efeito estufa na atmosfera (principalmente dióxido de carbono, gás metano e monóxido de dinitrogênio) no período entre 1880 e 2015 levou a um aumento da temperatura média global em torno de 0,9°C.

De acordo com Torgal *et al.* (2013) e Henderson *et al.* (2017), se nenhum esforço for realizado para mitigar os efeitos das mudanças climáticas e o atual nível de emissões for mantido nas próximas décadas, as concentrações de CO₂eq provavelmente aumentarão para valores próximos de 450 ppm por volta de 2030 e entre 750 e 1300 ppm por volta de 2100. Se isto ocorrer, a temperatura média global poderá aumentar na faixa de 3,7 a 7,8°C em relação ao nível pré-industrial.

No relatório de 2014, o IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) estimou que para preservar 50% de chance de limitar o aquecimento global em 2 °C, o planeta poderia suportar um máximo de emissões de dióxido de carbono equivalente na ordem de 3000 Gt, do qual uma quantidade estimada em 1970 Gt já havia sido emitida antes de 2014 (IEA, 2015). Desta forma, a quantidade de dióxido de carbono equivalente que ainda poderia ser liberada para a atmosfera em um cenário com 50% de chance de limitar o aquecimento global em 2 °C deveria ser, no máximo, de 1030 Gt.

Como o setor de edifícios é responsável por uma parcela de 24 a 26% das emissões totais de gases de efeito estufa, a Agência Internacional de Energia (IEA, 2013) estima que, para atingir o objetivo de limitar o aumento da temperatura média global em 2 °C, será necessária uma redução de, pelo menos, 77% das emissões totais de dióxido de carbono, em relação aos níveis atuais, associadas ao setor de edifícios até o ano de 2050.

A redução das emissões de gases de efeito estufa no setor de edifícios depende da redução no consumo de energia e, também, da geração de energia menos intensiva em carbono para este setor. Em um futuro próximo, os edifícios terão que ser projetados para requererem uma quantidade pequena de energia sem afetar, de modo significativo, a carga de ocupação e as condições de conforto térmico. A redução no consumo de energia poderá ser conseguida através da combinação de um conjunto de estratégias definidas na literatura como estratégias de projeto passivo (dentre as quais se pode destacar o melhoramento no isolamento térmico dos elementos que compõem a envoltória do edifício) e medidas de eficiência energética (dentre as quais se pode destacar a substituição de aparelhos e equipamentos elétricos por modelos mais eficientes). A redução da intensidade das emissões de dióxido de

carbono equivalente relacionadas à energia consumida poderá ser conseguida por meio da geração de energia local através de fontes renováveis (SCOGNAMIGLIO, 2014).

A redução do consumo de energia através de estratégias de projeto passivo (Capítulo 3) e medidas de eficiência energética associadas à possibilidade de geração de energia (eletricidade e/ou calor) renovável no local (ou nas proximidades) do edifício deu origem ao conceito de edifícios de energia zero (*Zero Energy Buildings*). O conceito de *Zero Energy Building* (ZEB) é atualmente flexível e não apresenta uma única definição. Uma definição específica está relacionada à disponibilidade de fontes renováveis, materiais construtivos e códigos de construção de cada localidade. Na União Europeia, a Diretiva de Desempenho Energético de Edifícios (EPBD 2010/31/EU) introduziu o conceito de *Nearly Zero Energy Buildings* (nZEB) e os definiu, qualitativamente, como edifícios de elevada eficiência energética nos quais as necessidades quase nulas de energia são atendidas pela geração local de energia renovável (SANTOS, 2017; CUNHA, 2015).

De acordo com Paoletti *et al.* (2017), na União Europeia a Diretiva de Desempenho Energético de Edifícios (EPBD 2010/31/EU) estabeleceu que todas as novas construções deverão atingir o padrão de *Nearly Zero Energy Building* (seção 2.2) a partir de 31 de dezembro de 2020.

Recentemente, alguns países economicamente desenvolvidos e pertencentes à Cooperação Econômica Ásia-Pacífico (APEC) definiram metas de atingimento do padrão *Nearly/Net Zero Energy Building* (seção 2.2) e lançaram programas de pesquisa e demonstrações de alguns projetos bem sucedidos (WEI; SHICONG, 2017).

Conclui-se a partir das discussões precedentes que um dos maiores desafios da atualidade é proporcionar condições para o desenvolvimento econômico e crescimento populacional sustentável das nações. Como visto anteriormente, a maior parcela do consumo de energia e emissões de gases de efeito estufa, em nível mundial, ocorre no setor de edifícios. Tendo em vista o crescimento populacional e a necessidade de crescimento econômico das nações, pode-se concluir que a única maneira de promover um crescimento sustentável é redimensionar o modo como a energia é gerada e consumida no setor de edifícios para alternativas menos intensivas em carbono. Reduzir a intensidade das emissões de dióxido de carbono equivalente na geração e no consumo de energia das edificações é imprescindível para desacoplar o crescimento deste setor das emissões de gases de efeito estufa.

Uma alternativa para viabilizar a sustentabilidade do setor de edifícios é a aplicação do conceito de edifícios de energia zero². Atualmente há uma crescente aplicação deste conceito em países desenvolvidos ao redor do mundo. O edifício de energia zero é considerado como uma possível solução para a redução do consumo de energia e emissões de gases de efeito estufa no setor de edifícios, além de ser considerado como uma solução de segurança energética através da geração distribuída de energia renovável.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é selecionar por meio de simulação dinâmica computacional, empregando o *software EnergyPlus*, conjuntos de estratégias para a redução do consumo de energia e emissões de gases de efeito estufa de um edifício residencial localizado na cidade de Taubaté (região sudeste do Brasil), visando que este atinja o padrão de edifício de energia zero.

O estudo consiste na seleção de estratégias de projeto passivo³, medidas de eficiência energética⁴ e estratégias de projeto ativo⁵, considerando a viabilidade técnica e tecnológica, tendo como objetivo selecionar a melhor combinação de estratégias que possam transformar uma edificação residencial convencional da cidade de Taubaté em um edifício de energia zero e determinar a redução do consumo de energia elétrica e emissões de gases de efeito estufa proporcionada pela aplicação das estratégias referidas anteriormente.

No que diz respeito aos aspectos ambientais este estudo considera apenas a mitigação do impacto ambiental proporcionada pela redução das emissões de gases de efeito estufa (determinada por meio da redução das emissões de dióxido de carbono equivalente) durante o

² De acordo com DOE (2015), um edifício de energia zero (ZEB) é um edifício energeticamente eficiente no qual, em uma base de fonte de energia, a energia requerida anualmente é menor que, ou igual, à energia renovável produzida no local. O DOE define o termo “fonte de energia” como sendo a energia local adicionada à energia consumida na extração, processamento e transporte dos combustíveis primários utilizados na geração da energia, tais como carvão, petróleo e gás natural. Consideram-se também as perdas de energia que ocorrem em plantas de geração, na transmissão e distribuição da energia para o local do edifício.

³ Estratégias de projeto passivo são definidas como estratégias que visam à redução do consumo de energia dos edifícios por meio do controle dos fluxos de energia pelas superfícies que separam os ambientes internos do meio externo. Como exemplo de estratégias de projeto passivo pode-se citar a aplicação de camadas de isolamento térmico em paredes, a substituição de envidraçados em janelas por modelos de controle solar e a pintura de paredes externas com tintas de reduzida absorvância no espectro solar (AKSAMIJA, 2016).

⁴ Medidas de eficiência energética são medidas que visam reduzir o consumo de energia por meio da substituição de equipamentos elétricos antigos por modelos de maior eficiência, além do controle do regime de operação dos equipamentos para atender às necessidades reais dos usuários. Como exemplo de medidas de eficiência energética pode-se destacar a substituição de lâmpadas fluorescentes por lâmpadas LED e utilização de sensores de presença para controlar o regime de operação da iluminação (AKSAMIJA, 2016).

⁵ Estratégias de projeto ativo são estratégias que visam à geração de energia renovável no local ou nas proximidades do edifício. Como exemplo, pode-se citar a geração de energia elétrica por meio da implantação de placas fotovoltaicas no telhado do edifício (AKSAMIJA, 2016).

ciclo anual de operação do modelo de base de edifício residencial. Deste modo, não é objetivo deste trabalho avaliar as emissões de gases de efeito estufa em outras fases do ciclo de vida do edifício como, por exemplo, as fases de construção, demolição e descarte de materiais. Também não serão consideradas as emissões de gases de efeito estufa relacionadas aos processos de fabricação, transporte e instalação das estratégias de projeto passivo, medidas de eficiência energética e estratégias de projeto ativo propostas neste trabalho, em outras palavras, não é objetivo deste trabalho realizar uma análise completa do ciclo de vida dos materiais construtivos e estratégias propostas, sendo analisados apenas os consumos de energia e emissões de gases de efeito estufa ocorridas durante a fase operacional (em base anual) do edifício.

1.2 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

A realização deste trabalho se justifica pela urgência da aplicação de estratégias de redução do consumo de energia e emissões de gases de efeito estufa nas edificações, uma vez que, conforme discutido na introdução e segundo a maior parte dos autores estudados para a realização deste trabalho, os edifícios são responsáveis pela emissão de um quarto a um terço do total dos gases de efeito estufa emitidos globalmente e será necessária a redução de, pelo menos, 77% dessas emissões até o ano de 2050 para preservar uma probabilidade de 50% de chance de elevação da temperatura global em, no máximo, 2 °C até o ano de 2100 (IEA, 2013).

Este trabalho, também, se justifica pela escassez de estudos relacionados ao impacto da aplicação do conceito de edifício de energia zero na redução do consumo de energia e emissões de gases de efeito estufa em regiões de clima quente, especialmente para o Brasil.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Em relação aos capítulos que se seguem, tem-se a seguinte distribuição de temas:

- Capítulos 2, 3 e 4: Nestes capítulos é realizada a revisão da literatura considerando as características das edificações residenciais brasileiras, a estrutura do consumo de energia das edificações, a definição dos conceitos de edifício de energia zero e edifício de energia quase nula empregadas em países economicamente desenvolvidos e as definições gerais de estratégias de projeto passivo, medidas de eficiência energética e

estratégias de projeto ativo. É, também, realizado um estudo de algumas estratégias de projeto passivo que são aplicadas em edifícios de energia zero como, por exemplo, orientação do edifício, iluminação natural, isolamento térmico das paredes externas e substituição de vidros das aberturas envidraçadas. Por fim, é realizado um estudo das estratégias de projeto passivo, medidas de eficiência energética e estratégias de projeto ativo que são empregadas em edifícios pertencentes aos estados-membros da União Europeia e também aos países pertencentes à cooperação economia Ásia – Pacífico;

- Capítulo 5: Compreende a descrição dos materiais e métodos utilizados na definição dos parâmetros para a construção do modelo de base de edifício residencial da região sudeste do Brasil e descrição do procedimento adotado na calibração do modelo considerando o consumo mensal de energia elétrica. Neste capítulo é, também, realizada a caracterização climática da cidade de Taubaté (cidade da região sudeste do Brasil escolhida para a caracterização climática necessária nas simulações) e determinação das condições de conforto térmico com a utilização da carta bioclimática de Givoni;
- Capítulo 6: Neste capítulo são apresentados os resultados, considerando a redução do consumo de energia elétrica, e respectivas discussões para as simulações da aplicação de estratégias de projeto passivo, medidas de eficiência energética e estratégias de projeto ativo após a calibração do modelo de base de edifício residencial realizada no Capítulo 5;
- Capítulo 7: Neste capítulo é realizada a conclusão do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo será realizada uma caracterização geral das edificações em relação ao consumo e partição do consumo de energia. Serão também discutidas algumas características de edifícios habitacionais encontrados na região sudeste do Brasil. Em seguida, serão discutidas algumas das definições do conceito de edifício de energia zero atualmente empregadas em países europeus e, também, pertencentes à Cooperação Econômica Ásia-Pacífico (APEC). Na sequência, será feito um levantamento de algumas estratégias de projeto passivo, medidas de eficiência energética e estratégias de projeto ativo que podem ser empregadas em um edifício para se atingir o status de *Nearly Zero Energy Building* (nZEB) ou *Net Zero Energy Building* (NZEB).

2.1 CARACTERIZAÇÃO DO SETOR DE EDIFÍCIOS

Segundo Cunha (2015), estima-se que o total de edificações europeias representem 25 bilhões de metros quadrados de área útil (área equivalente à região total da Bélgica) e que cresça a uma taxa média de 1% ao ano. Esta área está distribuída em 75% de edifícios residenciais e 25% de edifícios não residenciais. Uma porcentagem considerável conta com edifícios de mais de 50 anos. Mais de 40% do setor residencial foi construído antes de 1960, período no qual regulamentações relativas ao desempenho energético dos edifícios não existiam ou eram bastante limitadas. Os edifícios residenciais consomem a maior parte da energia destinada às edificações, sendo responsáveis por 66% do consumo, enquanto que os edifícios não residenciais são responsáveis por 34% do consumo de energia do setor de edificações. A participação mais elevada dos edifícios residenciais é justificada pela alta taxa de edificações antigas com baixo desempenho energético.

Pavel e Blagoeva (2018) também apontam que, aproximadamente, a metade dos edifícios na União Europeia são anteriores a 1960. Os autores destacam que com a atual taxa de renovação (1% ao ano) seriam necessários em torno de 100 anos para a renovação do total de edifícios. Assim, no presente momento, os edifícios existentes representam um maior potencial de contribuição para a redução do consumo de energia do que os novos edifícios construídos anualmente. Os autores destacam que se estima que a aplicação de medidas profundas de renovação no setor de edificações poderia reduzir o consumo de energia deste setor em torno de 36% até o ano de 2030 em relação aos níveis atuais.

Das discussões precedentes e, também, segundo Schiavoni *et al.* (2016), pode-se concluir que o potencial de eficiência energética não aproveitado dos edifícios é enorme, de modo que a adoção em larga escala de medidas de economia de energia neste setor podem representar uma solução para uma redução significativa nas emissões de gases de efeito estufa. Segundo Georgiou (2015), é esperado que maior ênfase seja dada para edificações existentes, uma vez que novas edificações representam de 1 a 2% do total de edifícios residenciais, sendo que a maior parte dos edifícios habitacionais foi construída antes da implantação da diretiva de desempenho energético de edifícios.

Considerando que os edifícios são responsáveis por, pelo menos, um terço das emissões de gases de efeito estufa em nível mundial, as ações de renovação neste setor são imprescindíveis para se atingir as metas de redução de emissões estipuladas pelos países. Por exemplo, segundo Borlin (2013) e Georgiou (2015), a União Europeia estabeleceu metas de redução de 20% nas emissões de gases de efeito estufa até o ano de 2020 em relação aos níveis de 1990. Adicionalmente, até 2050, a União Europeia se comprometeu a reduzir as emissões de gases de efeito estufa na faixa de 80 a 95% abaixo dos níveis de 1990. Tais níveis de redução nas emissões de gases de efeito estufa não poderão ser atingidos sem uma grande renovação dos edifícios visando à eficiência energética e a geração de energia renovável.

2.1.1 Caracterização das edificações residenciais da região sudeste do Brasil

Teixeira *et al.* (2015) estudaram as características construtivas de edifícios residenciais e suas respectivas unidades habitacionais (apartamentos) ao longo do território brasileiro. O levantamento de dados foi realizado por meio do estudo de plantas baixas (um total de 346 plantas) e memoriais descritivos de 167 empreendimentos localizados em 48 cidades brasileiras situadas em 22 estados da federação mais o distrito federal. Nesta seção, serão apresentados alguns resultados obtidos por Teixeira *et al.* (2015) para a região sudeste do Brasil.

Dentre as características levantadas por Teixeira *et al.* (2015) para as edificações residenciais brasileiras podem-se destacar:

- Quantidade de pavimentos-tipo (pavimentos que se repetem ao longo da estrutura do edifício);
- Formato da edificação;
- Área útil das unidades habitacionais;

- Existência de ventilação cruzada;
- Número de dormitórios;
- Número de suítes;
- Número de banheiros;
- Área útil dos ambientes internos das unidades habitacionais;
- Comprimento de aberturas nos ambientes das unidades habitacionais;
- Soluções construtivas empregadas no acabamento externo das edificações.

O Quadro 1 apresenta um resumo das principais características, em termos de geometria e número de ambientes das unidades habitacionais, encontradas por Teixeira *et al.* (2015) para edifícios da região sudeste do Brasil.

Quadro 1: Resumo das características encontradas com maior frequência para edifícios residenciais da região sudeste brasileira

Variável	Característica	Frequência	Tipologia
Número de Pavimentos-tipo	11 – 15	31,6%	Edifícios
Formato do edifício	Retangular	84,0%	Edifícios
Área útil da unidade habitacional	55 -110 m ²	75,4%	UHs
Número de dormitórios	2 ou 3	74,9%	UHs
Número de suítes	1	70,0%	UHs
Número de banheiros	2	72,0%	UHs
Área dos dormitórios	8 - 18 m ²	70,0%	UHs
Área da cozinha	6 - 12 m ²	84,0%	UHs
Área da sala de estar-jantar	11,5 - 72 m ²	100%	UHs
Comprimento das janelas dos quartos	1,2 - 2,0 m	89,0%	UHs
Comprimento das janelas da sala	1,8 -2,8 m	57,0%	UHs

Nota: UHs – Unidades Habitacionais

Fonte: Adaptado de Teixeira *et al.* (2015).

Em relação às soluções construtivas empregadas nos elementos que compõem a envoltória⁶ dos edifícios não foi realizado um levantamento quantitativo por intervalos de frequência. Teixeira *et al.* (2015) apenas destacaram os tipos de soluções construtivas empregadas na maior parte dos empreendimentos analisados na pesquisa, os resultados encontrados são apresentados no Quadro 2.

⁶ Segundo Anderson (2016), define-se a envoltória do edifício como a barreira física que separa os ambientes internos do espaço exterior. Ela controla os fatores físicos tais como temperatura, umidade e iluminação por meio do controle dos fluxos de energia e umidade. Uma envoltória de alto desempenho é importante para o conforto térmico dos ocupantes e para economias de energia do edifício.

Quadro 2: Características construtivas encontradas por Teixeira *et al.* (2015) para os edifícios residenciais brasileiros

Elemento da envoltória	Solução construtiva
Paredes externas	Bloco de cerâmica 8 furos 9 cm x 19 cm x 19 cm ou bloco de concreto 19 cm x 19 cm x 39 cm
Envidraçados	Vidro comum incolor de 4 mm de espessura

Fonte: Adaptado de Teixeira *et al.* (2015).

Nos Quadros 1 e 2 foram apresentadas apenas as características encontradas por Teixeira *et al.* (2015) que são relevantes para a elaboração do modelo de base de edifício residencial para a realização de simulações energéticas com o *EnergyPlus*.

A norma brasileira NBR 12721 (ABNT, 2005), também, apresenta algumas definições para residências unifamiliares e prédios populares de padrão normal quanto ao tipo e número de ambientes internos e área total. Os conceitos destacados na norma que serão úteis para a realização deste trabalho são apresentados a seguir:

- **Residência unifamiliar de padrão normal:** composta por três dormitórios (sendo um suíte), banheiro social, sala, circulação, cozinha, área de serviço com banheiro, varanda e área real⁷ igual a 106,44 m²;
- **Prédio popular de padrão normal:** pavimento tipo composto por hall de circulação, escada, elevadores e quatro apartamentos. Cada apartamento é composto por três dormitórios (sendo um suíte), sala de estar, banheiro social, cozinha, área de serviço com banheiro e varanda, possuindo área real em torno de 1415,07 m².

2.1.2 Estrutura do consumo de energia em edificações

De acordo com Pavel e Blagoeva (2018), Silva *et al.* (2016), Cunha (2015), Schiavoni *et al.* (2016) e Georgiou (2015), na União Europeia os edifícios são responsáveis por aproximadamente 40% do consumo total de energia e emitem de 32 a 36% do total das emissões de dióxido de carbono. Os edifícios residenciais representam, isoladamente, de 22 a 25% do consumo total de energia, sendo, portanto, uma área estratégica para a aplicação de políticas visando o aumento da eficiência energética, redução do consumo de energia e redução de emissões.

⁷ De acordo com a norma NBR 12721 (ABNT, 2005), a área real é definida como a medida das superfícies de quaisquer dependências, ou conjunto de dependências, cobertas ou descobertas, nela incluídas as superfícies de projeções de paredes, de pilares e demais elementos construtivos.

A maior parte do consumo de energia de um edifício pode ser atribuída à sua fase de operação. O consumo de energia em um edifício é influenciado por diversos fatores, como a eficiência de sistemas de ventilação, climatização de ambientes, iluminação e aparelhos, isolamento térmico de janelas e portas, perdas por meio de pontes térmicas⁸ e desempenho térmico de superfícies opacas (SCHIAVONI *et al.*, 2016).

Segundo Georgiou (2015), 68% da energia consumida nas edificações residenciais da União Europeia é destinada ao condicionamento de ambientes, 15% é devida à iluminação e utilização de aparelhos eletrodomésticos, 12% é destinada ao aquecimento de água e 5% é destinada ao cozimento. Anderson (2016) destaca que em países desenvolvidos os sistemas de ventilação e condicionamento de ar são responsáveis por, pelo menos, metade do consumo de energia dos edifícios. O autor destaca ser possível, por meio de estratégias de projeto passivo (Capítulo 3) apropriadas para a envoltória, reduzir a demanda por cargas de aquecimento e resfriamento, sendo possível, dependendo da zona climática, até mesmo eliminar a necessidade da utilização de equipamentos de ventilação e condicionamento de ar.

O condicionamento de ambientes é responsável por um consumo de energia na faixa de 20 a 25 % da energia total consumida em nível nacional em países desenvolvidos (ANDERSON, 2016; GEORGIU, 2015; DUIJVE, 2012). Desta forma, o condicionamento de ambientes representa a maior parcela do consumo de energia em um edifício, principalmente em regiões nas quais o ambiente externo apresenta condições extremas.

De acordo com Duijve (2012), devido à grande participação do condicionamento de ambientes no consumo de energia de um edifício, uma das principais estratégias para a redução do consumo de energia em países de clima frio é melhorar o isolamento térmico da envoltória.

Segundo Anderson (2016), até 30% do consumo de energia de um edifício pode ser atribuído à utilização de iluminação artificial. Uma consideração importante com respeito à iluminação artificial é que esta influencia a carga térmica do edifício; desta forma, reduzir a sua utilização colabora para a redução da demanda por energia de arrefecimento do edifício no verão.

⁸ De acordo com Afonso (2012), ponte térmica é definida como o conjunto de fenômenos localizados de transferência de calor pela envoltória de um edifício que acarretam redução do isolamento térmico, ou seja, são regiões nas quais a resistência térmica não é uniforme. As causas principais da ocorrência de pontes térmicas são as alterações das propriedades térmicas dos materiais e geometrias de elementos construtivos comuns nas ligações entre os vários elementos da envoltória como, por exemplo, a ligação entre as paredes externas e as caixilharias das aberturas envidraçadas.

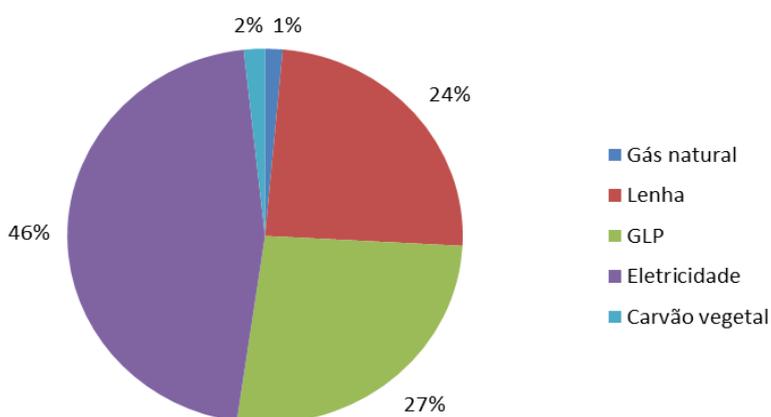
Pode-se concluir, a partir das discussões realizadas nesta seção, que as edificações são responsáveis por uma parcela bastante significativa do consumo de energia em nível mundial, sendo, também, responsáveis por até um terço das emissões de gases de efeito estufa. Grande parte da energia consumida nos edifícios é destinada ao condicionamento de ambientes. Desta forma, as estratégias de projeto passivo (Capítulo 3) que visam reduzir os fluxos de calor pelos elementos que compõem a envoltória podem gerar economias significativas de energia.

2.1.3 Estrutura do consumo de energia em edificações brasileiras

No Brasil, segundo Eletrobras (2016), as edificações residenciais são responsáveis por 27,8% do consumo faturado de energia elétrica. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2017), em 2016 as edificações residenciais foram responsáveis por 29% do consumo de energia elétrica. O Programa Nacional de Eficiência Energética em Edificações (PROCEL, 2019a) estima em 30 e 50%, respectivamente, o potencial de redução do consumo de energia nas edificações antigas e novas. Desta forma, as oportunidades de economia de energia em edificações residenciais são grandes, pois grande parte das residências brasileiras não foi projetada considerando as estratégias de eficiência energética.

O conhecimento dos diversos tipos de fontes de energia empregadas no setor residencial brasileiro é uma etapa importante para o planejamento de fontes alternativas de geração de energia menos intensivas em emissões de gases de efeito estufa. A Figura 1 apresenta a estrutura do consumo de energia, por fontes, nas edificações residenciais brasileiras. Como pode ser observado na Figura 1, a eletricidade representa praticamente a metade da energia total consumida.

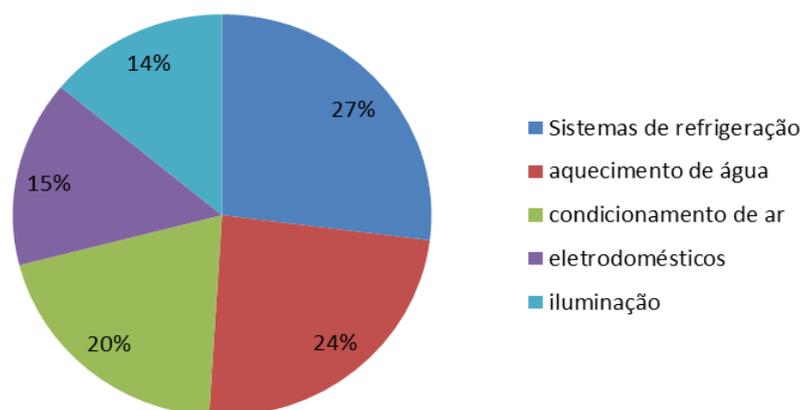
Figura 1: Estrutura do consumo de energia nas edificações residenciais brasileiras



Fonte: Adaptado a partir de dados da EPE (2017).

Quanto à estrutura do consumo da energia elétrica no setor residencial, se observa que as maiores parcelas são destinadas aos sistemas de refrigeração, aquecimento de água e condicionamento de ambientes, conforme pode ser observado na Figura 2.

Figura 2: Estrutura do consumo de eletricidade nas edificações residenciais brasileiras



Fonte: Adaptado a partir de dados de Eletrobras (2016).

Para as edificações pertencentes ao setor comercial e de serviços, a maior parcela da energia final consumida ocorre na forma de eletricidade. Dados da EPE (2017) demonstram que em 2016 a eletricidade correspondeu a, respectivamente, 91,3 e 92,4% do consumo de energia nos setores comercial e de serviços. A maior parcela do consumo de eletricidade nesses dois setores é devida à utilização de sistemas de condicionamento de ar (47% do consumo), seguida pela utilização de equipamentos (31% do consumo) e sistemas de iluminação (22% do consumo).

A partir das discussões realizadas nesta seção, conclui-se que a eletricidade representa a maior parcela do consumo de energia nas edificações brasileiras, sendo responsável por praticamente metade da energia consumida no setor residencial (Figura 1) e representando mais de 90% da energia consumida no setor comercial e de serviços. No setor residencial, os sistemas de refrigeração, aquecimento de água e condicionamento de ambiente (Figura 2) são os maiores consumidores de energia elétrica. No setor comercial e de serviços, o consumo dominante de eletricidade ocorre para os sistemas de condicionamento de ambientes, os quais são responsáveis por praticamente metade do consumo. Medidas de eficiência energética devem ser aplicadas principalmente nos sistemas, instalações e equipamentos que possuem as maiores parcelas de consumo de energia.

Reduzir o consumo de eletricidade nas edificações é um passo fundamental para a redução de emissões de gases de efeito estufa, uma vez que existe um fator de emissão desses gases associado à geração de energia elétrica, o qual depende das fontes empregadas na geração, sendo tanto maior quanto maior for a participação de fontes não renováveis na geração de energia elétrica.

2.1.4 Matriz de geração elétrica brasileira e perspectivas com a aplicação do conceito de edifícios de energia zero

Segundo dados da Aneel (2017), no Brasil a geração elétrica ocorre principalmente a partir de usinas hidrelétricas (60,9% da potência instalada) e usinas termelétricas (26,7% da potência instalada). Outras fontes renováveis, além da hidrelétrica, como energia eólica e solar, participam, respectivamente, com 7,3% e 0,15% da potência total instalada de geração de eletricidade.

A baixa utilização da energia solar chama a atenção quando se considera o grande potencial de geração ao longo do território nacional. Segundo Nascimento (2017), a irradiação solar apresenta uma boa uniformidade no Brasil, com médias relativamente altas em todo o território nacional. Os valores médios anuais de irradiação solar global incidente em qualquer região do território brasileiro estão na faixa de 3,50 a 6,50 kWh/m²/dia (Pereira *et al.*, 2006); sendo superiores aos níveis de irradiação observado em países europeus que empregam largamente a energia solar como, por exemplo, Alemanha (0,90 a 1,25 kWh/m²/dia) e Espanha (1,20 a 1,85 kWh/m²/dia) (NASCIMENTO, 2017).

Nascimento (2017) estima que o potencial total brasileiro de geração fotovoltaica seja em torno de 2,3 vezes maior que o consumo residencial de eletricidade do país. Desta forma, a aplicação do conceito de edifícios de energia zero em cidades brasileiras representa uma grande oportunidade para a ampliação da geração distribuída e crescimento da geração solar fotovoltaica, colaborando para a manutenção de uma matriz de geração de energia elétrica com alta participação de fontes renováveis de energia e baixa emissão de gases de efeito estufa.

2.2 DEFINIÇÕES DE EDIFÍCIOS DE ENERGIA ZERO

Para mitigar o impacto das mudanças climáticas sobre o ambiente construído é necessário desenvolver uma nova filosofia de projeto para os edifícios, a qual permita manter os níveis de conforto interno em um cenário de mudanças climáticas, e reduzir o impacto ambiental e a intensidade de emissões de gases de efeito estufa. A proliferação de edifícios com baixa intensidade de consumo de energia, os quais atendam suas necessidades de energia por meio de fontes renováveis, tem grande potencial para diminuir os efeitos das mudanças climáticas e fornecer muitos benefícios para o meio ambiente e para a saúde pública (ANDERSON, 2016).

2.2.1 Definição de edifícios de energia zero encontradas na literatura

Atualmente não há uma única definição do conceito de edifício de energia zero utilizada em escala global. Pacheco e Lamberts (2013) realizaram um levantamento de algumas definições de edifícios de energia zero encontradas na literatura e concluíram que as diferentes definições se originam de diferentes entendimentos sobre energia, geração de energia renovável, consumo de energia do edifício e fronteiras do sistema (há definições que incluem a energia associada à construção do edifício, outras que sugerem a inclusão da energia de transporte utilizada pelos usuários do edifício). Porém, segundo os autores, a ideia básica é que um edifício de energia zero é um edifício que possui seu próprio sistema de geração de energia a partir de fontes renováveis, sendo a energia gerada suficiente para cobrir as necessidades anuais de consumo de energia do edifício.

Barbolini *et al.* (2017) destacaram que nos últimos anos muitas definições de edifícios de energia zero foram criadas e dependem de como e onde a energia renovável é produzida, e que, independentemente das definições, o caminho para se atingir o padrão de edifício de energia zero envolve basicamente dois passos: (1) redução do consumo de energia por meio da aplicação de medidas de eficiência energética e estratégias de projeto passivo, (2) geração de energia a partir de fontes renováveis.

Segundo AlAjmi *et al.* (2015), a Agência Internacional de Energia (IEA) está discutindo as várias definições de edifícios de energia zero em busca de uma padronização. Os autores destacam que uma definição possível é dizer que um edifício de energia zero é aquele com elevado desempenho energético e que a pequena quantidade de energia requerida deve ser gerada a partir de fontes renováveis disponíveis no local.

Williams *et al.* (2016) realizaram um estudo de revisão sobre as definições e padrões de edifícios de energia ou emissões nulas ou quase nulas em circulação na literatura mundial concluindo que há um total de mais de setenta definições. Os autores destacaram que apesar desta grande quantidade de definições há, na prática, poucos edifícios de energia ou emissões nulas e que o estabelecimento de uma definição única que possa ser aplicada em escala global é urgente, dado a necessidade de reduzir em 80% as emissões de gases de efeito estufa para limitar o aumento da temperatura global na faixa de 2 a 4 °C conforme indicado no relatório de 2014 do IPCC sobre mudanças climáticas.

De acordo com Williams *et al.* (2016), os detalhes sobre quais critérios um edifício deve atender para ser classificado como um edifício de energia ou emissão zero ainda é debatido. A literatura possui muitos exemplos de definições de edifícios de energia ou emissões nulas, o Quadro 3 apresenta um resumo de algumas definições destacadas por Williams *et al.* (2016), de modo que definir o que exatamente os termos empregados em cada definição significam na prática é, frequentemente, visto como uma tarefa complexa e desafiadora. Adicionalmente às definições de edifícios de energia ou emissões nulas há pelo menos trinta e cinco padrões de edifícios de energia ou emissões quase nulas em utilização ao redor do mundo. Estas definições diferem tanto nas suas ideologias quanto nas suas metodologias e utilizam uma grande variedade de métricas de verificação. Os autores destacam que é preciso estabelecer uma definição única de aplicação em escala global para a efetiva adoção dos edifícios de energia ou emissões zero.

Duas abordagens bastante comuns na literatura para os edifícios de energia zero são: edifício de energia líquida zero (*Net zero energy building* – NZEB) e edifício de energia (líquida) quase zero (*Nearly zero energy building* – nZEB). De um ponto de vista técnico, o *status* de *net/nearly zero energy building* é uma medida do desempenho energético do edifício, significando que o edifício produz a mesma quantidade (ou quase a mesma quantidade) de energia, a partir de fontes renováveis, que ele consome em base anual de operação. No momento não há uma definição de NZEB ou nZEB aplicável em escala global (WEI; SHICONG, 2017).

Quadro 3: Algumas definições de edificações de energia zero ou quase zero encontradas na literatura

Esbensen e Korsgaard (1977 apud Williams <i>et al.</i> , 2016) ⁹	Uma habitação de energia zero (ZEH) é aquela que pode ser classificada como autossuficiente em aquecimento de espaço e fornecimento de água quente durante condições climáticas normais na Dinamarca
Torcellini <i>et al.</i> (2006 apud Williams <i>et al.</i> , 2016) ¹⁰	Um edifício de energia zero (ZEB) é um edifício residencial ou comercial com necessidades de consumo de energia consideravelmente reduzidas por meio de ganhos de eficiência energética de tal forma que o consumo anual de energia possa ser coberto com a geração de energia renovável local
Green Building Advisor (2010 apud Williams <i>et al.</i> , 2016) ¹¹	Um edifício de energia líquida zero (NZEB) é aquele que produz em base anual de operação uma quantidade de energia renovável, por meio de geração fotovoltaica ou micro turbinas eólicas, igual ao consumo de energia local
European Parliament . (2010 apud Williams <i>et al.</i> , 2016) ¹²	Em um edifício de energia líquida quase zero (nZEB) a quantidade quase nula ou muito baixa de energia consumida anualmente deve ser coberta de maneira bastante significativa pela energia proveniente de fontes renováveis, produzidas no local ou nas proximidades
Lund <i>et al.</i> (2011 apud Williams <i>et al.</i> , 2016) ¹³	Um ZEB combina estratégias de projeto e sistemas altamente eficientes, para minimizar o consumo de energia de aquecimento e eletricidade, com a geração local de energia renovável, tipicamente incluindo a produção de água quente e eletricidade por meio de energia solar

Fonte: Williams *et al.* (2016).

⁹ ESBENSEN, T.V.; KORSGAARD, V. Dimensioning of the solar heating system in the zero energy house in Denmark, **Solar Energy**, v. 19, p. 195-199, 1977 apud WILLIAMS, J. *et al.* Less is more: a review of low energy standards and the urgent need for an international universal zero energy standard. **Building Engineering**, v. 6, p. 65-74, 2016.

¹⁰ TORCELLINI, P. *et al.* Zero energy buildings: a critical look at the definition. Denver: **National Renewable Energy Laboratory - NREL**, 2006 apud WILLIAMS, J. *et al.* Less is more: a review of low energy standards and the urgent need for an international universal zero energy standard. **Building Engineering**, v. 6, p. 65-74, 2016.

¹¹ GREEN BUILDING ADVISOR. The GBA Glossary. GreenBuilding Advisor. Disponível em: <http://www.greenbuildingadvisor.com/glossary>, 2010 apud WILLIAMS, J. *et al.* Less is more: A review of low energy standards and the urgent need for an international universal zero energy standard. **Building Engineering**, v. 6, p. 65-74, 2016.

¹² EUROPEAN PARLIAMENT. Council of the European Union, Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings, The European Parliament, Estrasburgo, 2010 apud WILLIAMS, J. *et al.* Less is more: a review of low energy standards and the urgent need for an international universal zero energy standard. **Building Engineering**, v. 6, p. 65-74, 2016.

¹³ LUND, H.; MARSZAL, A.; HEISELBERG, P. Zero energy buildings and mismatch compensation factors, **Energy and Buildings**, v. 43, p. 1646-1654, 2011 apud WILLIAMS, J. *et al.* Less is more: a review of low energy standards and the urgent need for an international universal zero energy standard. **Building Engineering**, v. 6, p. 65-74, 2016.

De acordo com Torcellini *et al.* (2006 apud ANDERSON, 2016)¹⁴, o balanço nulo para um edifício de energia zero pode ser definido utilizando-se uma das quatro abordagens a seguir:

- **Net-zero site energy:** Nesta abordagem o edifício de energia zero deve produzir, no mínimo, a mesma quantidade de energia que consome em base anual de operação quando a energia é contabilizada no local;
- **Net-zero source energy:** Nesta abordagem o edifício de energia zero deve produzir, no mínimo, a mesma quantidade de energia que consome em base anual de operação quando a energia é contabilizada em termos de fontes de energia. Fonte de energia se refere à energia primária utilizada para gerar e distribuir a energia para o local. Nesta abordagem é necessário multiplicar a energia local importada e exportada para a rede por fatores de conversão entre a energia local e a energia primária utilizada na fonte de geração;
- **Net-zero energy costs:** Nesta abordagem a quantia em dinheiro que a concessionária de energia paga ao proprietário do edifício pela energia que o edifício exporta para a rede deve ser no mínimo igual à quantia em dinheiro que o proprietário paga à concessionária pela energia importada da rede;
- **Net-zero energy emissions:** Um edifício de emissão líquida zero é definido como aquele que produz em base anual de operação no mínimo uma quantidade de energia renovável livre de emissões igual a quantidade de energia primária, emissora de gases de efeito estufa, utilizada para produzir a energia importada da rede em base anual de operação.

Independente da abordagem utilizada uma boa definição de edifício de energia zero deve considerar, primeiramente, a eficiência energética antes de se planejar a geração de energia local a partir de fontes renováveis, uma vez que a redução do consumo de energia permite reduzir a capacidade de geração do sistema de energia renovável (ANDERSON, 2016).

De acordo com Griffith *et al.* (2007 apud ANDERSON, 2016)¹⁵, pesquisas conduzidas no NREL (*National Renewable Energy Laboratory*) concluíram que a definição

¹⁴ TORCELLINI, P. *et al.* **Zero energy buildings: a critical look at the definition.** Denver: NREL, 2006 apud ANDERSON, J. **Modelling and performance evaluation of net zero energy buildings.** Wollongong: Wollongong University, 2016.

¹⁵ GRIFFITH, B. *et al.* **Assessment of the technical potential for achieving net zero energy buildings in the commercial sector.** Denver: NREL, 2007 apud ANDERSON, J. **Modelling and performance evaluation of net zero energy buildings.** Wollongong: Wollongong University, 2016.

“*net-zero site*” é preferível para análises devido ao fato de ser de fácil verificação e não requerer fatores de conversão de energia e emissões.

Segundo Biswas *et al.* (2016), alguns autores defendem a ampliação do conceito de *Net Zero Energy Buildings* para *Life Cycle Zero Energy Buildings* através da inclusão da energia incorporada no edifício e seus componentes, juntamente com o consumo de energia na fase de operação, no balanço energético nulo do edifício.

2.2.2 Definição de *nearly zero energy building* empregada na União Europeia

De acordo com Santos (2017), Cunha (2015) e Borlin (2013), o conceito de *nearly zero energy building* (nZEB) é definido pela Diretiva de Desempenho Energético de Edifícios (EPBD 2010/31/EU), vigente na União Europeia, como edifícios cujo balanço energético anual seja quase nulo. Os nZEB são edifícios de elevada eficiência energética não só devido ao reduzido consumo de energia em relação aos edifícios convencionais, mas também devido à existência de sistemas de produção de energia renovável local que satisfaçam grande parte das suas necessidades energéticas quase nulas. De acordo com os autores, a diretiva estabelece um quadro muito geral da implantação dos nZEB, solicitando aos estados membros a elaboração das suas abordagens nacionais e planos de implantação. A variedade dessas abordagens impossibilita a agregação numa única definição de nZEB, sendo uma temática muito flexível.

Paoletti *et al.* (2017) também apontaram que a definição de nZEB dada pela EPBD 2010/31/EU é qualitativa, deixando espaço para interpretações nacionais e diferentes interpretações quantitativas. De acordo com BPIE (2015), o artigo 9 da EPBD requer que os estados membros da União Europeia estabeleçam suas definições nacionais de nZEB e promovam ativamente a absorção de mercado destes. Os estados membros devem preparar e submeter à comissão europeia seus planos nacionais com definições claras e medidas para a promoção do nZEB.

O Quadro 4 apresenta um resumo de algumas definições nacionais de nZEB em uso em alguns estados membros da União Europeia para novas edificações. Os dados demonstram a inexistência de uma única definição quantitativa de nZEB em termos de indicadores de consumo de energia primária e utilização de energia renovável. Alguns países, como a Dinamarca, estabeleceram valores baixos em termos de consumo de energia primária, enquanto que outros, como a Áustria, valores maiores para o consumo de energia primária. Há, também, variabilidade quanto à participação de fontes renováveis de geração de energia e

diferenças entre os parâmetros estabelecidos para os edifícios do setor residencial e não residencial. A escolha desses limites está associada a práticas locais de construção civil, condições climáticas e ao grau de liberdade dado pela EPBD 2010/31/EU.

Quadro 4: Definições em termos de energia primária e participação de geração de energia renovável para novas edificações nos padrões de um nZEB

País	Referência principal	Edifícios residenciais (kWh/m ² ano)	Edifícios não residenciais (kWh/m ² ano)	Participação de energia renovável
Austria	OIB Guidelines 6	160	170	Parcela mínima proposta no OIB para todos os edifícios
Dinamarca	Building Regulations 2010	20	25	Qualitativa
França	Thermal Regulation 2012, National nZEB plan	40-65	70-110	Qualitativa

Fonte: Adaptado a partir de dados de BPIE (2015).

2.2.3 Definições de edifícios de energia zero em países pertencentes à Cooperação Econômica Ásia-Pacífico

No Canada não há norma oficial definindo o significado e aplicação do conceito de NZEB ou nZEB. O termo *Net Zero Energy Housing* (NZEH) é empregado e surgiu de uma iniciativa de pesquisa do Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE) sobre habitações de energia zero no ano de 2000. Em 2006, o programa piloto nacional canadense *EquilibriumTM* definiu algumas estratégias para a construção de uma habitação de energia líquida zero (NZEH), dentre as quais se destacam: (1) a redução do consumo de energia por meio da construção de uma envoltória com alto desempenho e utilização de aparelhos e sistemas de iluminação com alta eficiência, (2) utilização passiva da energia solar para aquecimento e resfriamento e (3) produção de eletricidade a partir de sistemas fotovoltaicos conectados à rede (WEI; SHICONG, 2017).

Segundo Wei e Shicong (2017), a China iniciou a definição de um padrão técnico de *nearly zero energy building* (nZEB) em outubro de 2016. É previsto que o padrão seja publicado e implantado em 2019 na qualidade de primeiro padrão oficial chinês de nZEB. Na China, o conceito de nZEB é definido como um edifício que possui uma envoltória com

isolamento térmico e vedação à infiltração de ar com o melhor desempenho possível. Outras características que o nZEB chinês deve contemplar são: (1) fazer uso de ventilação natural, (2) utilizar iluminação natural, (3) diminuir as necessidades de aquecimento e condicionamento de ar e (4) proporcionar um ambiente interno confortável. Um dos principais objetivos dos *nearly zero energy buildings* na China é criar um ambiente interno saudável e confortável. O Ministério da Habitação e Desenvolvimento Urbano e Rural do governo chinês publicou, em novembro de 2015, o “*guia técnico para edificações verdes passivas com consumo de energia ultrabaixo*”, o qual estabelece critérios de desempenho para edifícios de energia quase nula. O guia técnico é considerado como a primeira definição oficial de edifício de energia ultrabaixa e um primeiro passo rumo ao *nearly zero energy building* chinês.

Na Coreia do Sul o conceito de *net/nearly Zero Energy Building* é definido, de forma geral, como um edifício cujo isolamento térmico da envoltória possui elevado desempenho, visando reduzir o consumo de energia, e utiliza geração renovável para tornar o edifício autossuficiente em energia (WEI; SHICONG, 2017).

Nos Estados Unidos, o Departamento de Energia (DOE), juntamente com o Instituto Nacional de Ciências da Edificação (NIBS – *National Institute of Building Sciences*) estabeleceram, em 2014, definições associadas a nomenclaturas e diretrizes para edifícios de energia zero com o objetivo de atingir a adoção generalizada pela indústria de construção civil. Segundo a definição de edifício de energia zero (ZEB) dada pelo DOE, um ZEB é um edifício energeticamente eficiente no qual, em uma base de fonte de energia, a energia requerida anualmente é menor que, ou igual, à energia renovável produzida no local. O DOE define o termo “fonte de energia” como sendo a energia local adicionada à energia consumida na extração, processamento e transporte dos combustíveis primários utilizados na geração da energia, tais como carvão, petróleo e gás natural. Consideram-se também as perdas de energia que ocorrem em plantas de geração, na transmissão e distribuição da energia para o local do edifício DOE (2015).

Segundo DOE (2015), as definições relacionadas ao edifício de energia zero requerem a delimitação de fronteiras locais para contabilização de fluxos energéticos. A fronteira escolhida deve contabilizar os fluxos de energia entregues ao edifício e os fluxos de energia exportados pelo edifício. Devem ser contabilizadas as energias que cruzam a fronteira (superfície de controle) em todas as formas, como por exemplo, energia de aquecimento, resfriamento, ventilação, água quente doméstica, iluminação interna e externa, cargas de tomadas, energia de processos e transporte dentro da fronteira do edifício. A energia de carregamento de veículos elétricos é contabilizada como energia exportada, pois estes operam

fora da fronteira do edifício. Para a conversão das energias entregues e exportadas na fronteira do edifício são utilizados fatores de conversão em fonte de energia primária, os quais são definidos pela norma ASHRAE *Standard* 105.

2.2.4 Equacionamentos referentes às definições e abordagens de edifícios de energia líquida zero, energia líquida quase zero, emissões líquidas zero e custo líquido zero

Considerando a abordagem adotada nos Estados Unidos para o edifício de energia zero (ZEB), em termos de fontes de energia, tem-se um equacionamento para avaliar os fluxos energéticos que atravessam a fronteira do edifício, o qual é definido em DOE (2015) da forma apresentada na equação (1).

$$E_{source} = \sum E_{del(i)} \cdot r_{del(i)} - \sum E_{exp(i)} \cdot r_{exp(i)} \quad (1)$$

Em que:

E_{source} : Energia líquida do edifício calculada em termos de fontes de energia

$E_{del(i)}$: Energia entregue ao edifício no tipo “i”

$E_{exp(i)}$: Energia exportada do edifício no tipo “i”

$r_{del(i)}$: Fator de conversão em fonte de energia para a energia entregue do tipo “i”

$r_{exp(i)}$: Fator de conversão em fonte de energia para a energia exportada do tipo “i”

O edifício é classificado como um edifício de energia zero caso $E_{source} \leq 0$.

De acordo com Williams *et al.* (2016), as abordagens *net zero site energy*, *net zero source energy*, *nearly zero energy*, *net zero energy cost* e *net zero energy emission* podem ser definidas por meio das equações (2), (3), (4), (5) e (6)¹⁶ apresentadas a seguir para cada uma das abordagens, respectivamente.

$$E_{gl} - C_{el} \geq 0 \quad (2)$$

¹⁶ As equações (3) e (4) se aplicam de forma excludente. Os caracteres originais das equações (2) a (6) foram modificados para atender às nomenclaturas empregadas neste trabalho.

$$E_{gl} - (C_{el} + E_p) \geq 0 \quad (3)$$

$$E_{gl} - (C_{el} + E_p) \cong 0 \quad (4)$$

$$R_R - C_E \geq 0 \quad (5)$$

$$E_{ev} - E_{el} \geq 0 \quad (6)$$

Nas equações (2), (3), (4), (5) e (6) tem-se a seguinte definição de parâmetros:

E_{gl} : Quantidade de energia renovável gerada no local em base anual de operação

C_{el} : Quantidade de energia consumida pelo edifício em base anual de operação

E_p : Perdas totais de energia elétrica, incluindo as perdas de energia na planta de geração durante o processo de conversão de energia e as perdas de transmissão na rede

R_R : Receita gerada com a exportação de energia elétrica renovável para a rede

C_E : Custo com a importação de energia elétrica da rede

E_{ev} : Emissões de dióxido de carbono equivalente evitadas com a produção local de energia renovável

E_{el} : Emissões de dióxido de carbono equivalente associadas à energia elétrica importada da rede

2.2.5 Estratégias para se atingir o padrão de edifício de energia zero

Georgiou (2015) classifica a ordem sequencial de medidas que devem ser aplicadas na redução do consumo de energia de um edifício utilizando o conceito de “pirâmide de Kyoto”, segundo o qual a primeira medida a ser tomada é a redução das perdas de calor; em seguida, deve-se considerar a redução do consumo de eletricidade; na sequência, deve-se proporcionar a utilização da energia solar; seguindo-se, deve-se realizar o monitoramento do consumo de energia e por fim, devem-se selecionar fontes de energia renovável disponíveis no local.

Jorge (2013) defende que o desempenho energético de um edifício está associado ao clima, o qual apresenta uma grande variabilidade espacial. Segundo o autor, as variáveis climáticas com maior influência no desempenho energético são temperatura, umidade do ar,

velocidade do vento, pressão e insolação. Desta forma, para a obtenção de condições de conforto, as estratégias devem variar com o clima.

De acordo com AlAjmi *et al.* (2015), os desafios para se atingir energia líquida zero em edifícios existentes são maiores que os desafios encontrados para se atingir energia líquida zero em novas construções, especialmente em climas quentes. Para os autores, maior preocupação deve ser dada para a conversão de edifícios existentes em edifícios de energia líquida zero em diferentes condições climáticas, uma vez que o número destes é bastante superior ao de novas construções sendo que esse quadro irá perdurar por algumas décadas. Para edifícios já existentes, os autores propõem duas etapas básicas para atingir a energia líquida zero:

- Redução das necessidades energéticas do edifício (especialmente para sistemas de aquecimento e arrefecimento) por meio da implantação de medidas de eficiência energética;
- Utilização de geração fotovoltaica, geração eólica, aquecedores solares, condicionadores de ar por absorção de energia solar para atender às necessidades remanescentes de energia após a implantação das medidas de eficiência energética.

Todas as definições dadas para edifícios de energia zero abordadas nas seções 2.2.1, 2.2.2 e 2.2.3 consideram como passo fundamental para se atingir a meta do balanço energético nulo (ou quase nulo) a redução máxima das necessidades de energia do edifício (asseguradas as condições de conforto térmico e luminoso). Tal redução pode ser conseguida pela aplicação de estratégias de projeto passivo, associadas a medidas de eficiência energética. Após a máxima redução possível das necessidades energéticas do edifício realiza-se o dimensionamento e incorporação de sistemas de geração de energia (eletricidade e/ou calor) a partir de fontes renováveis. O dimensionamento e incorporação de sistemas de geração de energia renovável são referidos na literatura como estratégias de projeto ativo.

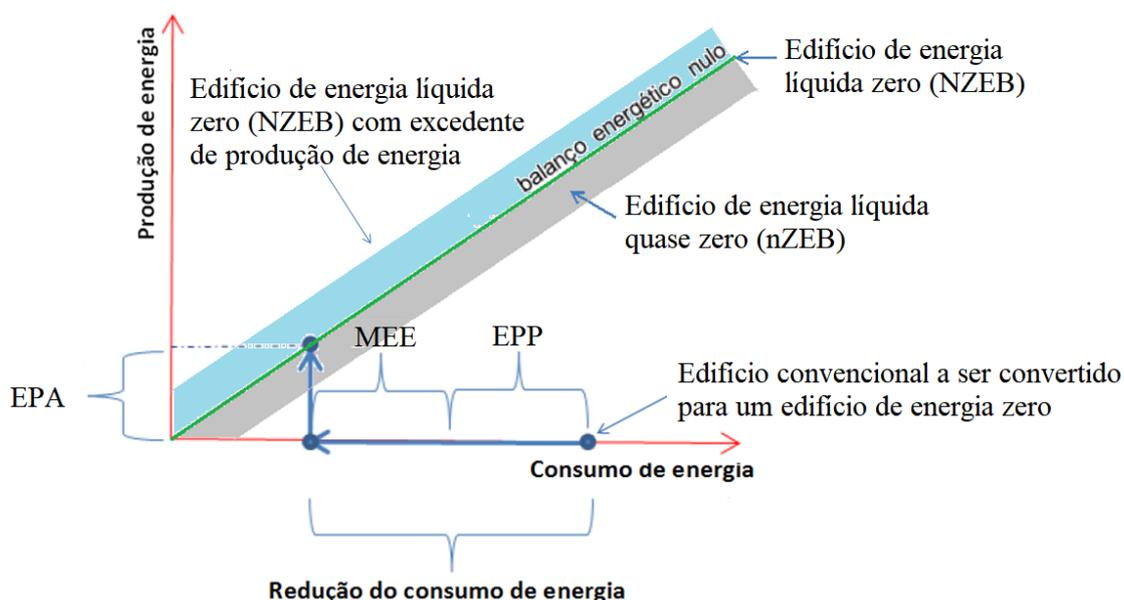
De forma qualitativa, e considerando o trabalho de Aksamija (2016), as estratégias de projeto passivo (EPP), medidas de eficiência energética (MEE) e estratégias de projeto ativo (EPA) podem ser resumidamente definidas como se segue:

- **EPP:** estratégias relacionadas com o melhor aproveitamento das variáveis climáticas locais (iluminação natural, ventilação natural, isolamento térmico da envoltória, correta orientação de janelas, elementos de sombreamento, correto dimensionamento

- de vãos, entre outros) na concepção arquitetônica do edifício visando proporcionar condições de conforto térmico e luminoso com o menor consumo de energia possível;
- **MEE:** substituição de equipamentos de iluminação, condicionamento de ambiente e ventilação, dentre outros, por modelos com maior eficiência energética e certificados por órgãos competentes; instalação de controladores lineares nos sistemas de iluminação, condicionamento de ambiente e ventilação;
 - **EPA:** instalação de sistemas para geração de energia distribuída (calor e/ou eletricidade), como por exemplo, sistema de geração fotovoltaica, aquecedores solares, sistemas de arrefecimento por absorção de energia solar, turbinas de geração eólica, entre outros.

As três etapas (estratégias de projeto passivo, medidas de eficiência energética e estratégias de projeto ativo) discutidas anteriormente podem ser organizadas em um diagrama de dois eixos, para facilitar a compreensão das definições de edifícios de energia zero, conforme pode ser observado na Figura 3, na qual a reta de balanço energético nulo representa a equidade entre a produção e o consumo de energia do edifício em base anual de operação.

Figura 3: Etapas para atingir o padrão de edifício de energia zero



Nota: MEE – Medidas de Eficiência Energética, EPP – Estratégias de Projeto Passivo, EPA – Estratégia de Projeto Ativo

Fonte: Adaptado de Cunha (2015).

A partir da Figura 3 é possível concluir que as estratégias de projeto passivo e medidas de eficiência energética devem ser utilizadas até a exaustão para se conseguir a máxima redução possível do consumo de energia do edifício e, desta forma, reduzir a quantidade de energia renovável a ser gerada para atender ao consumo restante.

A redução do consumo de energia do edifício visa não só aumentar a viabilidade econômica e técnica (pois com a redução no consumo de energia do edifício pode-se reduzir a capacidade do sistema de geração de energia renovável, o que reduz os custos e a área necessária para instalação) para atingir o padrão de um nZEB ou NZEB, mas também para reduzir ao máximo as emissões de gases de efeito estufa associadas à geração e ao consumo de energia (ANDERSON, 2016).

É importante também salientar que as definições de edifício de energia líquida zero (NZEB) e edifício de energia líquida quase zero (nZEB), apresentadas na Figura 3, são, normalmente, validadas em base anual de consumo e geração de energia, uma vez que, devido a flutuações temporais no consumo e geração de energia para um edifício, podem haver períodos com excedente de geração e períodos nos quais a geração de energia renovável pode ser insuficiente para atender completamente ao consumo de energia do edifício.

Se em base anual a energia renovável gerada for insuficiente para atender completamente ao consumo de energia do edifício, porém o montante de energia gerada for bastante próximo da quantidade consumida, este é classificado como edifício de energia líquida quase zero (nZEB) (faixa cinza da Figura 3). Caso o montante de energia renovável gerada tenha sido igual ou maior que o consumo de energia do edifício em base anual, então, o edifício é classificado como um edifício de energia líquida zero (NZEB) (pontos pertencentes à reta de balanço nulo e à faixa azul da Figura 3).

3 ESPECIFICAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE PROJETO PASSIVO

Na seção 2.2.5 foram definidos os conceitos de estratégia de projeto passivo, estratégia de projeto ativo e medidas de eficiência energética necessários para atingir o padrão do edifício de energia zero. Neste capítulo será apresentada uma descrição mais detalhada das estratégias de projeto passivo.

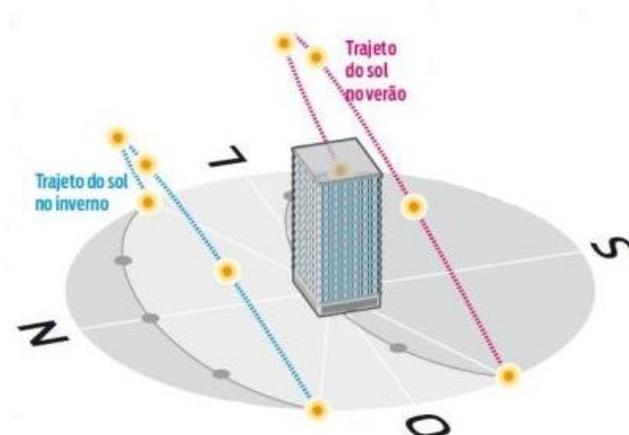
3.1 DEFINIÇÃO GERAL DE ESTRATÉGIAS DE PROJETO PASSIVO

As estratégias de projeto passivo estão relacionadas ao melhor aproveitamento das variáveis climáticas locais para obtenção do conforto térmico, luminoso e acústico do ambiente interno. Essas estratégias são também definidas dentro do conceito de arquitetura bioclimática. As estratégias de projeto passivo, que podem ser empregadas para a redução do consumo de energia em um edifício, se relacionam com o controle dos fluxos de calor pelos elementos da envoltória. As principais estratégias de projeto passivo são, conforme definidas na seção 2.2.5: a correta orientação do edifício considerando o aproveitamento ótimo de iluminação e ventilação natural (aplicáveis para edificações na fase de projeto), melhoramentos no isolamento térmico da envoltória, melhoramentos na vedação da envoltória contra infiltrações indesejadas de ar, massa de armazenamento de energia térmica, elementos de sombreamento em aberturas, correto dimensionamento de aberturas, janelas com envidraçados e caixilharias de melhores propriedades térmicas e luminosas, além da utilização de ventilação natural.

3.2 ORIENTAÇÃO DO EDIFÍCIO E SUA INFLUÊNCIA EM GANHOS SOLARES, ESTRATÉGIAS DE SOMBREAMENTO, AQUECIMENTO E REFRIGERAÇÃO

Para definir uma orientação ideal do edifício é necessário conhecer a trajetória do sol ao longo do dia e ao longo das estações do ano. Para países do hemisfério sul, os maiores ganhos solares ocorrem em fachadas voltadas para a direção norte geográfica devido à inclinação da trajetória solar ao longo do dia, como é apresentado na Figura 4.

Figura 4: Trajetória do sol ao longo do dia e estações no hemisfério sul



Fonte: Meular.properati (2018).

Para localidades pertencentes ao hemisfério Sul, a colocação de vãos envidraçados em fachadas voltadas para o norte permite maiores ganhos solares, fator que pode colaborar para o aquecimento do ambiente interno no inverno e pode levar ao superaquecimento no verão, se não forem projetados elementos de sombreamento adequados. Os elementos de sombreamento são menos eficientes em fachadas voltadas a leste e oeste devido ao menor ângulo de incidência da radiação solar no início e final do dia. As fachadas voltadas para o sul não recebem radiação solar direta.

A captura de radiação solar incidente depende da orientação das superfícies. Diferentes fachadas do edifício recebem quantidades diferentes de calor do sol. A orientação do edifício tem influência significativa na carga de resfriamento. Em regiões nas quais o conforto é adquirido principalmente pelo movimento de ar é importante considerar a direção predominante dos ventos na orientação do edifício. Em regiões nas quais a temperatura ambiente tem maior influência sobre o conforto do que a ventilação, a orientação em relação à trajetória do sol é mais importante. A orientação norte-sul das fachadas principais é preferível, uma vez que esta orientação pode proporcionar maior aproveitamento da radiação solar (ELAIAB, 2014).

A orientação do edifício é, também, importante quando se considera a utilização de estratégias de projeto de aquecimento solar passivo (massa de armazenamento de energia térmica). Esta estratégia faz uso de componentes do próprio edifício para coletar, armazenar e distribuir ganhos de calor solar visando reduzir a demanda por aquecimento de espaço. Não requer a utilização de equipamentos mecânicos, pois o fluxo de energia térmica ocorre por meios naturais de transferência de calor.

A melhor orientação para a utilização de estratégias de aquecimento solar passivo é aquela na qual o edifício é orientado para receber a maior quantidade de radiação solar possível no inverno, quando o aquecimento é requerido, e evitar ao máximo a absorção de radiação solar no verão, quando o resfriamento é necessário. Esta estratégia se relaciona à utilização de materiais com propriedades diferentes para diferentes orientações. Porém, é também necessário projetar elementos de sombreamento para proteger o edifício da incidência direta de radiação solar durante o verão (ELAIAB, 2014).

3.3 ILUMINAÇÃO NATURAL

De acordo com Anderson (2016), a iluminação natural ajuda a reduzir o consumo de energia elétrica, bem como contribui para o conforto dos ocupantes, porém, um balanço entre iluminação natural, sombreamento e iluminação artificial deve ser encontrado. Utilização excessiva de iluminação natural pode provocar o superaquecimento do edifício, levando à necessidade de aumento da carga de refrigeração. A utilização excessiva de sombreamento, para prevenir superaquecimento, pode conduzir à necessidade de aumento da utilização de iluminação artificial.

Uma maneira de reduzir os efeitos térmicos da iluminação artificial é fazer maior utilização da iluminação natural. Segundo Anderson (2016), através de um bom projeto de iluminação natural é possível reduzir a utilização da iluminação artificial na faixa de 50 a 80%, o que reduz o consumo de energia elétrica associado à iluminação, bem como a carga de refrigeração adicional para retirar a potência térmica residual do ambiente interno.

De acordo com Anderson (2016), uma razão de área entre janelas e paredes na faixa de 30 a 40% para aproveitamento da iluminação natural é a que conduz às maiores economias de energia. Acima desta faixa há riscos de superaquecimento e brilho excessivo nos ambientes internos do edifício.

3.4 ISOLAMENTO TÉRMICO DA ENVOLTÓRIA DO EDIFÍCIO

Segundo Anderson (2016), define-se a envoltória do edifício como a barreira física que separa o espaço interno do exterior. A envoltória é uma variável crítica para o conforto dos ocupantes e para a eficiência térmica e energética. Ela controla fatores físicos, tais como, temperatura, umidade e iluminação. Uma envoltória de alto desempenho é importante para o conforto térmico dos ocupantes e para economias de energia do edifício.

A transferência de calor pelos elementos da envoltória pode ocorrer a partir de três mecanismos: condução, convecção e radiação. A partir do controle dos mecanismos de transferência de calor, o efeito do ambiente externo sobre o ambiente interno pode ser reduzido, resultando em um ambiente interno termicamente estável e proporcionando redução do consumo de energia (GEORGIU, 2015).

De acordo com Georgiou (2015), entre 50 a 75% das perdas de calor em edifícios convencionais ocorrem através dos elementos que compõem a envoltória. Segundo Salih (2016), aproximadamente 60% das perdas de calor ocorrem diretamente através do teto e paredes, 15% através de superfícies envidraçadas e 25% por meio de infiltração de ar através de rachaduras, aberturas e portas. Para reduzir a transmissão de calor, os edifícios devem ser isolados a fim de reduzir as perdas de calor no inverno e os ganhos de calor no verão. As perdas ou ganhos de calor por elementos da envoltória são afetadas pela diferença de temperatura entre os ambientes interno e externo e a resistência térmica dos elementos construtivos. Assim, para reduzir as transferências de calor através dos elementos da envoltória, é necessária a aplicação de isolamento térmico com maior valor de resistência térmica.

De acordo com Bel (2017) e Schiavoni *et al.* (2016), fatores como propriedades térmicas e custos são importantes na escolha do material isolante, contudo, não são os únicos que devem ser considerados no projeto do isolamento térmico da envoltória de um edifício. Outros fatores, como resistência ao fogo, isolamento acústico, permeabilidade ao vapor de água e impacto sobre o meio ambiente e sobre a saúde humana são fatores importantes a serem considerados em um bom projeto de isolamento térmico de envoltória.

Segundo EURIMA (2013), o consumo de energia e as emissões de CO₂ das edificações poderiam ser reduzidas, respectivamente, em pelo menos 50% e 42% por meio da aplicação de isolamento térmico. Duijve (2012) destaca que no conceito de habitação passiva (*passive house*) empregado na Holanda, o isolamento térmico da envoltória é projetado de modo que a quantidade máxima de energia requerida para aquecimento de espaço não seja maior que 5 kWh/m²ano para novos edifícios e 25 kWh/m²ano para edifícios reformados para o padrão *passive house*. Nesses padrões, a resistência térmica dos elementos da envoltória deve ser de, pelo menos, 6,5 m²K/W, o que requer a aplicação de isolamento com isolantes comuns, como lã mineral, de até 30 cm de espessura.

Em regiões de clima frio¹⁷, materiais de isolamento térmico tem um papel importante e sua utilização é um primeiro passo lógico para reduzir o consumo de energia a fim de manter a temperatura interna em um nível adequado e atingir a eficiência energética (PARGANA, 2014). Contudo, na aplicação do isolamento térmico cuidados devem ser tomados, pois isolamento térmico instalado inadequadamente, associado à vedação inadequada da envoltória podem causar perdas de eficiência, grandes oscilações da temperatura interna e presença de umidade, levando os equipamentos de condicionamento de ar a um maior desgaste, pois têm que operar com maior frequência. Antes da aplicação do isolamento térmico, deve-se assegurar que não existem problemas tais como vigas mofadas ou apodrecidas, crescimento de mofo ou bolor, vazamentos de tubulações, infiltração de água do solo, entre outros. O melhor tipo de isolante térmico depende de onde ele será aplicado, do valor de resistência térmica recomendada para o clima local, e do custo de aquisição e instalação do material (DOE, 2012).

Segundo Pajarsakas (2017)¹⁸, o isolamento térmico é crucial para que um edifício atinja o *status* de edifício de energia quase nula (nZEB), uma vez que a maior parte do calor perdido por um edifício ocorre através dos elementos da envoltória levando ao aumento da demanda por energia de aquecimento.

Em edificações com alta eficiência energética, os valores dos coeficientes de transmitância térmica devem ser bastante pequenos. Por exemplo, Pajarakas (2017) fornece valores de transmitância térmica para edificações seguindo o conceito de residência passiva (*passive house*) na Finlândia. Os valores¹⁹ estabelecidos para parede externa, sistema de pisos do andar de base e telhado estão na faixa de 0,06 a 0,1 W/m²K. Para janelas, os valores estão na faixa de 0,7 a 0,9 W/m²K e para portas os valores encontram-se na faixa de 0,4 a 0,7 W/m²K. Segundo Georgiou (2015), a maior parte dos estados membros da União Europeia são obrigados a estabelecer requisitos mínimos de transmitância térmica para elementos opacos da envoltória (por exemplo, na Alemanha e Dinamarca os requisitos mínimos para transmitância térmica de paredes são respectivamente 0,24 e 0,20 W/m²K).

¹⁷ Comentário inserido pelo autor levando em consideração que os resultados deste trabalho (Capítulo 6) indicam que dependendo do valor da resistência térmica aplicada o super isolamento térmico da envoltória pode dificultar a transferência de calor dos ambientes internos do edifício para o meio exterior gerando a necessidade de maior utilização do sistema de ar condicionado para a remoção de cargas térmicas internas quando o isolamento térmico é aplicado na envoltória de edifícios situados em regiões de clima quente.

¹⁸ Os mesmos comentários apresentados na nota de rodapé anterior são válidos aqui.

¹⁹ Faixa de valores válidos para países de climas frios, os resultados deste trabalho (Capítulo 6) demonstram que o super isolamento térmico de elementos da envoltória pode conduzir ao aumento do consumo de energia para regiões de clima quente.

3.5 FENESTRAÇÕES ENVIDRAÇADAS

Fenestração é um termo que se refere a aberturas na envoltória do edifício, móveis ou fixas, inclui janelas, portas e claraboias. Esses elementos proporcionam a ligação física ou visual entre o ambiente interno e externo. Os elementos citados possuem fraco desempenho térmico em comparação com outros elementos do edifício, principalmente devido à resistência térmica mais baixa da montagem (vidro e materiais da estrutura). As principais aberturas em uma edificação são as janelas (GEORGIU, 2015).

Os vãos envidraçados representam uma variável importante no projeto solar passivo, pois eles podem ser os responsáveis pela maior proporção de ganhos solares do edifício. Os ganhos de calor através de janelas representam de 25 a 28% do ganho total de calor (ELAIAB, 2014).

Em princípio, o desempenho das janelas é descrito por duas propriedades, as quais são: a transmitância térmica (U)²⁰ e o fator solar (g). A transmitância térmica é responsável pelas transferências de calor através da janela, enquanto que o fator solar é associado aos ganhos de radiação solar. A proporção adequada de penetração de iluminação natural permitirá a economia de energia com iluminação artificial, além de proporcionar um ambiente natural mais saudável (GEORGIU, 2015; ELAIAB, 2014).

Uma típica estrutura de janela é composta de envidraçados e caixilharias. Os envidraçados ocupam a maior parte da área da janela (80% em média), sendo, desta forma, considerados como as partes principais. Um sistema de janela pode ser composto por painéis de vidro, gás de preenchimento (ar, argônio, criptônio) e espaçadores (GEORGIU, 2015).

De acordo com Georgiou (2015), a transmitância térmica geral de uma estrutura de janela com envidraçado simples pode ser calculada baseada na estrutura e elementos envidraçados, por meio da equação (7).

$$U_w = \frac{\sum A_g \cdot U_g + \sum A_f \cdot U_f + \sum I_g \cdot \Psi_g}{\sum A_g + \sum A_f} \quad (7)$$

Em que:

A_g : Área do envidraçado (m^2)

A_f : Área da estrutura (m^2)

²⁰ Termo empregado pela NBR 15220 (ABNT, 2003).

U_g : Transmitância térmica do envidraçado (W/m^2K)

U_f : Transmitância térmica da estrutura (W/m^2K)

l_g : Perímetro total do envidraçado (m)

Ψ_g : Transmitância térmica linear (ponte térmica) devido a efeitos combinados de envidraçado, espaçador e estrutura ($W/m.K$)

Considerando a equação (7), a transmitância geral de uma janela pode ser reduzida através da diminuição da área de fenestração ou através da redução da transmitância térmica das partes individuais. A redução da área de fenestração nem sempre é adequada, considerando as necessidades de iluminação natural e conforto visual (GEORGIU, 2015).

Em sistemas envidraçados, as perdas de calor podem ser reduzidas pela adição de painéis extras de vidro (envidraçado duplo ou triplo) ou preenchendo o espaço interior com um gás de baixa condutividade térmica. Nos últimos tempos tem-se observado a aplicação de painéis de vidro com uma camada de óxido de baixa emissividade; essa tecnologia é denominada de envidraçado de baixa emissividade. O revestimento é normalmente realizado nas superfícies internas na cavidade a fim de preservar suas propriedades da ação de poeira e variáveis climáticas (GEORGIU, 2015).

O fator solar (g , na Europa), ou coeficiente de ganho de calor solar (SHGC, nos Estados Unidos), é definido como um parâmetro adimensional que indica a quantidade de calor solar transferido para dentro do espaço interno através de uma superfície envidraçada expressa em valores entre 0 e 1. Para reduzir os ganhos solares através de uma janela pode-se recorrer ao revestimento ou sombreamento externo. Este último é mais eficiente, uma vez que a radiação solar direta é interceptada antes de atingir os painéis de vidro (GEORGIU, 2015).

Além do sombreamento externo, os ganhos solares podem ser reduzidos pela aplicação de vidro absorvente, vidro revestido ou um painel de vidro adicional. A produção de vidros absorventes é baseada na adição de óxidos metálicos, oferecendo ao vidro a capacidade de absorver parte da energia solar antes de emití-la para fora ou para o interior do ambiente. O fator solar depende da cor e da espessura do painel de vidro. O vidro revestido é baseado na reflexão da radiação solar incidente devido a deposição de óxido metálico em sua superfície (GEORGIU, 2015).

Anderson (2016) define os tipos de envidraçados em seis classes, que diferem entre si principalmente em relação ao número de painéis de vidro, emissividade do vidro e presença de gás de preenchimento entre painéis, da forma como se segue:

- **Envidraçado simples:** composto por um painel simples de vidro montado em uma estrutura tipicamente construída de madeira ou alumínio;
- **Envidraçado simples de baixa emissividade:** É similar ao envidraçado simples, porém utiliza vidro de baixa emissividade. Possui revestimento fino depositado na sua superfície;
- **Envidraçado duplo:** É um sistema de janela consistindo de dois painéis de vidros montados em uma estrutura tipicamente de madeira ou alumínio. O vão entre os painéis é comumente preenchido com ar. Gás argônio pode, também, ser utilizado para melhorar o isolamento térmico;
- **Envidraçado duplo de baixa emissividade:** Similar ao envidraçado duplo convencional, porém, utilizando vidro de baixa emissividade;
- **Envidraçado triplo:** similar ao envidraçado duplo, porém, utilizando três painéis ao invés de dois;
- **Envidraçado triplo de baixa emissividade:** Similar ao envidraçado triplo convencional, porém, utilizando vidro de baixa emissividade para um ou todos os três painéis.

Segundo Georgiou (2015), atualmente não há nenhum padrão que determine valores de fator solar (g) para vidros. O bom senso indica a utilização de vidros com baixo fator solar para climas quentes e vidro com valor mais alto de fator solar para climas frios. A Tabela 1 apresenta fatores solares de referência (um conjunto mais completo de propriedades e definições de vidros fabricados no Brasil pode ser encontrado no Apêndice G) para alguns tipos de envidraçados fabricados pela empresa AGC.

Tabela 1: Fatores solares de referência para alguns tipos de envidraçados fabricados pela empresa AGC

Tipo de envidraçado	Fator solar (g)
Simple, claro	0,86
Duplo, claro	0,77
Duplo, baixa emissividade, ganho solar alto	0,66
Duplo, baixa emissividade, ganho solar moderado	0,42
Duplo, baixa emissividade, ganho solar baixo	0,30
Triplo, baixa emissividade, ganho solar alto	0,60
Triplo, baixa emissividade, ganho solar moderado	0,40
Triplo, baixa emissividade, ganho solar baixo	0,26

Fonte: Adaptado de Georgiou (2015).

4 ANÁLISE DE APLICAÇÕES DO CONCEITO DE EDIFÍCIOS DE ENERGIA ZERO E PRÁTICAS EMPREGADAS

Neste capítulo são apresentadas algumas características da aplicação de estratégias de projeto passivo, medidas de eficiência energética e estratégias de projeto ativo (geração local de energia renovável) empregadas em edifícios de energia zero construídos na região da União Europeia e da APEC. Além disso, os resultados de alguns estudos de caso conduzidos através de simulações de estratégias de projeto passivo, medidas de eficiência energética e estratégias de projeto ativo empregando softwares de simulação energética são analisados.

4.1 ESTRATÉGIAS EMPREGADAS EM nZEB NA UNIÃO EUROPEIA

Paoletti *et al.* (2017) realizaram um estudo sobre as características arquitetônicas e conjuntos de soluções empregadas, em amostras de nZEB construídos em 17 países europeus. Segundo os autores, a escolha de uma estratégia, solução ou tecnologia na reforma de um edifício existente para um padrão nZEB ou na construção de um nZEB é influenciada por fatores como estratégias nacionais, esquemas de suporte e incentivos, tradição de construção, condições climáticas e disponibilidade de fontes, materiais e tecnologias. A análise foi conduzida por meio de coleta de dados de nZEB existentes. Os nZEB foram classificados de acordo com zonas climáticas comuns, indicadores de desempenho energético comuns, conjuntos de soluções de projeto passivo, projeto ativo e medidas de eficiência energética.

Ao todo, foram coletados dados de 411 edifícios (com até 5 anos de idade), sendo 64% pertencentes ao setor residencial e 36% pertencentes ao setor não residencial. Do total de edifícios, 19% se caracterizaram como edifícios reformados para o padrão nZEB e 81% como novos edifícios construídos nos padrões de um nZEB. Foram coletadas informações como desempenho energético, características dos elementos que compõem a envoltória (coeficientes de transmitância térmica e materiais isolantes), estratégias de projeto ativo e passivo. Os edifícios da amostra foram classificados de acordo com zonas climáticas organizadas em três categorias (PAOLETTI *et al.*, 2017):

- Clima frio: contendo 57% dos edifícios da amostra;
- Clima ameno: contendo 39% dos edifícios da amostra;
- Clima quente: contendo 4% dos edifícios da amostra.

Paoletti *et al.* (2017) demonstraram que os valores das transmitâncias térmicas dos elementos da envoltória são sempre muito baixos, variando, em média de $0,12 \text{ W/m}^2.\text{K}$ a $0,20 \text{ W/m}^2.\text{K}$, respectivamente, para regiões com climas mais frios e mais quentes. Alguns casos apresentaram valores levemente acima de $0,35 \text{ W/m}^2.\text{K}$, em locais com climas mais quentes nos quais os requisitos mínimos para transmitância térmica da envoltória são menos exigentes. Os autores determinaram os valores médios das transmitâncias térmicas dos elementos da envoltória utilizando intervalos contendo 50% dos valores encontrados na amostra. Os valores encontrados são mostrados na Tabela 2.

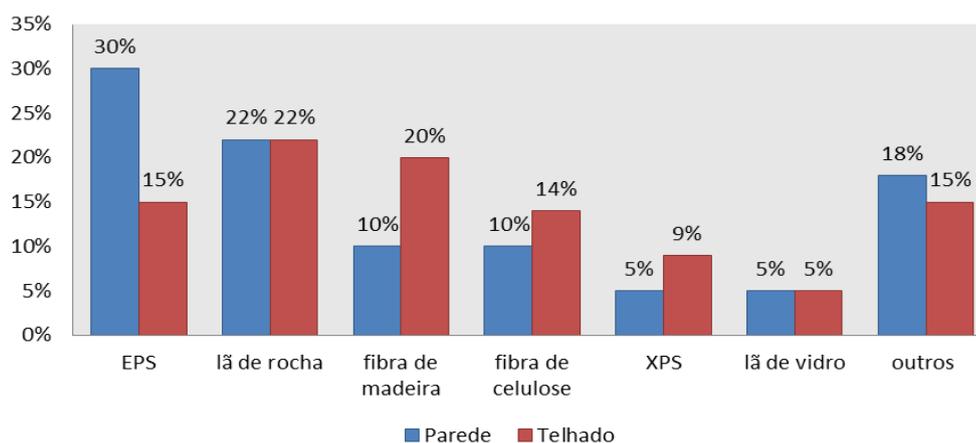
Tabela 2: Valores de transmitância térmica da envoltória de nZEB na União Europeia

	U_{\min} ($\text{W/m}^2.\text{K}$)	U_{\max} ($\text{W/m}^2.\text{K}$)	$U_{\text{médio}}$ ($\text{W/m}^2.\text{K}$)
Paredes	0,11	0,17	0,14
Telhado	0,09	0,15	0,12
Piso	0,12	0,23	0,16
Janelas	0,85	1,04	0,96

Fonte: Paoletti *et al.* (2017)

Analisando a utilização de materiais de isolamento térmico na envoltória de nZEB europeus, Paoletti *et al.* (2017) sugerem que os materiais mais empregados são o EPS e a lã de rocha, conforme pode ser observado na Figura 5. Os autores também concluíram que não há correlação entre a massa específica do material isolante empregado e a região climática do edifício. Desta forma, os critérios para seleção de materiais isolantes não levaram em conta o efeito de massa de armazenamento de energia térmica.

Figura 5: Materiais de isolamento térmico mais empregados em edifícios de energia líquida quase zero na União Europeia



Fonte: Adaptado a partir de dados de Paoletti *et al.* (2017).

Outras estratégias, além do isolamento térmico de elementos da envoltória, destacadas por Paoletti *et al.* (2017) para as amostras de nZEB na União Europeia são apresentadas no Quadro 5.

Quadro 5: Estratégias de projeto passivo e ativo empregadas em edifícios de energia líquida zero na União Europeia

Variável	Solução empregada	Frequência (%)
Envidraçados	Vidro triplo	76
	Vidro duplos e duplos de baixa emissividade	24
Sistema de ventilação	Ventilação mecânica com recuperador de calor	84
Sistema de aquecimento de ambiente e produção água quente	Bomba de calor	32
	Caldeiras	23
	Rede de aquecimento distrital	14
Sistema de resfriamento	Bomba de calor	75
Estratégias de projeto passivo	Sombreamento de aberturas	80
	Ventilação natural	63
	Resfriamento noturno	59
	Massa térmica	57
Estratégias de projeto ativo (sistemas de geração de energia renovável)	Sistema fotovoltaico	29
	Sistema solar térmico	28
	Sistema fotovoltaico e sistema solar térmico	24

Fonte: Adaptado a partir de dados de Paoletti *et al.* (2017).

Pode-se concluir a partir da análise do Quadro 5 que a utilização de vidro triplo, ventilação mecânica com sistema de recuperação de calor, bomba de calor, sombreamento de aberturas e ventilação natural estão entre as estratégias mais utilizadas em nZEB na União Europeia.

4.2 ESTRATÉGIAS EMPREGADAS EM NZEB EM ALGUNS PAÍSES PERTENCENTES À APEC

Wei e Shicong (2017) elaboraram um estudo descrevendo as melhores práticas adotadas em 100 modelos pilotos de edifícios de energia líquida zero (NZEB) situados na região da Cooperação Econômica Ásia-Pacífico (APEC). Os 100 modelos de edifícios analisados foram distribuídos incluindo edifícios de escritórios (37%), edifícios residenciais (17%), escolas (12%), edifícios de serviços públicos (5%), bibliotecas (4%), museus (4%), dentre outros. Na sequência são apresentadas algumas características dos NZEB encontradas no estudo.

4.2.1 Estratégias de projeto passivo empregadas em NZEB na região da APEC

Em relação às características térmicas da envoltória, destaca-se que o alto desempenho térmico da envoltória do edifício é o primeiro passo a ser considerado no projeto de um NZEB. A Tabela 3 apresenta faixas de valores de coeficiente de transmitância térmica (U), fator solar de envidraçados e hermeticidade da envoltória utilizados nos 100 casos de NZEB em países pertencentes a APEC.

Tabela 3: Valores de transmitância térmica, fator solar e hermeticidade da envoltória empregados em NZEB na região da APEC

Variável/País	Estados Unidos	Canada	Japão	Coréia do Sul	China
U – telhado (W/m ² K)	0,02 – 0,50	0,02 – 0,20	0,10 – 0,90	0,10 – 0,20	0,10 – 0,50
U – paredes (W/m ² K)	0,10 – 0,50	0,05 – 0,20	0,20 – 1,10	0,10 – 0,20	0,10 – 0,40
U – janelas (W/m ² K)	0,50 – 2,00	1,00 – 1,50	1,20 – 2,70	0,70 – 1,50	0,20 – 2,40
Fator solar	0,20 – 0,40	0,40 – 0,60	0,20 – 0,45	0,25 – 0,55	0,25 – 0,60
Hermeticidade (m ³ /m ² h a 75 Pa)	0 – 1,20	0,20 – 0,80	Não definido	0,40 – 0,80	0,20 – 0,80

Fonte: Wei; Shicong (2017).

A Tabela 4 apresenta outras estratégias de projeto passivo utilizadas em NZEB na região da APEC, que não a melhoria do isolamento térmico da envoltória, destacadas por Wei e Shicong (2017).

Tabela 4: Estratégias de projeto passivo empregadas em NZEB na região da APEC

Estratégia	Frequência (%)
Claraboia	85
Tubos solares	15
Ganho de calor solar passivo	43
Vegetação local	38
Ventilação natural	88
Resfriamento pelo solo	19
Sombreamento de aberturas	36

Fonte: Wei; Shicong (2017).

4.2.2 Estratégias de projeto ativo empregadas em NZEB na região da APEC

Em relação à geração de energia em NZEB na região da APEC, observa-se grande participação da geração solar fotovoltaica e pequena participação da geração eólica, demonstrando a menor aplicabilidade desta última para o caso de edifícios. A Tabela 5 apresenta as principais formas de geração de energia empregadas em NZEB na região da APEC, de acordo com Wei e Shicong (2017).

Tabela 5: Estratégias de projeto ativo empregadas em NZEB na região da APEC

Tecnologia	Frequência (%)
Sistema solar térmico	38
Sistema fotovoltaico	65
Caldeira a biomassa	5
Turbina eólica	3
Bomba de calor (ar como fonte)	12
Bomba de calor (solo como fonte)	23

Fonte: Wei; Shicong (2017).

4.3 ANÁLISE DE APLICAÇÕES DO CONCEITO DE nZEB POR MEIO DE SIMULAÇÕES ENERGÉTICAS

Nesta seção serão apresentados alguns estudos de caso relacionados às estratégias para transformar edifícios convencionais em edifícios de energia zero. Os principais pontos destacados se referem à metodologia seguida pelos autores e impacto das medidas simuladas na redução do consumo de energia dos edifícios.

4.3.1 Edifício histórico da cidade de Évora (Portugal)

Jorge (2013) estudou, por meio de simulação energética, o impacto da aplicação de algumas estratégias para a redução do consumo de energia em um edifício da cidade de Évora. O edifício caracteriza-se como um edifício histórico com área bruta de 1845 m², distribuídas em três andares. Os dados de partida, para a construção de um modelo para a simulação do edifício, foram obtidos a partir de plantas arquitetônicas do edifício, dados de relatório de auditoria energética e visita ao local do edifício (onde foram coletados dados referentes às características das paredes exteriores, paredes interiores, pavimentos, cobertura, envidraçados, perfil de ocupação, entre outros).

Os coeficientes de condutividade térmica foram atribuídos conforme especificações da informação técnica ITE50²¹ (informação técnica, utilizada em Portugal, sobre o desempenho térmico de edifícios). O perfil de ocupação foi determinado em função da densidade horária da distribuição de pessoas no período de funcionamento do edifício. Os dados de iluminação (em densidade de potência por zona térmica e tipos de luminárias empregadas) foram obtidos de um relatório de auditoria para a certificação energética. Foi realizado levantamento de utilização de outros equipamentos como sistema de climatização, computadores e impressoras. O consumo energético médio anual foi estimado pela análise de faturas de energia elétrica de três anos consecutivos.

Para construir um modelo foram inseridos no *software Design Builder* todos os dados relativos ao zoneamento térmico, propriedades térmicas e físicas dos elementos construtivos e aberturas envidraçadas, perfil de ocupação, densidade de potência de equipamentos e iluminação, características do sistema de aquecimento, ventilação e condicionamento de ar (HVAC), entre outros. Na simulação foi utilizado um arquivo de dados climáticos da cidade de Évora.

Após a inserção dos dados no *software* de simulação procedeu-se à calibração do modelo (etapa necessária para realizar ajustes no modelo, de forma que este possa prever resultados semelhantes aos valores medidos). Para validação do modelo utilizou-se como parâmetro o consumo anual previsto pela simulação e consumo anual faturado, sendo o modelo considerado calibrado no caso em que o desvio entre esses dois valores fosse menor ou igual a 10%.

Após a calibração do modelo foi realizado um estudo da partição do consumo energético do edifício considerando equipamentos, iluminação, aquecimento e refrigeração. O maior consumo anual foi encontrado para o aquecimento, responsável por 41,3 % do total. Foi realizado também, por meio de simulação, um estudo dos fluxos de calor pelos elementos da envoltória a fim de se identificar pontos para a aplicação de estratégias de melhoria. As paredes foram identificadas como os elementos da envoltória por onde se perde mais calor em base anual, seguida pelo pavimento térreo. Foram propostas algumas medidas para a redução do consumo de energia do edifício. O Quadro 6 apresenta um resumo das medidas propostas e simuladas nos *softwares Design Builder* e *EnergyPlus* com seus respectivos impactos na redução do consumo anual de energia.

²¹ SANTOS, C.A.P.; MATIAS, L. **Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios**. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), 2006. 171 p.

Quadro 6: Redução simulada no consumo de energia anual das medidas aplicadas para um estudo de caso de um edifício histórico da cidade de Évora

Medidas propostas	Redução no consumo anual de energia
Medida 1: Aplicação de isolamento térmico nos pavimentos utilizando placa de EPS com 40 mm de espessura	0,74%
Medida 2: Aplicação de isolamento térmico na cobertura utilizando placa de EPS com 40 mm e placa de madeira OSB com 20 mm	2,00%
Medida 3: Isolamento térmico refletor na cobertura com coeficiente de condutividade térmica de 0,028 W/m.°C e emissividade de 0,2	2,11%
Medida 4: Substituição de vidros simples de 4mm de espessura por vidros duplos de 6 mm de espessura com caixa de ar de 13 mm de espessura	0,54%
Medida 5: Isolamento térmico das paredes pelo interior empregando placa de EPS com 40 mm de espessura	4,02%
Medida 6: Aplicação das medidas de 1 a 5 simultaneamente	11,01%
Medida 7: Ventilação natural	1,07%
Medida 8: Substituição de computadores fixos por modelos portáteis de maior eficiência e menor potência	9,52%
Medida 9: Aplicação de sensores de presença no sistema de iluminação	9,84%
Medida 10: Geração fotovoltaica de eletricidade empregando 18 módulos com 28,92 m ² de área e 4,32 kW de potência de pico	Entre 14 e 16% nos primeiros 25 anos.
Medida 6 + medidas de 7 a 10 simuladas simultaneamente	32,98%

Fonte: Adaptado a partir de dados de Jorge (2013).

Uma observação importante a se realizar sobre o Quadro 6 é que a redução no consumo anual de energia obtida pela combinação de medidas não corresponde à soma das reduções conseguidas com a aplicação individualizada de cada medida; isso ocorre porque as transferências de calor relacionadas a cada medida não estão desacopladas.

4.3.2 Edifício de serviços da cidade de Setúbal (Portugal)

Duarte (2014) realizou um estudo de caso com um edifício de serviços da cidade de Setúbal. O edifício é constituído por oito andares, sendo sete acima do nível do solo e um abaixo. As fachadas são orientadas segundo as quatro direções da rosa dos ventos, sendo a fachada principal orientada para o Sul. A área útil total é de 4041,3 m², dividida em escritórios, estabelecimentos de saúde, espaços de estacionamento, armazém e cozinha.

Na caracterização da envoltória exterior opaca, o autor adotou simplificações propostas nas notas técnicas NT-SCE-01²² e ITE 50 pelo fato de não existirem elementos relativos às soluções construtivas empregadas no edifício. Conduzindo desta forma, foram determinadas as espessuras e coeficientes de transmitância térmica das paredes (U variando de 0,96 a 1,78 W/m².°C), cobertura (U = 1,84 W/m².°C) e sistema de pisos dos pavimentos (U variando de 2,21 a 3,1 W/m².°C). Posteriormente foram caracterizadas as aberturas envidraçadas, através da indicação do tipo de caixilharia empregada, tipo de vidro, espessuras, presença de elemento de sombreamento, coeficientes de transmitância térmica e fator solar. Todos os vidros empregados são do tipo simples e apresentaram coeficientes de transmissão térmica variando de 3,9 a 4,3 W/m².°C e fatores solares variando de 0,29 a 0,55.

Na sequência, foi caracterizado o sistema de climatização e unidades de tratamento de ar com a respectiva indicação de marca, modelo, localização no edifício, capacidade de refrigeração, capacidade de aquecimento, coeficientes de desempenho, tipos de fluidos refrigerantes empregados, perfil horário de utilização dos equipamentos, entre outros dados. Em seguida, procedeu-se a caracterização do sistema de iluminação com indicação de tipos de luminárias, potências e perfil horário de utilização. Posteriormente, procedeu-se a caracterização dos equipamentos, os quais foram agrupados em equipamentos de movimentação de pessoas e cargas, sistemas de informática e telecomunicações, produção de água quente sanitária e demais equipamentos, os dados coletados referem-se à marca, modelo, localização no edifício, potência e perfil de utilização.

Em seguida, procedeu-se a caracterização climática do local do edifício empregando-se normais climatológicas²³ para um período de 30 anos a partir do qual foi possível estimar o perfil de variação média da temperatura do ar ao longo do ano. O perfil de consumo energético do edifício foi determinado pela análise de faturas de energia elétrica para um período de três anos consecutivos.

Após o levantamento das características construtivas, sistemas de climatização, sistemas de iluminação, equipamentos, perfis de utilização, caracterização do clima local e determinação do perfil de consumo de energia, baseado no faturamento, procedeu-se à modelagem do edifício. Um modelo geométrico do edifício foi construído com o auxílio do *software Google Sketchup*. Para a criação do modelo foi utilizada a ferramenta *OpenStudio*,

²² PORTUGAL. Despacho n.º 11020: Parte I, de 30 de abril de 2009. **DIÁRIO DA REPÚBLICA**, Lisboa, 30 abr. 2009. 2ª série, nº84, p. 17410.

²³ De acordo com o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2019), a Organização Meteorológica Mundial (OMM) define o termo “normais climatológicas” como sendo os valores médios dos dados climatológicos calculados para um período de tempo relativamente longo e uniforme, compreendendo no mínimo três décadas consecutivas.

a qual permite criar zonas térmicas, inserir outras características da edificação e realizar a simulação energética empregando os algoritmos e equacionamentos do *software EnergyPlus*.

A validação do modelo foi realizada por meio da comparação do consumo de energia previsto pela simulação com a média do consumo de energia faturado para três anos consecutivos. O modelo é considerado calibrado se a diferença entre o consumo de energia previsto pela simulação e o consumo médio faturado não for superior a 10%.

Após a calibração do modelo, realizaram-se estudos de partição do consumo de energia do edifício, no qual foi verificado que a climatização é responsável por 57% do consumo, seguida pela iluminação com 22% e equipamentos com 21%. Após os estudos de partição de energia e desempenho energético para atribuição de etiqueta de eficiência energética, foram propostas cinco medidas para reduzir o consumo de energia. A especificação das medidas propostas com as respectivas reduções alcançadas no consumo anual de energia encontram-se detalhadas no Quadro 7.

Quadro 7: Medidas e estratégias propostas por Duarte (2014) e respectiva redução no consumo de energia

Medidas	Redução no consumo anual de energia (%)
Medida 1: Instalação de unidade de geração fotovoltaica com 24 kW de potência de pico, composta por 96 módulos de painéis de silício policristalino marca EDP e 2 inversores SMA STP 10000TL	7,60
Medida 2: Substituição do sistema de iluminação baseado em lâmpadas fluorescentes por iluminação com lâmpadas LED, reduzindo a potência total de 32897 W para 26825 W	7,06
Medida 3: Substituição de todos os envidraçados da envoltória por painéis de vidro com melhores características. Foi proposto um vidro duplo de marca Saint-Gobain Glass modelo SGG COOL-LITE ST 108 com coeficiente de transmissão térmica de 1,10 W/m ² .°C e fator solar de 0,08 com caixa de ar de 15 mm e preenchimento com gás argônio	20,49
Medida 4: Aplicação de um sistema composto de isolamento térmico pelo exterior (<i>External Thermal Insulation Composite System – ETICS</i>). Consiste na aplicação de uma placa de poliestireno expandido moldado (EPS) com espessura de 50 mm e três camadas de argamassa, uma de argamassa de colagem sobre a base e o restante de argamassa de revestimento separadas por rede de reforço em fibra de vidro de 3,5 mm de espessura	13,29
Medida 5: Medidas de 1 a 4 simuladas simultaneamente	47,03

Fonte: Adaptado a partir de dados de Duarte (2014).

4.3.3 Estudos de caso da aplicação do conceito de nZEB em climas quentes

Pacheco e Lamberts (2013) realizaram estudos sobre a viabilidade técnica e econômica (utilizando taxa interna de retorno) para a implantação de sistemas de geração fotovoltaica em residências familiares brasileiras, utilizando como referência as cidades de Belo Horizonte e Florianópolis. Diversas variáveis foram consideradas na análise econômica, entre elas, taxas de juros, para financiamento (variando de 4 a 100%) e custos de aquisição e instalação do sistema fotovoltaico (variando de 1000 a 2500 EUR/kW). Os autores concluíram que há viabilidade para Florianópolis, para toda a faixa de custo de aquisição e instalação, quando a taxa de juros é menor ou igual a 6% e para Belo Horizonte a viabilidade ocorre se a taxa de juros for menor ou igual a 8%. Quanto à viabilidade técnica, os autores concluíram que as áreas de telhado das residências brasileiras são mais que suficientes para que o sistema fotovoltaico gere o montante de energia elétrica necessário para cobrir o consumo anual de energia elétrica, sendo que foram necessárias apenas 36 e 40% da área total de telhado, respectivamente, para as cidades de Belo Horizonte e Florianópolis.

Rattanogphisat e Rordprapat (2014) estudaram o projeto de edifícios residenciais e comerciais em climas quentes, além de realizarem um estudo de caso em um edifício na Tailândia. Por meio de simulações os autores concluíram que, trocando o material da envoltória do edifício estudado (concreto oco) para concreto arejado, poder-se-ia reduzir o consumo anual de energia em até 28%. Os autores também destacaram ser possível reduzir o consumo de energia do edifício por meio da utilização de sombreamento em janelas e ventilação natural.

AlAjmi *et al.* (2015) estudaram os impactos econômicos e ambientais da conversão de um edifício institucional de tamanho médio para um edifício de energia líquida zero (NZEB) nas condições climáticas do Kuwait (quente e árido). O estudo foi conduzido em duas fases principais:

- A primeira fase consistiu em aumentar a eficiência energética do edifício reduzindo seu consumo de energia para o valor mais baixo possível. Isso foi realizado por meio da proposição e aplicação de medidas de eficiência energética apropriadas, as quais foram validadas por meio de dados coletados e simulações utilizando o *software EnergyPlus*;

- A segunda fase consistiu na integração de sistemas de energia solar (sistema de geração fotovoltaica e sistemas de refrigeração por absorção de energia solar) propostos e simulados usando o programa TRNSYS (*Transient System Simulation Tool*) para atingir o padrão NZEB em base anual e mensal.

Foram propostas três medidas de eficiência energética: (1) desligamento de *chiller* durante períodos sem ocupação, (2) cronograma apropriado de funcionamento do sistema de iluminação e operação de equipamentos, (3) aumento da espessura de isolamento do telhado em 2,5 cm. As medidas levaram a economias anuais de energia, respectivamente, de 21,2%; 3,8% e 2%. A quantidade de dióxido de carbono equivalente evitado, em base anual, foi de 454,6 toneladas e o maior período de *payback*, verificado para a medida 3, foi de 0,9 anos.

5 MATERIAL E MÉTODO

Neste capítulo é realizada uma descrição dos procedimentos adotados na elaboração de um modelo de base de um edifício residencial típico da região sudeste do Brasil. Também, são descritos alguns procedimentos utilizados nas simulações computacionais do modelo de base de edifício residencial, principalmente no que se refere às características de funcionamento do *EnergyPlus* (as quais influenciam a seleção de dados de entrada para a descrição do edifício). É realizada, também, a caracterização climática da cidade de Taubaté (cidade escolhida como localidade para a declaração do arquivo climático no *EnergyPlus*) juntamente com a determinação das condições de conforto térmico.

5.1 VISÃO GERAL DA CARACTERIZAÇÃO DA EDIFICAÇÃO E DO MODELO DE BASE

Após o estudo da literatura e entendimento do conceito de edifício de energia zero e das estratégias necessárias para o atingimento deste padrão, foi escolhido o programa de simulação a ser utilizado e a localização do edifício a ser simulado energeticamente. O programa de simulação escolhido foi o *EnergyPlus* versão 9.0, o qual consiste em um *software* projetado, distribuído e atualizado periodicamente pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE). A descrição do edifício no *EnergyPlus* é realizada a partir de um grande conjunto de dados de entrada. Além dos dados que caracterizam o edifício, é necessária a declaração de um arquivo de dados climáticos. Arquivos climáticos legíveis pelo *EnergyPlus* são disponibilizados na página eletrônica (<https://energyplus.net/>) de *download* do programa de simulação e não estão disponíveis para todas as cidades do Vale do Paraíba. Após considerar algumas variáveis como altitude e latitude, optou-se pela escolha de um arquivo climático da cidade de Taubaté; tal escolha justifica-se pela indisponibilidade de arquivos climáticos para todas as cidades do Vale do Paraíba e, também, pela similaridade de variáveis climáticas com outras cidades da região.

Após a escolha do programa de simulação e localidade para o arquivo climático se procedeu à definição de um modelo de base de edifício residencial convencional para a realização das simulações energéticas. Devido às dificuldades em se encontrar dados detalhados referentes às características de operação (como, por exemplo, materiais que constituem a envoltória, perfil de ocupação, cronogramas de funcionamento de sistemas, densidade de potência de iluminação e equipamentos, histórico do consumo de energia

elétrica em uma base temporal de, pelo menos, 3 anos) de edifícios reais de cidades do Vale do Paraíba e, também, devido ao fato de o objetivo do trabalho ser delinear estratégias para o atingimento do padrão de edifício de energia zero com uma abordagem generalizada, ao invés de se fazer um estudo de caso, optou-se por construir um modelo de base de edifício residencial a partir de dados estatísticos sobre as características das edificações residenciais brasileiras disponíveis na literatura.

A partir do estudo de dados estatísticos sobre as características de unidades habitacionais brasileiras (Capítulo 2) foi possível determinar a área útil média dos apartamentos, a quantidade de quartos, a quantidade de suítes, a quantidade de banheiros, a quantidade de pavimentos-tipo de maior frequência em edificações residenciais, o material construtivo mais frequentemente empregado nas paredes, o tipo de vidro mais frequentemente utilizado nas aberturas, dentre outras características.

As informações obtidas com o estudo das características dos edifícios residenciais brasileiros foram utilizadas para a elaboração, empregando-se o AutoCAD 2018 versão estudante, de uma planta baixa de um pavimento tipo do modelo de base de edifício residencial para a simulação energética. Após a elaboração da planta baixa do pavimento tipo foram realizadas simplificações na planta considerando as premissas relacionadas à etapa de zoneamento térmico e visando simplificar a declaração de dados geométricos do modelo de base no *EnergyPlus*. A definição detalhada das considerações adotadas e dos parâmetros utilizados para a especificação do modelo de base de edifício residencial é realizada na seção 5.4.

5.2 CARACTERÍSTICAS DO *ENERGYPLUS*

De acordo com Guerreiro (2016) e Rodrigues (2015), uma simulação dinâmica de edifício consiste na previsão de consumos de energia correspondentes ao funcionamento e respectivos sistemas energéticos do edifício. A simulação deve considerar a evolução de todos os parâmetros relevantes para a descrição do edifício com uma precisão adequada, numa base temporal pelo menos horária para diferentes zonas térmicas e condições climáticas de um ano de referência.

Para a realização de simulação dinâmica de edifícios deve ser utilizado um programa certificado pelos critérios da norma ASHRAE 140²⁴. Um dos programas certificados é o

²⁴ ASHRAE Standard 140, **Standard method of test for the evaluation of building energy analysis computer programs**, American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers, Atlanta, 2004.

EnergyPlus (GUERREIRO, 2016; RODRIGUES, 2015), o qual será utilizado para as simulações dinâmicas neste trabalho.

Para a realização de simulações no *EnergyPlus* é necessária a declaração de uma grande quantidade de variáveis que descrevem as características do edifício quanto a sua geometria, orientação das fachadas, materiais construtivos, cargas térmicas, densidades de potência de iluminação e equipamentos, carga e perfil de ocupação, cronogramas de utilização de sistemas, dentre outras. Além da declaração de variáveis para a descrição do edifício é necessária a declaração de um arquivo climático de um ano meteorológico típico²⁵ (TMY - *Typical Meteorological Year*) legível pelo *software* de simulação do *EnergyPlus*, os quais são disponibilizados na página eletrônica de *download* do programa de simulação.

De acordo com DOE (2018a) e Guerreiro (2016), o *EnergyPlus* (lançado em abril de 2001) combina funcionalidades de seus programas antecessores *BLAST* (*Building Loads Analysis and System Thermodynamics*) e DOE-2, ambos desenvolvidos e lançados no final da década de 1970 e início da década de 1980 pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE). Consiste em um *software* de licença livre para simulação de cargas térmicas e análises energéticas de edificações baseando-se na descrição das características do edifício fornecidas pelo usuário. Dentre outras, o *EnergyPlus* apresenta as funcionalidades listadas a seguir:

- **Solução simultânea integrada:** na qual a resposta da edificação e sistemas primários e secundários são fortemente acoplados;
- **Passos de tempo sub-horários definíveis pelo usuário:** para a interação entre as zonas térmicas e o ambiente;
- **Arquivos de entrada e saída de condições climáticas ambientes no formato ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*);**
- **Soluções baseadas em balanço de calor:** as quais consideram simultaneamente efeitos radiantes e convectivos nas superfícies interiores e exteriores durante a simulação para cada passo de tempo;
- **Condução transiente de calor através dos elementos da envoltória;**
- **Modelamento avançado de transferência de calor para o solo;**
- **Transferência combinada de calor e massa:** considera adsorção e dessorção de umidade;

²⁵ De acordo com Huld *et al.* (2018), um ano meteorológico típico (TMY) consiste de um ano de dados climáticos selecionados a partir de uma longa série de dados (normalmente superior a 10 anos). O TMY é construído escolhendo-se os dados climáticos mensais mais frequentemente encontrados entre anos diferentes

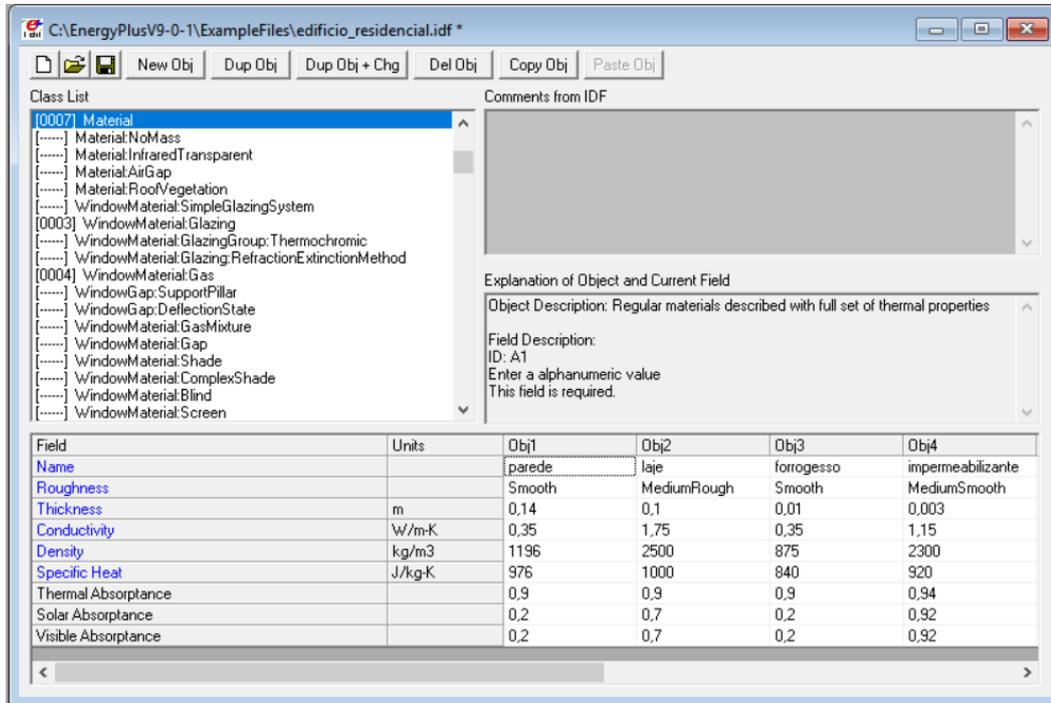
- **Modelos de conforto térmico:** baseados na atividade metabólica, temperatura de bulbo seco interna, umidade, entre outros;
- **Modelo anisotrópico do céu:** para cálculos avançados de radiação solar difusa sobre superfícies inclinadas;
- **Cálculos avançados de fenestração:** incluindo cortinas controláveis de janelas, envidraçados eletrocromicos, balanço de calor camada por camada para painéis de vidros, biblioteca com propriedades de vidros comerciais, entre outras;
- **Controles de iluminação natural:** incluindo cálculos de iluminação interior, simulação e controle de brilho, efeito da redução da iluminação artificial sobre as cargas de resfriamento e aquecimento;
- **Sistemas configuráveis de HVAC (*Heating, ventilation and air conditioning*);**
- **Cálculo de poluentes atmosféricos:** que predizem as emissões evitadas de CO₂, SO_x, NO_x, CO, material particulado e hidrocarbonetos associadas à conservação de energia.

A entrada de dados no *EnergyPlus* é feita por meio de uma interface gráfica denominada “*EP-Launch*”, a qual consiste em um aplicativo do tipo GUI (*Graphics User Interface*) projetado para auxiliar os usuários do *EnergyPlus* a executarem suas simulações de modo mais prático. A entrada de dados para a descrição do edifício é feita no *EP-Launch* através da ferramenta *IDF – Editor (Input Data File Editor)*. O aspecto geral da entrada de dados para a descrição do edifício no *IDF – Editor* é apresentado na Figura 6.

Para uma utilização adequada do *EnergyPlus* existem algumas etapas a serem seguidas. Numa primeira fase constrói-se o modelo geométrico do edifício com a definição das zonas térmicas, definem-se os materiais que constituem os elementos internos e elementos da envoltória, declaram-se os parâmetros que definem o interior (perfis de ocupação e utilização, iluminação, equipamentos, limites de temperaturas de conforto térmico, infiltração, entre outros) e o exterior (localização, orientações, arquivo climático, entre outros). Em seguida, dá-se a transferência de dados da descrição para dois módulos, os quais são: o módulo de simulação do balanço térmico e o módulo de sistemas. A simulação inicia-se com a atualização das condições relativas à descrição do modelo por parte do módulo de simulação de balanço térmico. Os resultados obtidos funcionam posteriormente como dados de entrada para o módulo de sistemas onde são determinadas as cargas de aquecimento e refrigeração para cada *timestep* definido. Esta informação é reencaminhada para o módulo de simulação do

balanço térmico que irá atualizar as condições referentes a cada zona no *timestep* seguinte, e assim sucessivamente (GUERREIRO, 2016).

Figura 6: Exemplo de declaração de dados de entrada para a descrição do edifício no *EnergyPlus*



Fonte: Variáveis declaradas pelo autor no arquivo de entrada de dados do *EP – Launch* (2019).

Para fins de exemplificação, a equação (8), (DOE, 2018b), demonstra a forma como o *EnergyPlus* realiza o cálculo do balanço do fluxo de calor para uma zona em cada *timestep*.

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z) + \dot{Q}_{sys} \quad (8)$$

Em que:

$C_z \frac{dT_z}{dt}$: Energia armazenada no ar da zona

$\sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i$: Soma das cargas convectivas internas

$\sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i (T_{si} - T_z)$: Transferência convectiva de calor através das superfícies da zona

$\sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z)$: Transferência de calor devido a misturas de ar entre zonas

$\dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z)$: Transferência de calor devido à infiltração de ar externo

\dot{Q}_{sys} : Carga térmica do sistema de aquecimento, ventilação e condicionamento de ar

É possível fazer a seleção no *IDF-Editor* dos tipos de relatórios de saída que se deseja visualizar. Resumidamente, há quatro tipos de arquivos de saída, os quais são: arquivos de saída de texto, representações em 3D do modelo legíveis na extensão *dwg*, planilhas e arquivos com extensão *HTML*. Descrições mais detalhadas dos tipos de arquivos de saída que podem ser obtidos após a simulação, bem como dos equacionamentos e algoritmos empregados no *EnergyPlus* podem ser encontradas nos documentos: “*Engineering reference*”, “*Getting started*” e “*Output details and examples*” (DOE, 2018a; DOE,2018b; DOE, 2018c).

5.3 CARACTERIZAÇÃO CLIMÁTICA E ANÁLISE DAS CONDIÇÕES DE CONFORTO TÉRMICO PARA A CIDADE DE TAUBATÉ

Segundo Silva (2015), projetar residências que permitam aos moradores realizarem qualquer atividade em condições de conforto térmico constitui um dos principais objetivos de engenheiros e arquitetos, pois o desconforto térmico pode proporcionar baixo desempenho no trabalho além de sintomas indesejáveis, como dor de cabeça e cansaço.

O conforto térmico depende de uma combinação de fatores tais como metabolismo, resistência térmica de vestimentas, temperatura de bulbo seco, umidade do ar, velocidade do ar e temperatura radiante média. Esse conjunto de variáveis está relacionado ao material da envoltória, à cor das paredes, às dimensões e orientação de aberturas, entre outros (SILVA, 2015).

Nas seções seguintes é realizada a caracterização climática da cidade de Taubaté e a definição das condições de conforto térmico por meio da utilização da carta bioclimática de Givoni, da forma sugerida pela norma NBR 15220 (ABNT, 2003).

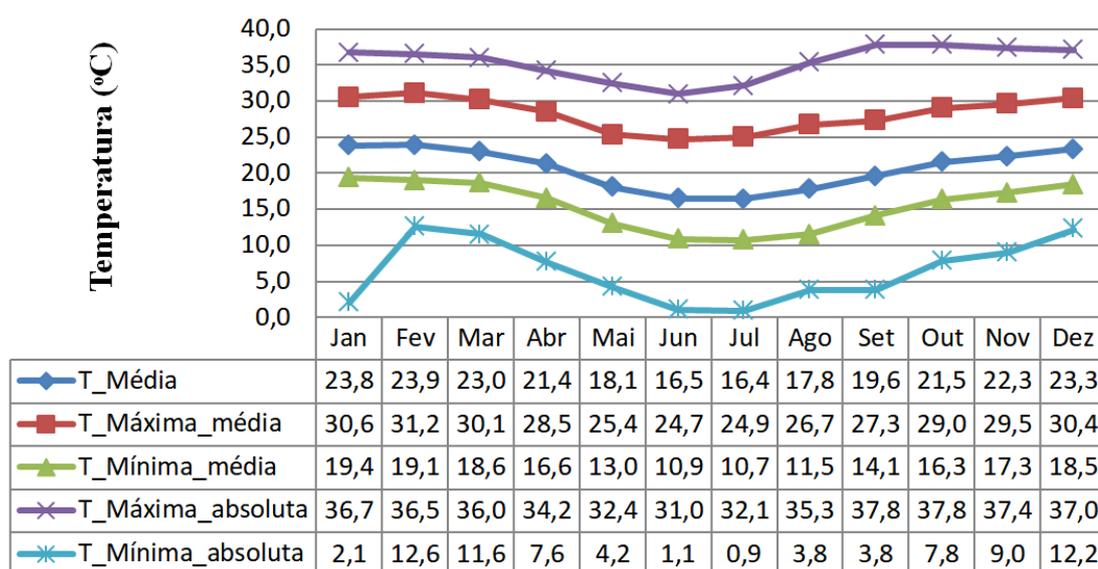
5.3.1 Normais climatológicas para a cidade de Taubaté

Segundo Duarte (2014) e INMET (2019), a caracterização climática de uma dada região é feita através dos valores médios de variáveis climáticas para um período de 30 anos. Tais valores médios são denominados de normais climatológicas e são utilizados para definir o Ano Meteorológico Típico (TMY- *Typical Meteorological Year*). Tal procedimento é convencionalizado pela Organização Meteorológica Mundial (OMM). Os valores das normais climatológicas são calculados num intervalo de 30 anos iniciando-se pelo primeiro ano de cada década. Para a caracterização climática da cidade de Taubaté se utilizou dados de normais climatológicas do período compreendido entre 1981 a 2010 disponibilizadas na página eletrônica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2019).

Segundo informações climáticas disponibilizadas na página eletrônica do Wether Spark (2019), em Taubaté, o verão é quente, abafado, com precipitação e de céu frequentemente encoberto; o inverno é curto, agradável e de céu quase sem nuvens. Ao longo do ano, em geral a temperatura varia de 12 a 31 °C e raramente é inferior a 9 °C ou superior a 35 °C. A estação quente permanece por 3,7 meses, de 30 de novembro a 20 de março, com temperatura máxima média diária acima de 29 °C. O dia mais quente do ano é 13 de fevereiro, cuja temperatura máxima média é de 31 °C e a mínima média é de 20 °C. A estação fresca permanece por 2,8 meses, de 13 de maio a 6 de agosto, com temperatura máxima diária em média abaixo de 26 °C. O dia mais frio do ano é 20 de julho, com média de 12 °C para a temperatura mínima e 25 °C para a máxima.

A Figura 7 apresenta as temperaturas médias do ar para um ano meteorológico típico estimado a partir de 30 anos de dados meteorológicos (de 1981 a 2010), obtidas na página eletrônica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2019).

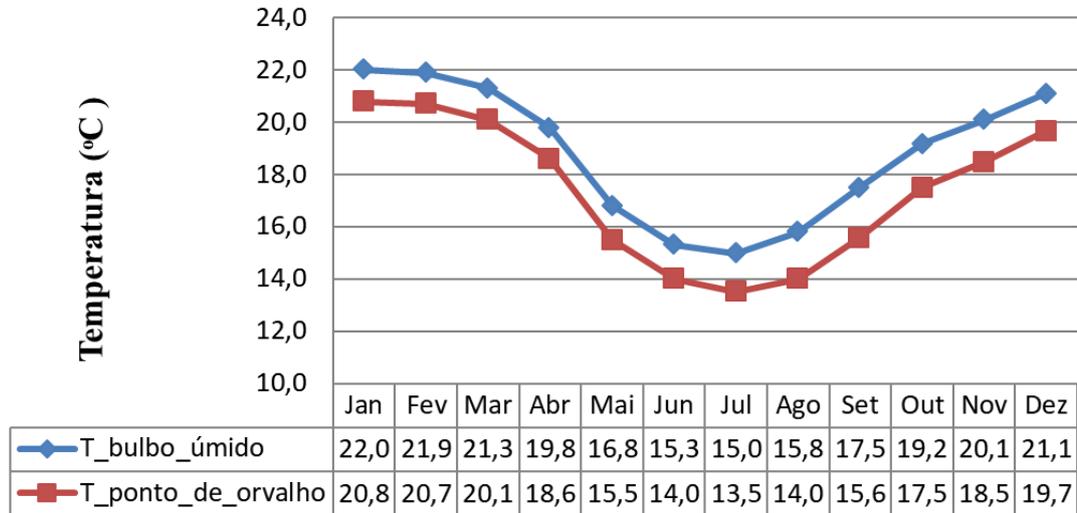
Figura 7: Valores de temperaturas médias do ar da cidade de Taubaté para um ano meteorológico típico



Fonte: Adaptado a partir de dados de INMET (2019).

Outras variáveis que serão importantes na descrição do modelo de base de edifício residencial no *EnergyPlus*, principalmente na definição de características de operação dos sistema de ar condicionado, são as temperaturas de bulbo úmido e ponto de orvalho apresentadas na Figura 8.

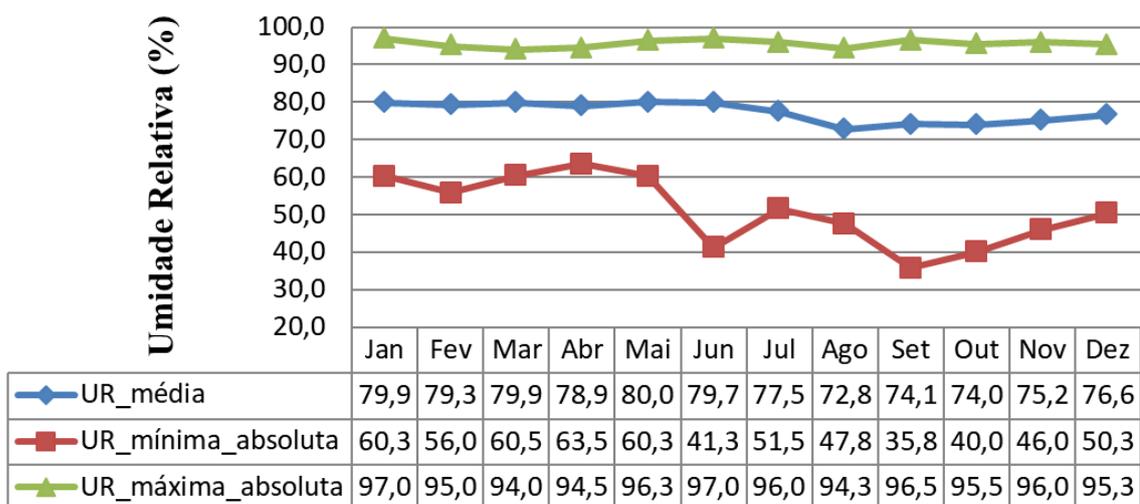
Figura 8: Valores de temperaturas médias de bulbo úmido e ponto de orvalho para a cidade de Taubaté em um ano meteorológico típico



Fonte: Adaptado a partir de dados de INMET (2019).

Uma variável bastante importante para a descrição de condições de conforto térmico é a umidade relativa do ar. Valores de umidade relativa média do ar para a cidade de Taubaté para um ano meteorológico típico são apresentados na Figura 9.

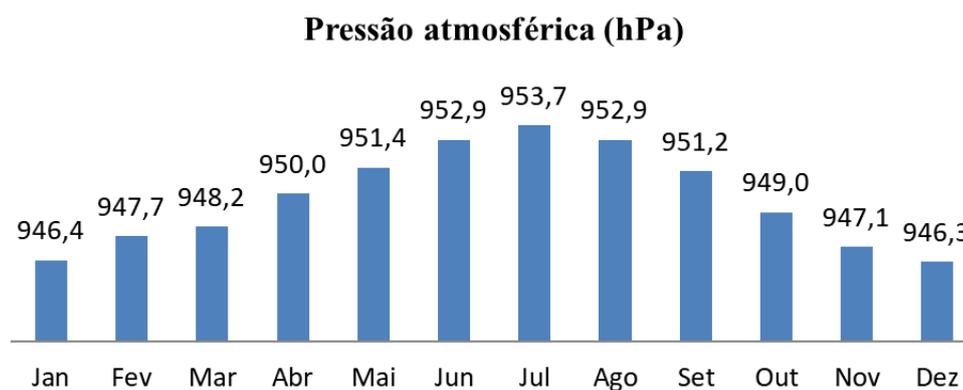
Figura 9: Valores de umidade relativa média para a cidade de Taubaté em um ano meteorológico típico



Fonte: Adaptado a partir de dados de INMET (2019).

A pressão atmosférica local é uma variável de grande importância para a descrição das características climáticas, uma vez que sua variação interfere em fenômenos como formação de ventos, formação de núvens e precipitações pluviométricas. A Figura 10 apresenta a variação média da pressão atmosférica para a cidade de Taubaté para um ano meteorológico típico.

Figura 10: Valores da pressão atmosférica para a cidade de Taubaté em um ano meteorológico típico



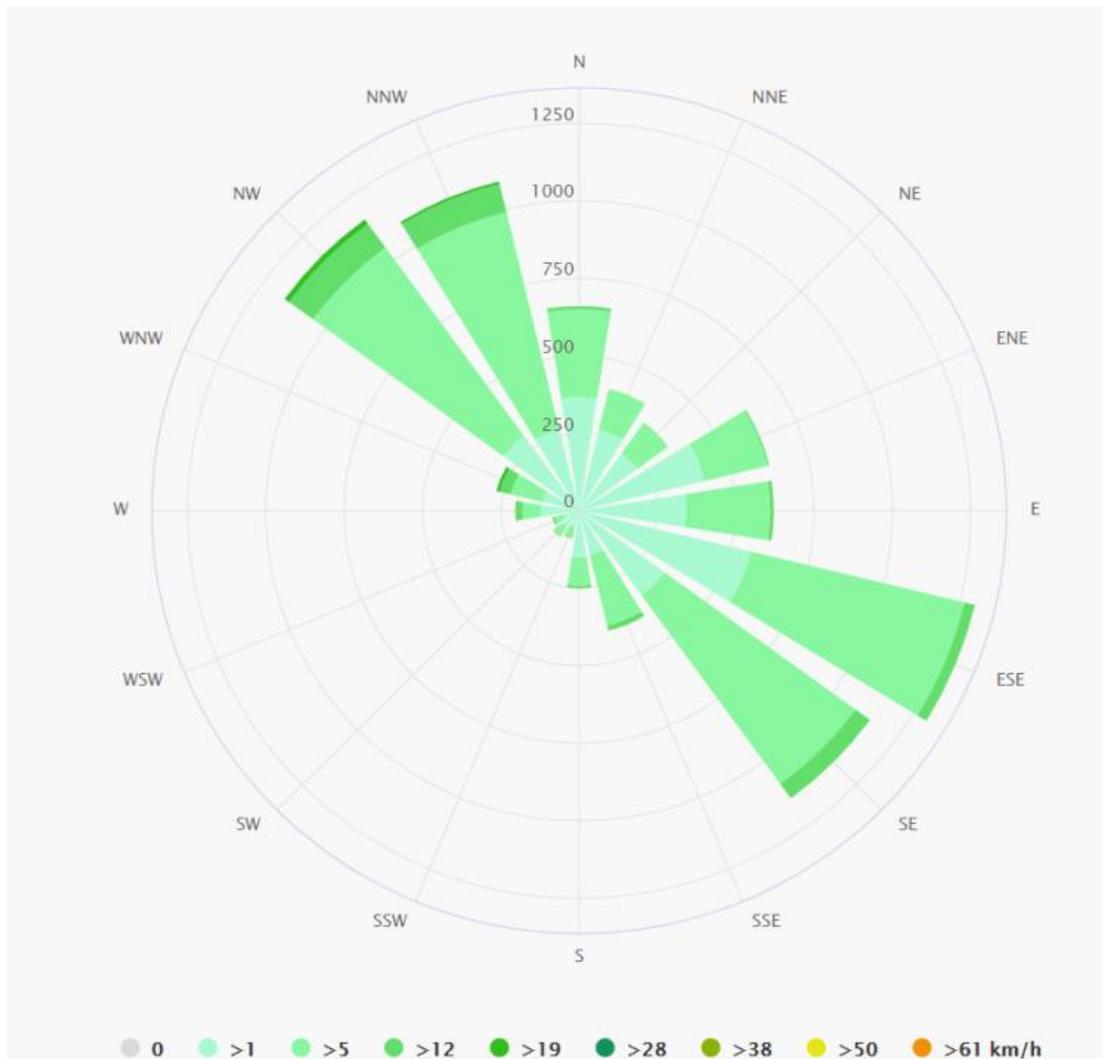
Fonte: Adaptado a partir de dados de INMET (2019).

O conhecimento da direção e velocidade do vento é importante para a elaboração de um bom projeto de vedação da envoltória a fim de se prevenir infiltrações indesejadas de ar. Esse conhecimento é, também, importante para o correto planejamento de sistemas de ventilação natural e para o estudo de viabilidade da instalação de sistemas de geração eólica local.

De acordo com dados de WETHER SPARK (2019) A sensação de vento em um dado local é fortemente dependente da topografia, entre outros fatores. A velocidade e direção instantânea do vento em um dado local variam mais que as médias horárias desses valores. A velocidade horária média do vento em Taubaté apresenta variações sazonais pequenas ao longo do ano; a época com ocorrência de ventos mais fortes dura 4,7 meses (de 3 de agosto a 24 de dezembro), com velocidades do vento acima de 8,9 km/h. O dia que registra ventos mais fortes é 23 de setembro, com ventos atingindo 10,1 km/h de velocidade média horária. A época com ocorrência de ventos mais fracos do ano dura 7,3 meses (de 24 de dezembro a 3 de agosto). O dia com vento mais fracos no ano é 24 de fevereiro, no qual a velocidade média horária é de 7,7 km/h.

A Figura 11 apresenta a rosa dos ventos (recurso gráfico que mostra o número de horas em que o vento sopra em uma determinada direção para uma localidade) para a cidade de Taubaté para um ano meteorológico típico.

Figura 11: Número de horas para a qual o vento sopra em uma determinada direção em um ano meteorológico típico para a cidade de Taubaté



Fonte: Meteoblue (2019).

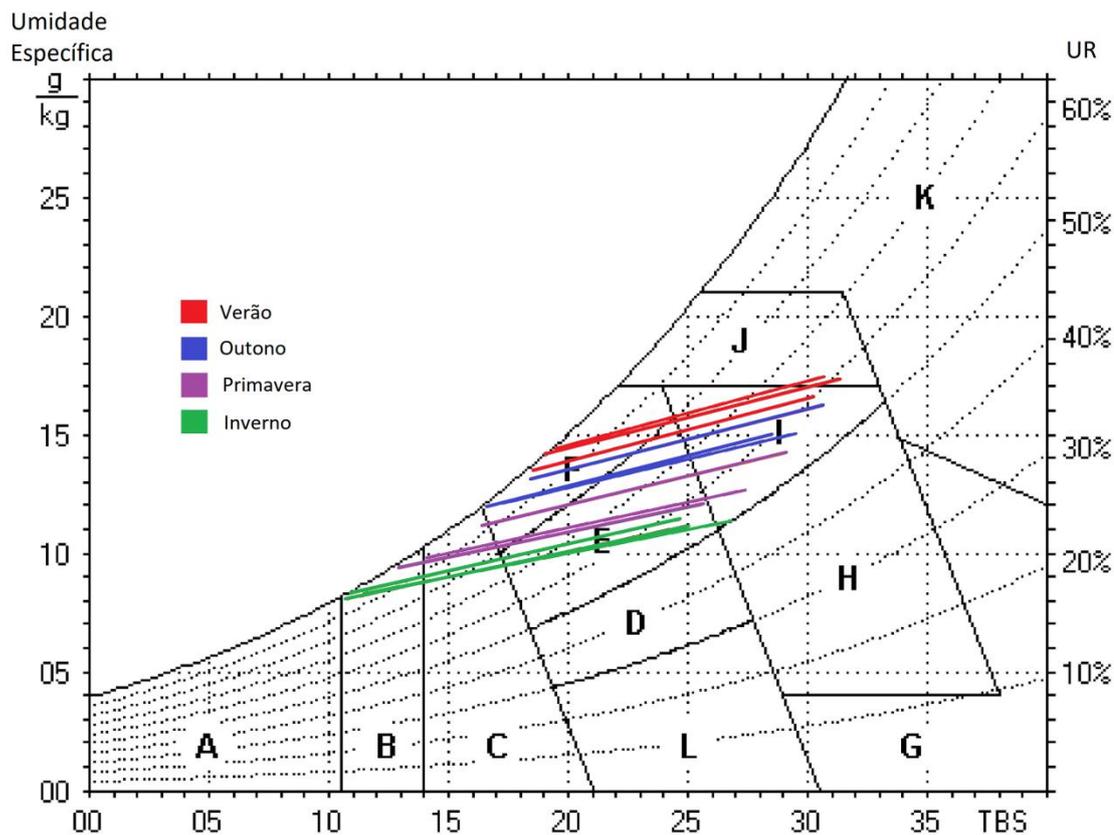
Os fluxos de calor na envoltória do pavimento térreo são fortemente dependentes da temperatura do solo. Assim, essa variável é importante na descrição do ambiente externo ao edifício. Valores de temperatura média do solo calculados para um ano típico para a cidade de Taubaté podem ser encontrados no Apêndice J.

5.3.2 Determinação da carta bioclimática para a cidade de Taubaté e análise das recomendações de estratégias bioclimáticas

A norma brasileira NBR 15220 (ABNT, 2003) estabelece o zoneamento bioclimático brasileiro e faz recomendações quanto à utilização de estratégias bioclimáticas para a obtenção de conforto térmico. O território brasileiro foi dividido em oito zonas bioclimáticas relativamente homogêneas em relação ao clima, a cidade de Taubaté se caracteriza como pertencente a zona bioclimática Z3 (Apêndice K).

O método de análise do conforto térmico estabelecido pela norma NBR 15220 (ABNT, 2003) consiste na utilização e adaptação do conceito de carta bioclimática de Givoni. A partir dos valores de temperaturas máximas e mínimas médias mensais para a cidade de Taubaté (Figura 7), valores médios mensais de umidade (Figura 9) e seguindo-se as recomendações da norma NBR 15220 (ABNT, 2003), foi construída a carta bioclimática para a cidade de Taubaté, da forma como apresentado na Figura 12 (as etapas detalhadas do procedimento adotado podem ser encontradas no Apêndice K).

Figura 12: Carta bioclimática para a cidade de Taubaté



Fonte: Adaptado de NBR 15220 (2003).

Na Figura 12 as regiões da carta bioclimática são definidas conforme a seguir:

- A : zona de aquecimento artificial (calefação);
- B : zona de aquecimento solar passivo da edificação;
- C : zona de massa de armazenamento térmico para aquecimento;
- D : zona de conforto térmico para baixas umidades;
- E : zona de conforto térmico;
- F : zona de desumidificação (renovação do ar);
- G e H : zona de resfriamento evaporativo;
- H e I : zona de massa térmica de refrigeração;
- I e J : zona de ventilação;
- K : zona de refrigeração artificial;
- L : zona de umidificação do ar.

Utilizando os procedimentos definidos na norma NBR 15220 (ABNT, 2003) (Apêndice K) é possível, a partir da Figura 12, determinar, aproximadamente, o número de horas por ano, em taxa percentual, em que uma determinada estratégia bioclimática deve ser utilizada para se atingir condições de conforto térmico. O Quadro 8 apresenta uma síntese dos resultados obtidos por meio da aplicação dos procedimentos descritos no Apêndice K, para as faixas de valores indicadas na Figura 12.

Quadro 8: Síntese da utilização de estratégias bioclimáticas para a cidade de Taubaté ao longo de um ano meteorológico típico

Condicionamento do ambiente	Estratégias para obtenção de conforto térmico	Participação (%)	Total (%)
Refrigeração	F (desumidificação)	23,4	48,2
	I e J (ventilação)	24,8	
Conforto térmico	E (nenhuma estratégia)	37,8	37,8
Aquecimento	B (aquecimento solar passivo)	4,9	14,0
	C (massa térmica)	9,1	

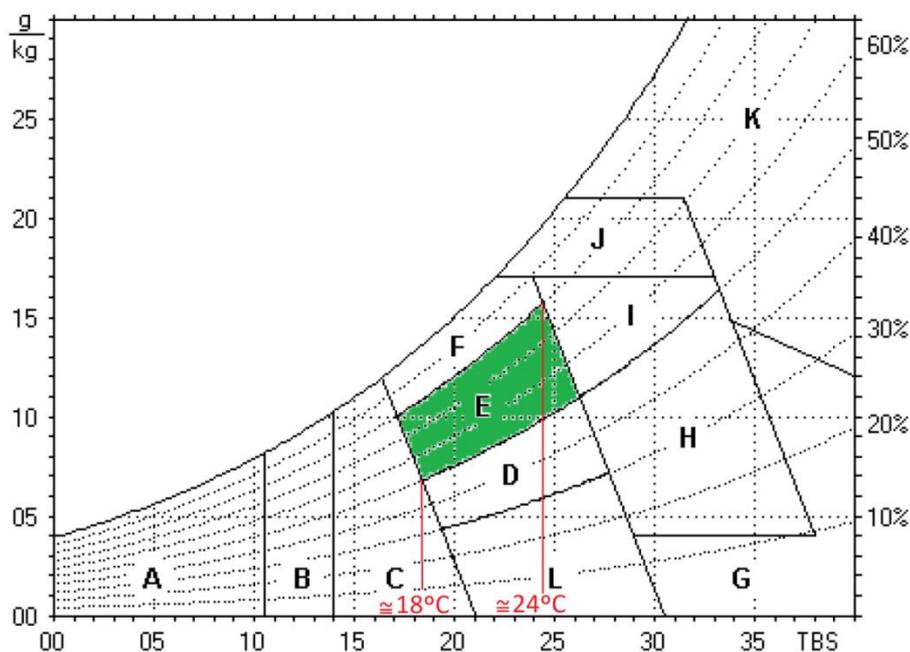
Fonte: Elaborado pelo autor.

Como pode ser observado a partir do Quadro 8, na cidade de Taubaté praticamente em metade do ano (48,2% do tempo) há a necessidade da utilização de estratégias de refrigeração dos ambientes internos para a obtenção de condições de conforto térmico. O aquecimento é requerido em apenas 14% do tempo ao longo do ano, tal fato demonstra que a utilização de estratégias passivas que reduzem os ganhos de calor para os ambientes internos, e/ou que aumentem a remoção de calor dos ambientes internos das edificações representam um grande potencial de redução do consumo de energia com climatização artificial de ambientes, em detrimento de estratégias que favoreçam uma maior manutenção de cargas térmicas internas.

5.3.3 Determinação das condições médias de conforto térmico para a cidade de Taubaté utilizando a carta bioclimática

A umidade relativa média para a cidade de Taubaté varia, ao longo do ano, de valores próximos a 80%, em meses característicos de verão, para valores próximos a 70%, para meses característicos de inverno (Figura 9). A umidade relativa absoluta varia de valores em torno de 50% até valores em torno de 95% (Figura 9). A Figura 13 apresenta uma carta bioclimática, na qual é destacada em verde a zona de conforto térmico em ambientes de ar parado e sem incidência de irradiação solar direta.

Figura 13: Condições de conforto térmico para a cidade de Taubaté



Fonte: Adaptado de NBR 15220 (2003).

Como pode ser observado na Figura 13, os valores de umidade relativa do ar para a região de conforto térmico variam de 50% até 80%. Considerando os extremos de temperatura de bulbo seco que garantem o conforto térmico para toda a faixa de umidade relativa definida na zona de conforto térmico (zona E destacada em verde na Figura 13) pode-se considerar que os valores de temperatura de bulbo seco que garantem o conforto térmico para qualquer valor de umidade relativa entre 50 e 80% estão na faixa aproximada de 18 a 24°C. Esses valores de temperatura são adotados, neste trabalho, como *setpoints* para a especificação de sistemas de ventilação e ar condicionado no *EnergyPlus*.

5.4 DEFINIÇÃO DO MODELO DE BASE DE EDIFÍCIO RESIDENCIAL

Considerando a sequência de entrada de dados para a descrição do edifício no *EnergyPlus*, primeiramente elaborou-se a planta baixa do pavimento tipo do modelo de base contendo as dimensões e disposições dos apartamentos. Em seguida, foram estipulados os materiais, espessuras, dimensões, propriedades físicas e térmicas dos elementos que compõem a envoltória. Na sequência, foram considerados os materiais e camadas que compõem a laje dos pavimentos. Após a elaboração da planta baixa e seleção de todos os materiais que compõem os elementos internos e externos do pavimento tipo, foi realizado um estudo de simplificação do modelo geométrico da planta para fins de zoneamento térmico.

Após a realização do zoneamento térmico se procedeu ao cálculo luminotécnico com o objetivo de se estimar a densidade de potência de iluminação média adequada a cada ambiente dos apartamentos. Seguindo-se, foi determinada a densidade de potência dos aparelhos eletrodomésticos, os cronogramas de utilização do sistema de iluminação e aparelhos eletrodomésticos, a densidade e cronogramas de ocupação, o cronograma de taxas metabólicas dos ocupantes, as variáveis para especificação dos equipamentos de ar condicionado, modelos de consumo de energia elétrica residencial, e outras variáveis.

5.4.1 Elaboração da planta baixa do pavimento tipo do modelo de base

Na elaboração da planta do pavimento tipo do modelo de base do edifício residencial foram consideradas as características dos edifícios residenciais brasileiros levantadas por Teixeira *et al.* (2015) e também as definições referentes às edificações residenciais apresentadas na norma NBR 12721 (ABNT, 2005), já apresentadas na seção 2.1.1. Em seguida, foram pesquisados modelos de *layouts* da disposição dos apartamentos em um

pavimento tipo. Uma planta baixa (Figura 14) de um pavimento tipo de um empreendimento da construtora Queiroz Galvão foi escolhida como padrão de *layout* para a definição do modelo de base do edifício residencial.

Figura 14: Planta baixa utilizada como referência para a elaboração do pavimento tipo do modelo de base do edifício residencial para simulação



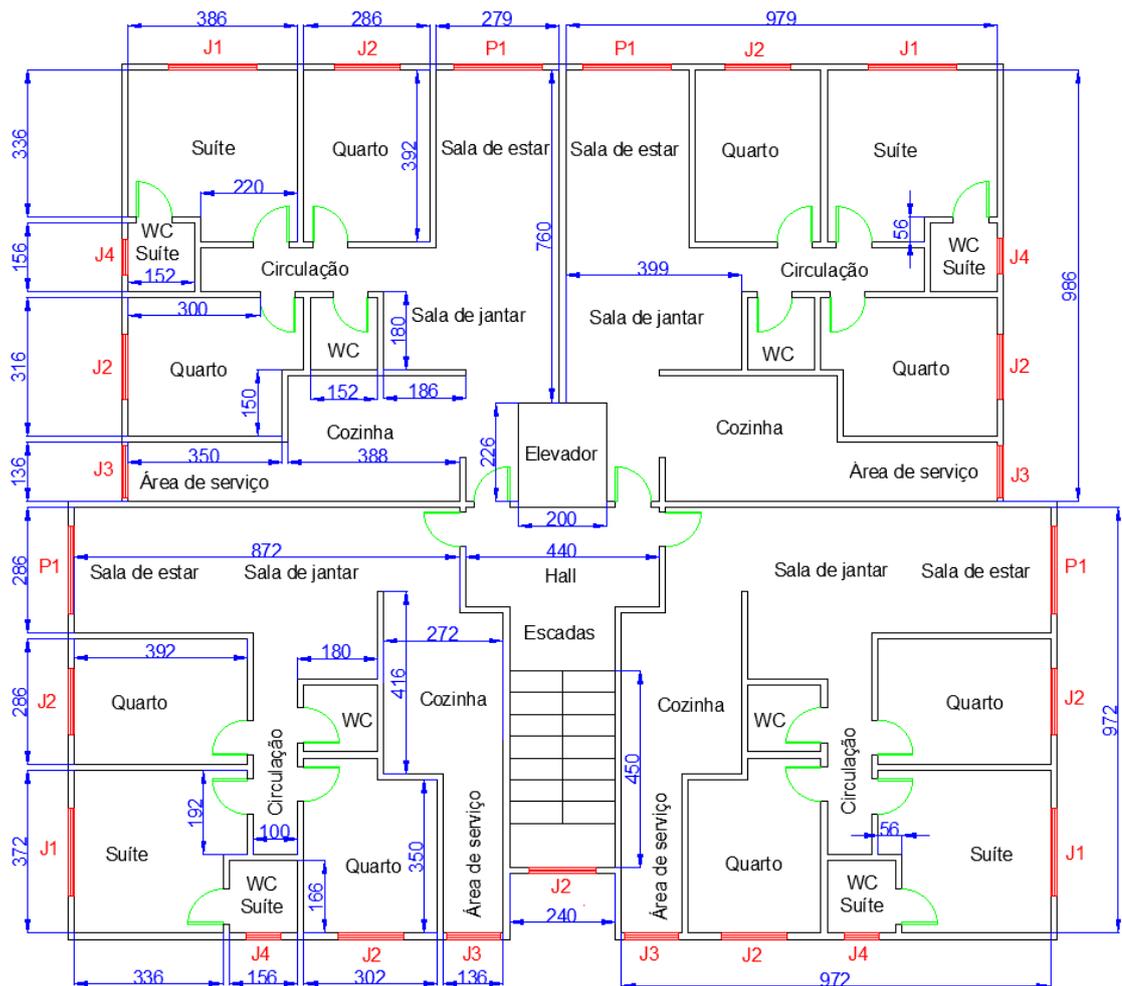
ECO VILLE

Fonte: QGDI (2019).

As dimensões dos ambientes dos apartamentos apresentados na Figura 14 foram ajustadas de modo que o modelo de planta baixa contemplasse as características dos edifícios residenciais da região sudeste do Brasil apresentadas na seção 2.1.1. Em seguida, foi elaborado um desenho da planta baixa do pavimento tipo do modelo de base de edifício residencial para simulação empregando-se o AutoCAD versão estudante 2018. As dimensões das aberturas envidraçadas (Tabela 6) foram calculadas (Apêndice B) levando-se em conta as recomendações do Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ – R), o qual prevê que a soma das áreas das aberturas para

iluminação natural de cada ambiente deve corresponder a, no mínimo, 12,5% da área útil do ambiente (INMETRO, 2012). As Espessuras das paredes externas e internas foram consideradas como sendo de 14 cm (Apêndice D). A Figura 15 apresenta a planta baixa do pavimento tipo do modelo de base de edifício residencial adaptada a partir da Figura 14 e de dados de Teixeira *et al.* (2015) sobre as características das edificações brasileiras.

Figura 15: Planta baixa do pavimento tipo do modelo de base de edifício residencial para simulação



Código	Tipo	Quantidade	Altura x Largura x Peitoril
J1	Janela	4	100 x 200 x 125
J2	Janela	9	100 x 150 x 125
J3	Janela	4	120 x 120 x 125
J4	Janela	4	60 x 80 x 180
P1	Porta de sacada	4	210 x 200 x 0

Desenho:
Planta baixa do pavimento-tipo
do modelo de base de edifício
residencial

Data:
15/10/2019

Escala:
1:200 cm

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após o projeto da planta baixa, foram calculadas as áreas úteis dos apartamentos (Apêndice A). Os valores encontrados foram de 89,8 m² para cada um dos dois apartamentos superiores e 87,2 m² para cada um dos dois apartamentos inferiores da planta baixa do pavimento tipo apresentada na Figura 15. As dimensões das aberturas envidraçadas da planta baixa do modelo de base de edifício residencial (Figura 15), calculadas conforme procedimentos que podem ser encontrados no Apêndice B, são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6: Dimensões comerciais das aberturas envidraçadas consideradas na planta baixa do pavimento tipo do modelo de base de edifício residencial

Elemento	Altura x Largura (m)
J1 (janela da suíte)	1,00 x 2,00
J2 (janela dos quartos e escada)	1,00 x 1,50
J3 (janela da cozinha/área de serviço)	1,20 x 1,20
J4 (janela do banheiro da suíte)	0,60 x 0,80
P1 (porta de vidro para sacada)	2,10 x 2,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.4.2 Determinação de materiais e propriedades dos elementos que compõem a envoltória

Grande parte das propriedades físicas e térmicas, bem como materiais e espessuras de elementos que compõem a envoltória como, por exemplo, paredes externas e aberturas envidraçadas, foram determinadas seguindo as orientações da norma NBR 15220 (ABNT, 2003).

5.4.2.1 Caracterização das paredes externas

O *EnergyPlus* requer a definição de algumas propriedades para a declaração de materiais como, por exemplo, espessura, condutividade, massa específica, calor específico, absorvância térmica, absorvância no espectro solar e absorvância no espectro visível. Após a especificação dos materiais se faz a composição dos elementos construtivos, camada por camada, partindo-se da camada exterior para a camada interior. As paredes externas e internas foram declaradas no *EnergyPlus* como sendo uma única camada de propriedades físicas e térmicas médias (Apêndice D), calculadas de acordo com as propriedades de materiais recomendadas pela norma NBR 15220 (ABNT, 2003), optou-se por tal procedimento porque

as paredes não são compostas por camadas homogêneas (há ar aprisionado no interior dos furos dos blocos cerâmicos e camadas de argamassa de assentamento), o que inviabiliza a declaração individual de cada material componente.

Para a determinação da absorvância das paredes no espectro solar foi considerada que a parede é pintada com uma cor média ($\alpha = 0,50$), e já passou por um processo de envelhecimento natural, sofrendo um aumento em torno de 15% no valor de sua absorvância (no Apêndice H são apresentados resultados de trabalhos que justificam as aproximações feitas para a absorvância das paredes no espectro solar), de forma que o valor médio da absorvância no espectro solar suposto, neste trabalho, como sendo o mais frequentemente encontrado na prática para paredes de edifícios residenciais é de 0,58. Os valores de absorvância térmica foram considerados iguais aos valores de emissividade térmica definidos na norma NBR 15220 (ABNT, 2003), uma vez que, segundo Pereira (2014), para um mesmo comprimento de onda, radiação e superfícies difusas, uma dada superfície apresenta valor de emitância igual ao valor da absorvância. Os valores médios das propriedades das paredes declaradas no *EnergyPlus* são apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7: Propriedades físicas e térmicas das paredes do modelo de base de edifício residencial

Propriedade	Valor
Espessura (m)	0,14
Condutividade térmica (W/m.K)	0,35
Massa específica (kg/m ³)	1196
Calor específico (J/kg.K)	976
Absorvância térmica	0,90
Absorvância no espectro solar	0,58 ^a e 0,50 ^b

Nota: (a) Valor de absorvância no espectro solar declarado para paredes externas; (b) Valor de absorvância no espectro solar declarado para paredes internas

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os cálculos detalhados dos valores apresentados na Tabela 7 podem ser encontrados nos Apêndices D e H.

5.4.2.2 Caracterização dos envidraçados

O trabalho de Teixeira *et al.* (2015), seção 2.1.1, demonstrou que o vidro comum (ou vidro *float*) incolor de 4 mm (Quadro 2) é o tipo de vidro mais frequentemente empregado nas janelas das unidades habitacionais dos edifícios residenciais brasileiros. Contudo,

considerações quanto à segurança devem ser levadas em conta no projeto de envidraçados quando estes apresentam risco potencial de impactos humanos. De acordo com a Associação Técnica Brasileira das Indústrias Automáticas de Vidro (WESTPHAL, 2016) a norma NBR 7199 estabelece que todo vidro instalado abaixo da cota de 1,10 m em relação ao piso de cada pavimento deve ser vidro de segurança. O vidro float (ou vidro comum) é permitido, desde que acima da cota de 1,10 m em relação ao piso e encaixilhado ou colado em todo o seu perímetro. Vidro de segurança é definido como aquele aprovado por testes padronizados de impacto e que não deve quebrar ou deve quebrar com segurança (não espalha estilhaços). Atualmente, existem três principais tipos de vidros de segurança no mercado: laminado, temperado e aramado (Definições dos tipos e propriedades de vidros encontrados no mercado brasileiro são apresentadas no Apêndice G).

Neste trabalho, para a definição dos envidraçados do modelo de base de edifício residencial, será considerado a aplicação de vidro comum (vidro *float*) de 4 mm de espessura nas janelas (aberturas acima de 1,10 m em relação ao nível do piso) e vidro laminado (vidro de segurança) de 8 mm de espessura nas portas envidraçadas da sala de estar que dão acesso às sacadas.

Devido à dificuldade de se encontrar um conjunto completo de propriedades térmicas e luminosas do vidro comum incolor de 4 mm de espessura, da forma requerida para declaração no *EnergyPlus*, em catálogos de fabricantes, as propriedades térmicas e luminosas do vidro comum incolor de 4 mm de espessura foram estimadas a partir de regressão linear (Apêndice F), realizada com as propriedades dos vidros classificados como “*clear*” (definido como aquele que não possui nenhuma adição de impurezas na massa vítrea) na biblioteca de propriedades de envidraçados do *EnergyPlus*. Na Tabela 8 são apresentadas as propriedades térmicas e luminosas do vidro comum incolor de 4 mm que foram consideradas nas simulações (detalhes dos cálculos e procedimentos podem ser encontrados no Apêndice F).

Tabela 8: Propriedades térmicas do vidro comum incolor de 4 mm

Variável	Valor
Espessura (m)	0,004
Transmitância solar em incidência normal	0,820
Refletância solar na face frontal em incidência normal	0,073
Refletância solar na face posterior em incidência normal	0,073
Transmitância visível em incidência normal	0,892
Refletância visível na face frontal em incidência normal	0,080
Refletância visível na face posterior em incidência normal	0,080
Transmitância de infravermelho em incidência normal	0
Emissividade hemisférica de infravermelho na face frontal	0,840
Emissividade hemisférica de infravermelho na face posterior	0,840
Condutividade térmica (W/m.K)	1,000

Fonte: Elaborado pelo autor.

As propriedades térmicas e luminosas do vidro laminado de 8 mm de espessura, consideradas nas simulações para as portas de vidro que dão acesso às sacadas, são apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9: Propriedades térmicas e luminosas do vidro “Neutral 70 clear laminado com incolor” de 8 mm de espessura do fabricante GUADIAN

Variável	Valor
Espessura (m)	0,008
Transmitância solar em incidência normal	0,520
Refletância solar na face frontal em incidência normal	0,170
Refletância solar na face posterior em incidência normal	0,150
Transmitância visível em incidência normal	0,720
Refletância visível na face frontal em incidência normal	0,090
Refletância visível na face posterior em incidência normal	0,090
Transmitância de infravermelho em incidência normal	0
Emissividade hemisférica de infravermelho na face frontal	0,840
Emissividade hemisférica de infravermelho na face posterior	0,840
Condutividade térmica (W/m.K)	1,000

Fonte: Westphal (2016).

5.4.3 Determinação de materiais e propriedades das camadas que compõem o sistema de pisos dos pavimentos-tipo

Os materiais, espessuras e camadas que compõem o sistema de pisos dos pavimentos-tipo foram adotados segundo orientações da Associação Nacional dos Fabricantes

de Cerâmica para Revestimentos, Louças Sanitárias e Congêneres (ANFACER, 2016) e das normas NBR 6118 (ABNT, 2014) e NBR 15220 (ABNT, 2003).

A Figura 16 apresenta a composição, por camadas, para o sistema de pisos dos pavimentos-tipo do modelo de base de edifício residencial para a realização de simulações no *EnergyPlus*. A escolha da dimensão de 10 cm para a laje maciça se baseou em recomendações da norma NBR 6118 (ABNT, 2014), essa dimensão é o valor mínimo recomendado para lajes em balanço e que possuem resistência mecânica suficiente para suportar veículos de até 30 kN. Os valores de condutividade térmica (λ), calor específico (c), emissividade térmica (ε), massa específica (ρ) e absorvância para a radiação solar (α) dos materiais que compõem as camadas do sistema de pisos da Figura 16 são apresentados na Tabela 10.

Figura 16: Composição do sistema de pisos para os pavimentos-tipo

Placa cerâmica para revestimento	7 mm
Camada de fixação (cimento cola)	10 mm
Contra piso (argamassa comum)	20 mm
Impermeabilizante (manta asfáltica)	3 mm
Laje maciça (concreto armado)	100 mm
Forro (gesso)	10 mm

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 10: Propriedades físicas e térmicas dos materiais que compõem o sistema de pisos dos pavimentos-tipo

Material	λ (W/m.K)	c (kJ/kg.k)	ε	ρ (kg/m ³)	α
Placa cerâmica (cinza)	1,10	0,76	0,80	1950	0,48
Cimento cola	0,75	0,84	0,90	1350	0,70
Argamassa comum	1,15	1,00	0,90	1950	0,70
Manta asfáltica	1,15	0,92	0,94	2300	0,92
Concreto armado	1,75	1,00	0,90	2500	0,70
Gesso	0,35	0,84	0,90	875	0,20

Nota: Para o cimento-cola, argamassa comum e concreto armado os valores de emissividade e absorvância foram estimados como sendo iguais aos respectivos valores para o concreto aparente devido a ausência de dados

Fonte: Adaptado a partir de dados de ANFACER (2016), Fassa Bortollo (2018), ABNT (2003) e ABNT (2014).

5.4.4 Determinação da densidade de potência de iluminação adequada a cada ambiente interno dos apartamentos

A densidade de potência adequada para cada ambiente interno dos apartamentos foi determinada por meio de cálculo luminotécnico empregando-se recomendações do manual de iluminação da Eletrobras (ELETROBRAS, 2011). Os valores de iluminâncias de interiores considerados nos cálculos são os recomendados pela norma NBR ISO/CIE 8995-1 (ABNT, 2013) para ambientes interiores gerais de uma edificação. Como referência para o cálculo luminotécnico, foram adotadas as dimensões dos apartamentos superiores da planta baixa da Figura 15. Os valores de densidade de potência encontrados para os ambientes são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11: Densidades de potência de iluminação para os ambientes dos apartamentos

Ambiente	Densidade de potência de iluminação (W/m^2)
Suíte	5,3
Quarto 1	5,4
Quarto 2	5,4
Sala	6,1
Cozinha	5,4
Banheiro	6,3
Valor médio	5,6 ⁽¹⁾

Nota: (1) Este valor está de acordo com recomendações do RTQ-R (INMETRO, 2012)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Outras variáveis importantes para a simulação da iluminação no *EnergyPlus* são a fração radiante e a fração visível, os valores destas variáveis considerados neste trabalho para a iluminação fluorescente foram de, respectivamente, 0,37 e 0,18, conforme recomendações de DOE (2007) e valores *default* do *EnergyPlus*. O cálculo luminotécnico foi realizado considerando o fluxo luminoso e a potência de lâmpadas fluorescentes compactas ECO HOME Twister Fabricadas pela Philips. Detalhes dos cálculos podem ser encontrados no Apêndice L.

5.4.5 Simplificações na planta baixa do pavimento tipo para fins de zoneamento térmico

Uma zona térmica não é um conceito geométrico. Uma zona térmica é definida como um volume de ar a uma temperatura uniforme delimitada por superfícies de transferência de

calor. Uma vez que o *EnergyPlus* realiza o balanço de calor em zonas térmicas, o primeiro passo para a descrição do edifício é dividi-lo em zonas térmicas. Para a declaração de zonas térmicas no *EnergyPlus* é possível se realizar um conjunto de simplificações na planta baixa do pavimento tipo (Figura 15). De acordo com o manual de inicialização do *EnergyPlus* (DOE, 2018a), há dois tipos de superfícies que podem ser declaradas no arquivo de entrada de dados do programa, as quais são: (1) superfícies de transferências de calor; (2) superfícies de armazenamento de calor.

Superfícies que separam espaços com temperaturas significativamente diferentes devem ser declaradas como superfícies de transferência de calor como, por exemplo, paredes externas, teto e piso; caso contrário, devem ser declaradas como superfícies de armazenamento de calor.

De acordo com o manual de inicialização do *EnergyPlus* (DOE, 2018a), o programa só precisa “saber” para qual zona térmica cada superfície transfere calor, desta forma, para propósitos de cálculos de balanço térmico não é necessário uma declaração geometricamente correta das zonas. A regra geral para a realização do zoneamento térmico é utilizar o número de sistemas de condicionamento de ar para determinar o número adequado de zonas térmicas. O número mínimo de zonas térmicas em um edifício deve ser igual ao número de sistemas de climatização que operam no edifício.

Cada simplificação deve ser avaliada para determinar se esta não irá impactar de forma significativa as características de sombreamento, ganhos solares internos ou iluminação natural. O objetivo das simplificações é procurar por um nível adequado de detalhamento que possa representar as características principais da envoltória do edifício de modo a não desperdiçar tempo descrevendo detalhes que não impactarão de forma significativa nos fluxos de energia (DOE, 2018a).

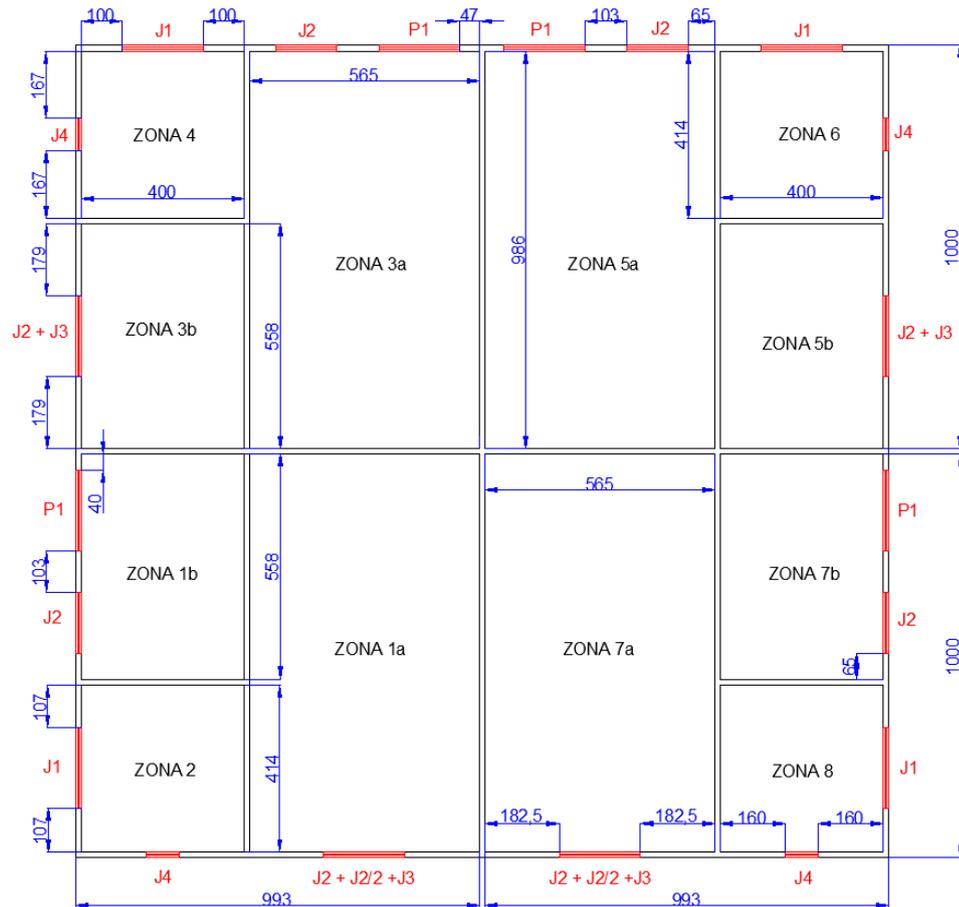
De acordo com o manual de inicialização do *EnergyPlus* (DOE, 2018a), é possível simplificar a descrição do edifício no zoneamento térmico seguindo as recomendações:

- Definir todos os tetos e pisos como retângulos independentemente do formato geométrico da zona;
- Definir todas as superfícies de armazenamento de calor, interior a uma zona e feitas do mesmo material construtivo, como uma única superfície de área total igual a soma das áreas das superfícies individuais;
- Combinar todas as janelas da mesma superfície exterior em uma única janela equivalente.

Como no zoneamento térmico deve-se diferenciar entre ambientes climatizados e não climatizados, primeiramente é necessário se estabelecer quais ambientes dos apartamentos possuem sistemas de condicionamento de ar. Recentemente uma pesquisa realizada pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2018a) demonstrou que a penetração de equipamentos de condicionamento de ar nas residências brasileiras ainda é relativamente baixa quando comparada a países como China e Estados Unidos. No Brasil, a taxa de posse de ar-condicionado é de 0,4 aparelhos/residência, ou seja, em média pode-se considerar que 40% das residências possuem um aparelho de ar-condicionado. Os locais mais comuns para instalação destes aparelhos são a sala de estar e os quartos. Neste trabalho serão consideradas duas possibilidades de instalação para os aparelhos de ar condicionados: (1) um aparelho de ar condicionado, tipo *split*, instalado nas suítes; (2) dois aparelhos de ar condicionado, tipo *split*, sendo um instalado nas suítes e o outro, em outro ambiente, o qual pode ser um dos quartos ou a sala de estar.

Aplicando as simplificação de zonas térmicas recomendadas pelo manual de inicialização do *EnergyPlus* (DOE, 2018a), e considerando as possibilidades de climatização de ambientes apresentadas no parágrafo anterior, se procedeu à simplificação da planta baixa do pavimento tipo (Figura 15) para fins de zoneamento térmico. A planta baixa simplificada é apresentada na Figura 17.

Figura 17: Simplificações na planta baixa para definição das zonas térmicas



Código	Tipo	Quantidade	Altura x Largura x Peitoril
J1	Janela	4	100 x 200 x 125
J2	Janela	4	100 x 150 x 125
J4	Janela	4	60 x 80 x 180
J2+J3	Janela	2	147 x 100 x 125
J2+J2/2+J3	Janela	2	185 x 200 x 125
P1	Porta de sacada	4	210 x 200 x 0

Desenho:	Data:
Planta baixa simplificada para zoneamento térmico	15/10/2019
	Escala:
	1:200 cm

Fonte: Elaborado pelo autor.

Comparando as Figuras 15 e 17 pode-se observar que, no zoneamento térmico, as regiões referentes ao fosso do elevador e às escadas foram consideradas como sendo compostas do mesmo sistema de pisos dos apartamentos (Figura 17). Pode-se observar, também, que foi realizado um deslocamento dos apartamentos inferiores de modo que todos os apartamentos ficassem alinhados no interior de um retângulo e tivessem a mesma área interna, a qual é igual à área útil dos apartamentos superiores da planta baixa (Figura 15). Tal simplificação se justifica pela pequena diferença de área útil dos apartamentos (Apêndice A).

Foi também suposto que o alinhamento realizado não irá interferir significativamente em características de sombreamento e ganhos solares.

Com a realização dessas simplificações é necessário calcular a área líquida do sistema de pisos que deve ser declarada como “massa interna” no *EnergyPlus*. Para a realização deste cálculo foi considerado que o fosso do elevador apresenta maior influência, em termos de massa de armazenamento de energia térmica, nos apartamentos superiores da planta baixa (Figura 15). Comparando-se as plantas baixas do pavimento tipo com a do zoneamento térmico (Figuras 15 e 17) pode-se observar que há a necessidade de se descontar 2,96 m² de área do sistema de pisos para cada apartamento superior da planta baixa de zoneamento térmico. No *EnergyPlus* não é possível descontar massa interna, pois essa variável deve ser definida como um valor maior que zero no arquivo de entrada de dados da simulação. A saída encontrada para tal situação foi calcular a área equivalente de paredes internas (Apêndice I) que deve ser descontada de modo a simular o efeito da redução de área do sistema de pisos para os apartamentos superiores.

O efeito de massa de armazenamento de energia térmica das escadas e do hall foi considerado integrado aos apartamentos inferiores da planta baixa do pavimento tipo (Figura 15) e a área do sistema de pisos e paredes internas equivalentes a ser declarada como massa térmica foi calculada, conforme procedimentos apresentados no Apêndice I. As áreas equivalentes de paredes que devem ser declaradas como superfícies de armazenamento térmico nas simplificações realizadas na planta baixa do zoneamento térmico (Figura 17) são apresentadas no Quadro 9.

Quadro 9: Áreas equivalentes de paredes internas que devem ser declarados como superfícies de armazenamento térmico para cada zona térmica apresentada na Figura 17

Zonas térmicas da Figura 17	Área equivalente (m ²)
zonas pares (2, 4, 6 e 8)	8,01
zonas ímpares “a” inferiores (1a e 7a)	52,28
zonas ímpares “b” inferiores (1b e 7b)	20,95
zonas ímpares “a” superiores (3a e 5a)	34,65
zonas ímpares “b” superiores (3b e 5b)	13,89

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.4.6 Determinação do consumo de energia elétrica de referência para validação do modelo de base de edifício residencial e caracterização da família

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2018), devido à gradual redução da taxa de fecundidade observada nas últimas décadas, a população brasileira deverá atingir o seu máximo por volta de 2047, quando chegará a 233,2 milhões de habitantes. No ano 2000 a taxa de fecundidade média era de 2,32 filhos por mulher, ao passo que em 2018 essa taxa sofreu redução para 1,77 filhos por mulher, a previsão do IBGE é que esta taxa continue se reduzindo, atingindo o valor de 1,66 filhos por mulher por volta de 2060.

Considerando a taxa de fecundidade média de 1,77 filhos por casal, pais não separados e com dois filhos em idade escolar, adotou-se o valor de quatro pessoas por residência como sendo um valor médio bastante provável de ser atualmente encontrado para a região sudeste do Brasil.

Em relação à classificação socioeconômica foi utilizado, como referência, o critério Brasil, elaborado pela Associação Brasileira de Empresas de Pesquisa (ABEP), a atualização mais recente do critério de classificação econômica do Brasil ocorreu em junho de 2019. O critério consiste, simplificada, na atribuição de pontuações para famílias com base na posse de bens de consumo, grau de instrução do (s) chefe (s) de família e disponibilidade de serviços de infraestrutura no local da residência. A pontuação total obtida permite a classificação econômica da família em uma determinada faixa de renda, elaborada tomando como referência a Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua (PNADC/IBGE) mais recente (ABEP, 2019).

Aplicando o Critério Brasil de 2019 (ABEP, 2019) foi possível determinar uma renda média de referência para a unidade familiar do modelo de base de edifício residencial em, aproximadamente, 12,3 salários mínimos (detalhes dos cálculos podem ser encontrados no Apêndice M) tal valor representa uma renda bruta total de, aproximadamente, R\$ 10.878,00 (ou uma renda per capita de R\$ 2719,50, considerando uma família de 4 integrantes) quando se considera o salário mínimo decretado por lei em janeiro de 2019, e estipulado em R\$ 998,00 (BRASIL, 2019). Essa renda classifica a unidade familiar como pertencente à classe econômica B1 considerando a estratificação proposta no Critério Brasil de 2019.

Após a determinação do tamanho da família e sua classificação econômica, foi construído um modelo do consumo de energia elétrica considerando que este varia em função da renda familiar, tamanho da família e área útil da unidade habitacional. Para a construção do modelo, foram adaptados alguns dados obtidos do projeto realizado por Tavares e

Fritsche (2007), referente a uma Autorização de Execução de Trabalho (AET) visando à definição de uma metodologia para a criação de uma base nacional de dados sobre o consumo específico de energia para o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica.

Considerando os objetivos do presente trabalho, os dados obtidos por Tavares e Fritsche (2007) (referentes à variação do consumo de energia elétrica em relação à faixa de renda domiciliar, área útil das unidades habitacionais e tamanho das famílias) foram selecionados, organizados e convertidos para unidades adequadas à realização de correlações, considerando as faixas de interesse de variação das grandezas requeridas para as análises do presente trabalho. Os dados de Tavares e Fritsche (2007) referentes ao consumo de eletricidade por faixa de renda foram convertidos em salários mínimos à época da pesquisa, considerando o valor estabelecido por decreto de lei em 2007, o qual era de R\$ 380,00 (BRASIL, 2007). As análises completas dos dados relevantes para o presente trabalho, juntamente com as funções de correlação obtidas, são apresentadas no Apêndice N.

O Quadro 10 apresenta um resumo das funções de correlação obtidas com seus respectivos resultados quando aplicadas às variáveis definidoras das condições do modelo de base de edifício residencial. O valor médio do consumo de energia elétrica de 291,30 kWh/mês (Quadro 10) foi utilizado como referência para a realização de ajustes e validação do modelo de base de edifício residencial durante as simulações com o *EnergyPlus*.

Quadro 10: Determinação do consumo de energia elétrica de referência para validação da simulação do modelo de base do edifício residencial

Variável	Valor adotado no modelo de base	Equação de correlação do consumo de eletricidade	Consumo (kWh/mês)
Tamanho da família (pessoas)	4	$y = -8,91x^2 + 107,13x$ ($r^2 = 0,98$)	$x = 4$ $y = 286,01$
Área útil da unidade habitacional (m ²)	88,5 (Apêndice A)	$y = 1,71x + 85,04$ ($r^2 = 0,94$)	$x = 88,5$ $y = 236,55$
Renda média domiciliar (Salários mínimos)	12,3	$y = 19,03x + 117,29$ ($r^2 = 0,95$)	$x = 12,3$ $y = 351,37$
Valor médio do consumo de energia elétrica dos modelos = 291,30 kWh/mês			

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.4.7 Modelamento da partição do consumo de energia elétrica baseado nas potências e tempos médios de utilização diária dos aparelhos eletrodomésticos

Para a determinação de cronogramas de utilização de potência dos aparelhos eletrodomésticos é necessário estimar a potência elétrica total instalada. Para tal tarefa utilizaram-se dados de potências médias e tempos médios de utilização diária de aparelhos eletrodomésticos da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG, 2014). Para os aparelhos mais relevantes para o consumo de energia e que possuem opções de seleção de potência como, por exemplo, chuveiro, geladeira, ar condicionado, máquina de lavar roupas e forno de micro-ondas, foram adotados valores de consumo de energia elétrica mensal de acordo com medições do Programa Brasileiro de Etiquetagem do Instituto Nacional de Metrologia, Tecnologia e Qualidade Industrial (INMETRO).

Os modelamentos do consumo de energia elétrica do modelo de base de edifício residencial para os meses de verão e inverno são, respectivamente, apresentados nos Quadros 11 e 12. Como premissas para a construção dos modelos, foi assumido que:

- Não há necessidade de utilização do sistema de ar condicionado e ventiladores nos meses de inverno;
- No verão os chuveiros são utilizados sempre em sua menor potência e no inverno sempre na maior potência, com tempos médios de banho de 10 min por chuveiro;
- No inverno o tempo de utilização do sistema de iluminação é uma hora maior que no verão devido à influência do horário de verão.

Quadro 11: Modelamento da partição do consumo de eletricidade do modelo de base de edifício residencial para os meses de verão

Aparelho eletrodoméstico	Quantidade	Potência (W)	Tempo de uso (h/dia)	Consumo de eletricidade (kWh/mês)
Suíte				
Lâmpadas	3	20	3	5,40
Smart TV 40"	1	100	1,5	4,50
Chuveiro	1	7.500	-	12,80
Notebook	1	30	1	0,90
Ar condicionado	1	3.516	6,8	164,02
Quarto 1				
Lâmpadas	3	20	4	7,20
ventilador	1	65	6	11,70
Notebook	1	30	2	1,80
Quarto 2				
Lâmpadas	3	20	4	7,20
Ventilador	1	65	6	11,70
Sala (estar + jantar)				
Lâmpadas	3	23	4	8,28
Ventilador	1	65	3	5,85
Computador	1	100	3	9,00
Smart TV 50"	1	142	3	12,78
Cozinha				
Lâmpadas	2	20	4	4,80
Geladeira Duplex	1	-	24	57,60
Micro-ondas	1	1400	0,3	12,60
Liquidificador	1	300	0,1	0,90
Área de serviço				
Lâmpadas	1	20	1	0,60
Máquina de lavar	1	-	-	5,00
Ferro de passar	1	1000	0,2	6,00
Banheiro social				
Lâmpadas	1	15	2	0,9
Chuveiro	1	7500	-	12,80
Consumo mensal médio de eletricidade no verão = 364,33 kWh/mês				

Fonte: Elaborado a partir de dados do Apêndice E, Apêndice J e Cemig (2014).

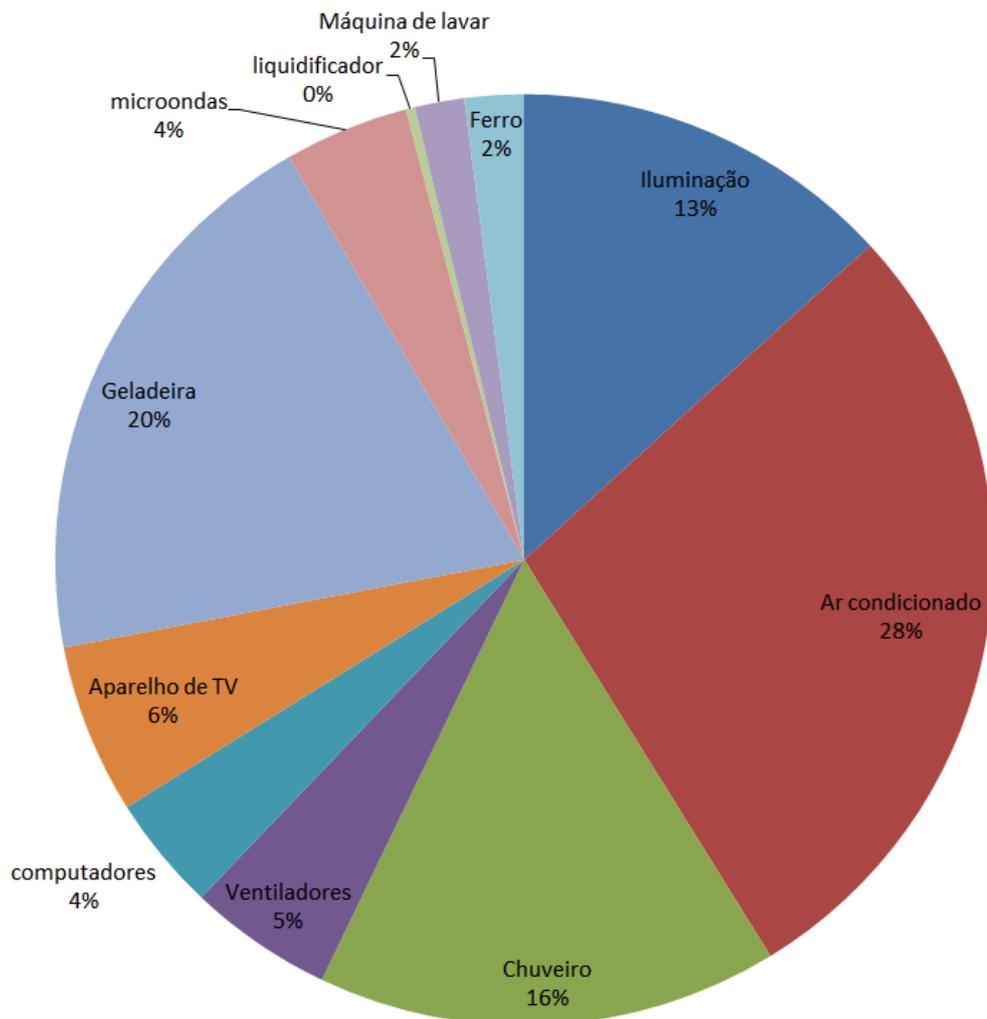
Quadro 12: Modelamento da partição do consumo de eletricidade do modelo de base de edifício residencial para os meses de inverno

Aparelho eletrodoméstico	Quantidade	Potência (W)	Tempo de uso (h/dia)	Consumo de eletricidade (kWh/mês)
Suíte				
Lâmpadas	3	20	4	7,2
Smart TV 40"	1	100	1,5	4,50
Chuveiro	1	7.500	-	33,80
notebook	1	30	1	0,90
Ar condicionado	1	3.516	0	0
Quarto 1				
Lâmpadas	3	20	5	9,00
ventilador	1	65	0	0
Notebook	1	30	2	1,80
Quarto 2				
Lâmpadas	3	20	5	9
ventilador	1	65	0	0
Sala (estar + jantar)				
Lâmpadas	3	23	5	10,35
ventilador	1	65	0	0
computador	1	100	3	9,00
Smart TV 50"	1	142	3	12,78
Cozinha				
Lâmpadas	2	20	5	6,00
Geladeira Duplex	1	-	24	57,60
micro-ondas	1	1400	0,3	12,60
liquidificador	1	300	0,1	0,90
Área de serviço				
Lâmpadas	1	20	1	0,60
Máquina de lavar	1	-	-	5,00
Ferro de passar	1	1000	0,2	6,00
Banheiro social				
Lâmpadas	1	15	2	0,9
Chuveiro	1	7500	-	33,80
Consumo mensal médio de eletricidade no inverno = 221,73 kWh/mês				

Fonte: Elaborado a partir de dados do Apêndice E, Apêndice J e Cemig (2014).

Considerando a média do consumo de energia elétrica entre verão (Quadro 11) e inverno (Quadro 12), a qual é de 293,03 kWh/mês, e comparando com o consumo mensal médio previsto no Quadro 10 (291,30 kWh/mês) pode-se concluir que as partições de energia apresentadas nos Quadros 11 e 12 representam valores razoavelmente confiáveis. As partições percentuais dos consumos médios de energia elétrica ao longo do ano para os dados apresentados nos Quadros 11 e 12 são apresentadas na Figura 18.

Figura 18: Partição percentual do consumo anual de energia para o modelo base a partir de estimativas de potências médias e tempos de utilização de aparelhos elétricos



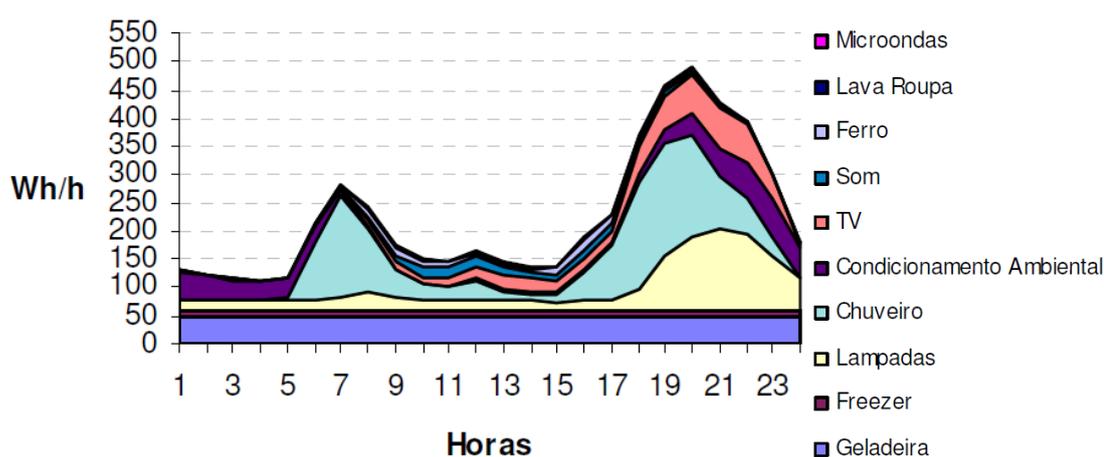
Fonte: Elaborado pelo autor a partir das médias dos valores apresentados nos Quadros 11 e 12 (2019).

Como pode ser observado na Figura 18, o sistema de ar condicionado do modelo de base de edifício residencial é responsável por, em torno de, 28% do consumo anual de energia elétrica; enquanto que a iluminação é responsável por, em torno de, 13% do consumo; os demais aparelhos elétricos representam 59% do consumo anual de energia elétrica do modelo de base de edifício residencial. Os valores apresentados na Figura 18 serão utilizados para validar os resultados obtidos com a simulação do modelo de base de edifício residencial no *EnergyPlus*.

5.4.8 Determinação de curvas de carga e cronogramas de utilização para a iluminação e aparelhos eletrodomésticos

Para a determinação da curva de carga dos equipamentos eletrodomésticos foi tomado como referência a curva de carga elaborada pelo Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL, 2007) para um consumidor residencial padrão da região Sudeste do Brasil, conforme apresentado na Figura 19.

Figura 19: Curva de carga de equipamentos eletrodomésticos para a região sudeste



Fonte: PROCEL (2007).

Para a declaração de aparelhos eletrodomésticos no *EnergyPlus* é necessário fornecer a densidade de potência (W/m^2), ou potência total (W), dos aparelhos em cada uma das zonas térmicas do modelo de base de edifício residencial, juntamente com seus respectivos cronogramas horários de utilização. Os cronogramas de utilização são baseados nas taxas percentuais de utilização horária da potência total, declarada para o respectivo aparelho eletrodoméstico.

Os consumos de energia elétrica no *EnergyPlus* são divididos em, basicamente, três categorias principais: iluminação, equipamentos elétricos e sistema de ar condicionado. O modelamento do consumo de energia elétrica com iluminação e equipamentos eletrodomésticos é feito por meio da declaração de densidades de potência (ou potências totais) e cronogramas horários de utilização. O modelamento do consumo de energia elétrica com condicionamento de ambientes é feito por meio da declaração das características dos aparelhos de ar condicionado como, por exemplo, o COP (coeficiente de desempenho), e características associadas às variáveis de projeto do sistema de climatização como, por

exemplo, fluxo de ar de insuflação, temperatura do ar insuflado, entre outras. Assim, a primeira etapa para a determinação das curvas de carga e cronogramas de utilização, associados aos consumos de eletricidade, foi o desmembramento do perfil horário de utilização, apresentado na Figura 19, em duas categorias: (1) iluminação; (2) equipamentos eletrodomésticos. Tal etapa é necessária, pois a declaração destes sistemas no *EnergyPlus* é realizada em objetos independentes, seguindo, também, cronogramas horários independentes.

5.4.8.1 Determinação das curvas de carga e cronogramas de utilização para o sistema de iluminação

Para a construção da curva de carga do sistema de iluminação foi considerado que não há utilização de iluminação entre às 01h00min e 06h00min, tal simplificação se justifica pela baixa tendência de utilização de iluminação em residências durante o período da madrugada. Foi considerado, também, haver uma pequena diferença entre os perfis de consumo durante dias de semana e finais de semana. Durante os dias de semana foi assumido que o consumo se inicia às 06h00min enquanto que para os fins de semana foi assumido que este se inicia às 09h00min. No restante do dia a curva de carga do sistema de iluminação foi modelada considerando a ocorrência de um perfil semelhante àquele apresentado na Figura 19 para o item “Lâmpadas”.

O ajuste da curva de carga do sistema de iluminação foi feito em duas etapas:

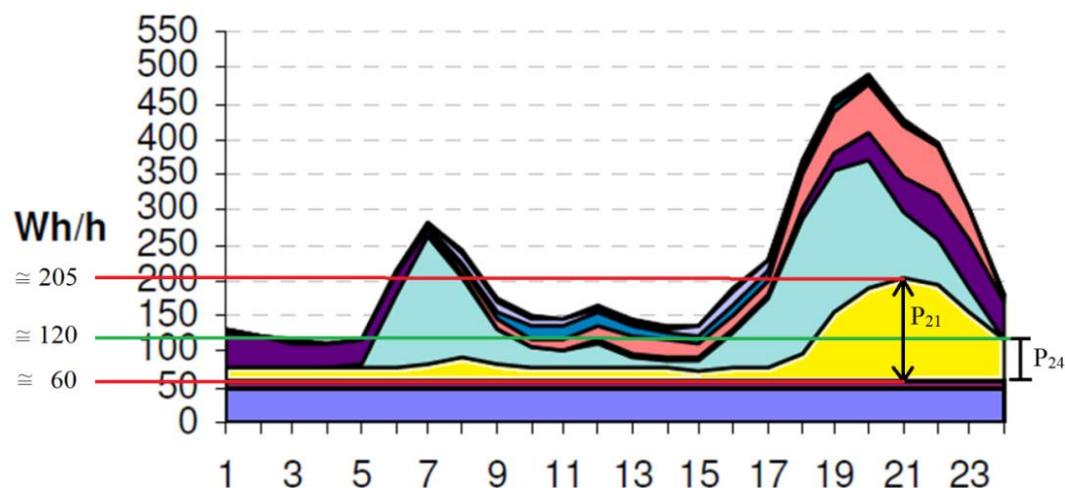
- Primeiramente a potência horária média diária da curva de carga do modelo de base de edifício residencial foi calculada por meio da aplicação de fatores de ajuste considerando o perfil apresentado na Figura 19;
- Em seguida, foram definidas frações horárias de utilização da potência total instalada²⁶ de modo a se obter (por meio de um processo iterativo entre os resultados das simulações no *EnergyPlus* e os consumos de energia elétrica com iluminação calculados a partir da curva de carga modelada) um perfil de curva de carga semelhante àquele apresentado na Figura 19 para o item “Lâmpadas”.

Um maior nível de detalhamento do procedimento adotado para o ajuste da curva de carga do sistema de iluminação é apresentado na sequência. A partir da curva de carga residencial de equipamentos eletrodomésticos, determinada pelo PROCEL (2007), para a

²⁶ Igual a 495,6 W, obtida por meio do produto da densidade de potência de iluminação (5,6 W/m²) pela área útil média dos apartamentos (88,5 m²) do modelo de base de edifício residencial. Detalhes podem ser encontrados nos Apêndice A e L.

região sudeste do Brasil (Figura 19) foram determinados, de forma aproximada, os valores das potências médias do sistema de iluminação para cada hora do dia. A Figura 20 ilustra o procedimento para 21h00min e 24h00min.

Figura 20: Procedimento utilizado para a determinação aproximada das potências médias horárias para o sistema de iluminação



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados de PROCEL (2007).

A título de exemplo, o Quadro 13 apresenta os resultados encontrados para a aplicação do procedimento demonstrado na Figura 20 para o intervalo entre 19h00min e 24h00min.

Quadro 13: Valores aproximados das potências médias horárias para o sistema de iluminação no intervalo entre 19h00min e 24h00min

Horário (h)	Potência média horária obtida pelo procedimento apresentado na Figura 20 (W)
19	100
20	130
21	145
22	130
23	90
24	60

Fonte: Elaborado pelo autor.

As potências horárias médias do sistema de iluminação do modelo de base de edifício residencial foram ajustadas por meio da aplicação de fatores de ajuste considerando as potências horárias médias, obtidas conforme apresentado na Figura 20 e Quadro 13. Além dos fatores de ajustes foram consideradas pequenas diferenças entre as curvas de carga de dias de

semana e fins de semana, principalmente, devido ao fato de nos fins de semana as famílias tenderem a acordar mais tarde e irem dormir, também, mais tarde, fator que contribui para um maior consumo de energia elétrica nos fins de semana após as 21h00min em relação aos dias de semana.

O Quadro 14 apresenta um exemplo dos fatores de ajuste utilizados no intervalo entre 19h00min e 24h00min entre as potências médias horárias apresentadas no Quadro 13 e as potências médias horárias apresentadas na Tabela 12.

Quadro 14: Ajuste da curva de carga média do sistema de iluminação

Horário (h)	Potência horária média (Quadro 13)	Modelo ajustado	
	$P_{i(\text{PROCEL})}$ (W)	P_{im} (W)	f_{ajuste}
19	100	189,34	1,9
20	130	213,01	1,6
21	145	236,67	1,6
22	130	219,77	1,7
23	90	155,53	1,7
24	60	77,76	1,3

Fonte: Elaborado pelo autor.

No Quadro 14 o fator de ajuste é um fator multiplicativo da potência média horária obtida a partir do procedimento apresentado na Figura 20, conforme indicado na equação (9).

$$P_{im} = f_{ajuste} \cdot P_{i(\text{PROCEL})} \quad (9)$$

Em que:

P_{im} : Potência horária média semanal do modelo a ser ajustado

f_{ajuste} : Valor numérico que ajusta a potência horária do modelo em relação a potência horária do sistema de iluminação determinada pelo PROCEL (2007)

$P_{i(\text{PROCEL})}$: Potência horária da curva de carga determinada pelo PROCEL (2007) para o sistema de iluminação de residências do sudeste brasileiro

Valores de fatores de ajuste para cada hora do dia foram escolhidos de modo que a curva de carga média semanal do sistema de iluminação representasse de forma proporcional o perfil de curva de carga apresentado na Figura 19, considerando a menor dispersão possível para os fatores de ajuste. Os valores dos fatores de ajuste, também, levaram em conta

diferenças entre as curvas de carga do sistema de iluminação nos dias de semana e fins de semana, tendo sido aplicados na curva de carga média entre dias de semana e fins de semana. Os valores de potência horária da curva de carga média foram calculados de acordo com a equação (10).

$$P_{im} = \frac{5P_{is}+2P_{if}}{7} \quad (10)$$

Em que:

P_{im} : Potência horária média semanal da curva de carga

P_{is} : Potência horária média da curva de carga para os dias de semana

P_{if} : Potência horária média da curva de carga para os fins semana

Após a obtenção da potência horária média semanal a fração da iluminação utilizada para cada hora do dia foi calculada de acordo com as equações (11) e (12).

$$f_{is} = \frac{P_{is}}{P_t} \quad (11)$$

$$f_{if} = \frac{P_{if}}{P_t} \quad (12)$$

Nas equações (11) e (12) tem-se a seguinte definição de variáveis:

f_{is} : Fração de utilização horária da potência total instalada de iluminação para os dias de semana

f_{if} : Fração de utilização horária da potência total instalada de iluminação para os fins de semana

P_t : Potência total instalada de iluminação

A potência total instalada de iluminação (P_t) foi calculada como o produto da densidade de potência média de iluminação (determinada por cálculo luminotécnico), a qual foi de $5,6 \text{ W/m}^2$, pela área útil média dos apartamentos, a qual foi de $88,5 \text{ m}^2$. Desta forma, a potência total de iluminação apresentou um valor igual a $495,6 \text{ W}$. As frações horárias de utilização da potência total de iluminação (f_{is} e f_{if}) foram declaradas no *EnergyPlus* e um processo interativo foi iniciado utilizando os resultados de consumo mensal de energia

elétrica com iluminação, obtidos após a simulação, para validar as curvas de carga ou calcular novos fatores de ajuste, caso fosse necessário. Esse procedimento foi realizado até a convergência entre o consumo mensal de energia elétrica com iluminação previsto pela curva de carga média e o consumo previsto pelos resultados da simulação no *EnergyPlus*.

O método adotado no cálculo do consumo médio mensal de energia elétrica com iluminação por meio da curva de carga de potência média horária é apresentado na equação (13).

$$C_m = \frac{30}{1000} \sum_{i=1}^{24} P_{im} t_i \quad (13)$$

Em que:

C_m : Consumo médio mensal de energia elétrica

P_{im} : Potência média horária do sistema de iluminação (Tabela 12)

t_i : Tempo de utilização da potência média horária (igual a 1h)

O procedimento iterativo apresentou como resultado para o consumo mensal de energia elétrica com iluminação o valor de 44,63 kWh/mês para a convergência do procedimento iterativo. Os resultados obtidos após a convergência são apresentados na Tabela 12.

Nas simulações, as frações radiante e visível do sistema de iluminação foram adotadas em 0,37 e 0,18, respectivamente, pois estes são os valores *default* para iluminação com lâmpadas fluorescentes no *EnergyPlus*. A curva de carga associada aos dados da Tabela 12 é apresentada na Figura 21.

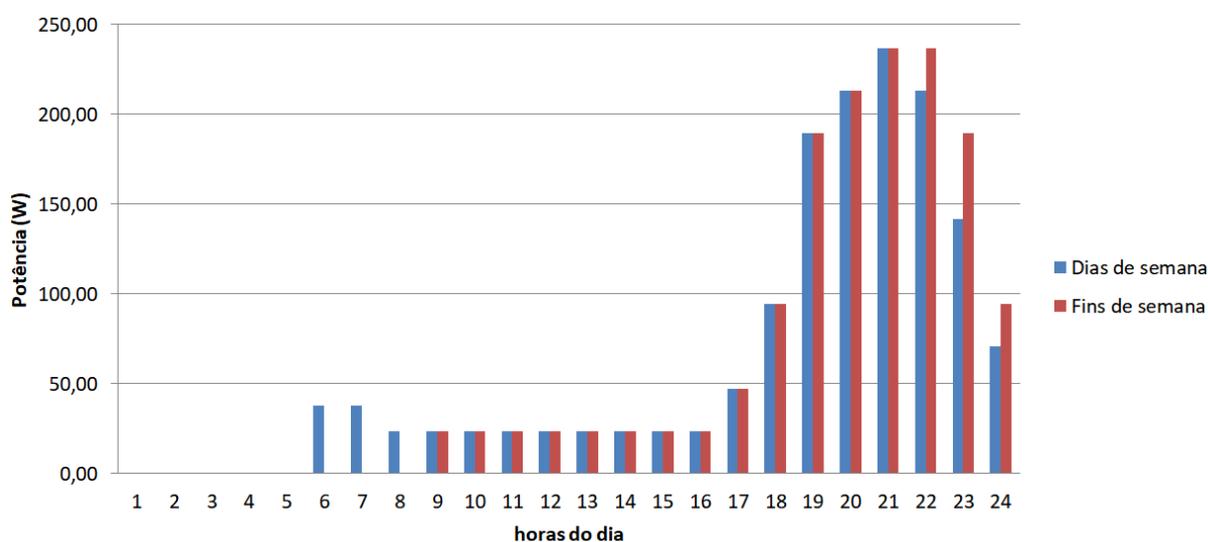
A principal diferença, considerada neste trabalho, entre os consumos de energia de iluminação dos dias de semana e fins de semana se deve à tendência das famílias acordarem um pouco mais tarde nos fins de semana (adotado em 09h00min) e irem dormir também mais tarde, levando a uma maior utilização do sistema de iluminação após às 21h00min (INMETRO, 2012).

Tabela 12: Cronogramas horários de utilização da potência total instalada para o sistema de iluminação

Tempo (h)	Dias de semana		Fins de semana		Dia médio
	P_{is} (W)	$f_{is} = \frac{P_{is}}{495,6}$	P_{if} (W)	$f_{if} = \frac{P_{if}}{495,6}$	
1 – 5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	37,87	0,08	0,00	0,00	27,05
7	37,87	0,08	0,00	0,00	27,05
8	23,67	0,05	0,00	0,00	16,91
9	23,67	0,05	23,67	0,05	23,67
10	23,67	0,05	23,67	0,05	23,67
11	23,67	0,05	23,67	0,05	23,67
12	23,67	0,05	23,67	0,05	23,67
13	23,67	0,05	23,67	0,05	23,67
14	23,67	0,05	23,67	0,05	23,67
15	23,67	0,05	23,67	0,05	23,67
16	23,67	0,05	23,67	0,05	23,67
17	47,33	0,10	47,33	0,10	47,33
18	94,67	0,20	94,67	0,20	94,67
19	189,34	0,40	189,34	0,40	189,34
20	213,01	0,45	213,01	0,45	213,01
21	236,67	0,50	236,67	0,50	236,67
22	213,01	0,45	236,67	0,50	219,77
23	142,00	0,30	189,34	0,40	155,53
24	71,00	0,15	94,67	0,20	77,76
Consumo mensal de eletricidade (kWh/mês)					44,63

Fonte: Elaborado pelo autor considerando recomendações do RTQ-R - INMETRO (2012).

Figura 21: Curva de carga do sistema de iluminação



Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados da Tabela 12.

5.4.8.2 Determinação das curvas de carga e cronogramas de utilização para os aparelhos eletrodomésticos

Para o cálculo das frações horárias de utilização é necessário estimar a potência total instalada dos aparelhos eletrodomésticos. Este valor foi, sucessivamente, ajustado por um processo iterativo realizado de forma que o consumo de energia elétrica mensal por apartamento previsto pelos resultados da simulação do modelo de base no *EnergyPlus* se tornasse o mais próximo possível dos consumos previstos nas seções 5.4.6 e 5.4.7, os quais foram 291,30 e 293,03 kWh/mês. Tal medida se justifica pelo fato de haver maior incerteza na determinação da densidade de potência dos aparelhos eletrodomésticos em relação às demais variáveis do modelo de base de edifício residencial, uma vez que os valores apresentados nos Quadros 11 e 12 foram obtidos através de valores médios tabelados de consumo de energia, potência e tempo disponibilizados pela Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) e pelo Instituto Nacional de Metrologia, Tecnologia e Qualidade Industrial (INMETRO) e, na maior parte dos casos, não consideram a possibilidade de variação da potência de operação dos aparelhos eletrodomésticos pelo usuário, pois, na prática, nem sempre o usuário está utilizando a potência nominal dos aparelhos; fator que dificulta a determinação da potência total instalada, realmente em utilização, dos equipamentos eletrodomésticos por simples somatório das potências nominais de cada aparelho.

Após a calibração do modelo de base de edifício residencial, o valor final da potência total instalada e respectiva densidade de potência associada aos equipamentos eletrodomésticos foram, respectivamente, de 4425 W e 50 W/m². Para o cálculo da densidade de potência foi considerado a área útil média dos apartamentos conforme calculada no Apêndice A. Os valores das potências médias horárias, bem como das frações horárias de utilização foram obtidos seguindo um procedimento semelhante ao utilizado para o sistema de iluminação (seção 5.4.8.1), realizado após a calibração do modelo de base de edifício residencial, e são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13: Cronogramas horários de utilização da potência total instalada para os aparelhos eletrodomésticos

Tempo (h)	Dias de semana		Fins de semana		Dia médio
	P_{is} (W)	$f_{is} = \frac{P_{is}}{4425}$	P_{if} (W)	$f_{if} = \frac{P_{if}}{4425}$	P_{im} (W)
1 – 5	88,54	0,02	87,39	0,02	88,21
6	262,40	0,05	91,99	0,02	213,71
7	342,88	0,07	91,99	0,02	271,20
8	92,72	0,02	91,99	0,02	92,51
9	101,53	0,02	250,88	0,05	144,20
10	107,68	0,02	241,70	0,05	145,97
11	161,51	0,03	243,47	0,05	184,93
12	133,22	0,03	152,50	0,03	138,73
13	145,52	0,03	165,53	0,03	151,24
14	140,79	0,03	134,18	0,03	138,91
15	143,46	0,03	208,90	0,04	162,16
16	253,62	0,05	304,18	0,06	268,06
17	302,95	0,06	373,94	0,08	323,23
18	445,75	0,09	496,76	0,10	460,33
19	522,50	0,11	580,23	0,12	539,00
20	529,36	0,11	584,52	0,12	545,12
21	430,57	0,09	478,72	0,10	444,33
22	334,87	0,07	363,98	0,08	343,19
23	264,71	0,06	273,35	0,06	267,18
24	174,60	0,04	180,91	0,04	176,40
Consumo mensal de eletricidade (kWh/mês)					163,54

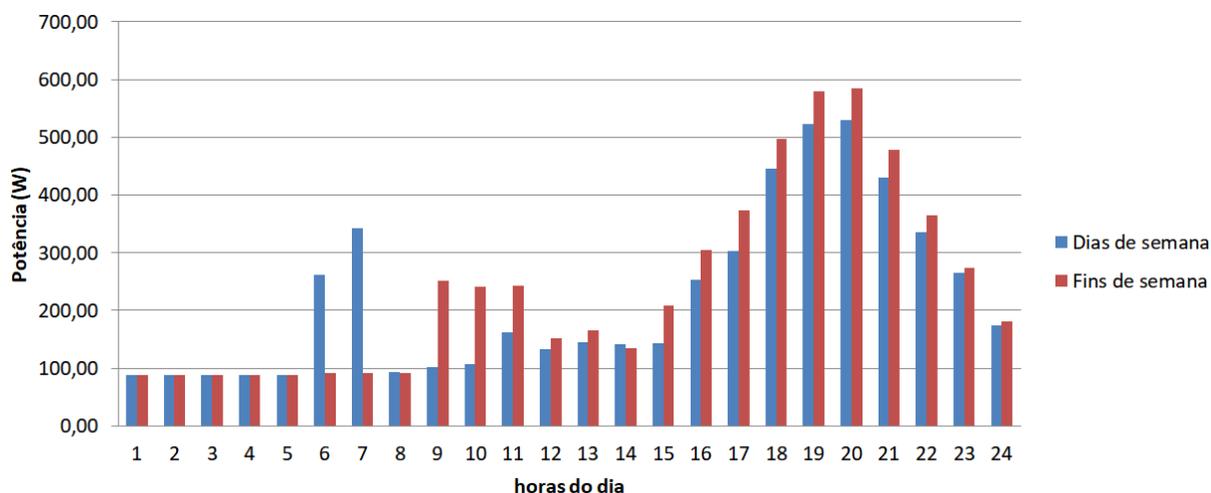
Fonte: Elaborado pelo autor.

Nas simulações, a fração radiante dos aparelhos eletrodomésticos foi adotada em 0,25 (valor *default* do *EnergyPlus*). As potências horárias médias e frações horárias de utilização da potência total instalada foram ajustadas de forma que o consumo mensal de eletricidade referente aos aparelhos eletrodomésticos convergisse para o valor desta variável previsto pela simulação do modelo base de edifício residencial no *EnergyPlus* (o qual foi de 163,54 kWh/mês, conforme apresentado na Tabela 13). A curva de carga associada aos cronogramas de utilização dos aparelhos eletrodomésticos (Tabela 13) é apresentada na Figura 22 para dias de semana e finais de semana.

A principal diferença adotada entre os consumos de dias de semana e finais de semana (Figura 22) se deve à tendência de as famílias acordarem um pouco mais tarde nos finais de semana (adotado em 9h00min neste trabalho) e irem dormir também mais tarde, levando a uma maior utilização dos aparelhos eletrodomésticos no período noturno. Como há maior densidade de ocupação nos finais de semana nos períodos da tarde (Tabela 14) há, também, a

tendência de maior consumo de energia relacionado aos aparelhos eletrodomésticos a partir deste período.

Figura 22: Curva de carga dos aparelhos eletrodomésticos



Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados da Tabela 13.

5.4.9 Modelamento do perfil de ocupação, cronograma de ocupação e cronograma de atividade metabólica dos ocupantes

A família do modelo de base de edifício residencial é composta por quatro integrantes, sendo os pais e dois filhos em idade escolar. O modelo supõe que durante os dias de semana ambos os pais trabalham, estando ausentes do lar das 07h00min até às 18h00min, enquanto que os filhos ficam ausentes do lar no período escolar matutino, saindo às 06h00min e retornando às 13h00min. Durante o período que vai das 07h00min até às 18h00min é suposta a presença de um empregado (a) doméstico (a) e após as 18h00min é suposta a presença de todos os entes da família no ambiente interno do apartamento. Durante os finais de semana é suposta a presença de 100% dos entes da família durante o dia todo. A Tabela 14 apresenta a distribuição horária de ocupação no interior do apartamento para os dias de semana e finais de semana.

Tabela 14: Cronograma de ocupação dos apartamentos

Horário (h)	Dias de semana		Fins de semana	
	Pessoas na residência	Fração de ocupação	Pessoas na residência	Fração de ocupação
0 – 6	4	1,00	4	1,00
6 – 7	2	0,50	4	1,00
7 – 13	1	0,25	4	1,00
13 – 18	3	0,75	4	1,00
18 – 24	4	1,00	4	1,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o cronograma do nível de atividade metabólica (M) dos ocupantes do modelo de base do edifício residencial foram considerados os valores apresentados no Quadro 15.

Quadro 15: Cronograma das taxas metabólicas dos ocupantes

Horário	Dias de semana		Fins de semana	
	Atividade	M (W/m ²)	Atividade	M (W/m ²)
1 – 6h	Deitado	46	Deitado	46
6 – 9h	Atividade doméstica moderada	116	Deitado	46
9 – 20h	Atividade doméstica moderada	116	Atividade doméstica moderada	116
20 – 24h	Atividade doméstica sedentária	70	Atividade doméstica sedentária	70

Fonte: Adaptado de Lamberts e Xavier (2002).

5.4.10 Parâmetros declarados no *EnergyPlus* para o dimensionamento do sistema de ar condicionado

Entre as variáveis que devem ser declaradas no *EnergyPlus* para o dimensionamento do sistema de ar condicionado se destacam o coeficiente de desempenho para o ciclo de refrigeração (COP_C – *Coefficient of performance for cooling*); o coeficiente de desempenho para o ciclo de aquecimento (COP_H – *coefficient of performance for heating*); as características do compressor, evaporador e condensador; as eficiências dos motores dos ventiladores das unidades evaporadora e condensadora e as temperaturas de projeto do ar de alimentação para os ciclos de aquecimento e refrigeração. Para fins de dimensionamento,

foram consideradas as propriedades de sistemas de ar condicionado tipo *split hi-wall* de ciclo reverso e rotação fixa (detalhes de funcionamento e definições, úteis à realização deste trabalho, relacionadas aos sistemas de ar condicionado tipo *split* podem ser encontradas no Apêndice Q), medidas pelo Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) em 2014 (INMETRO, 2014).

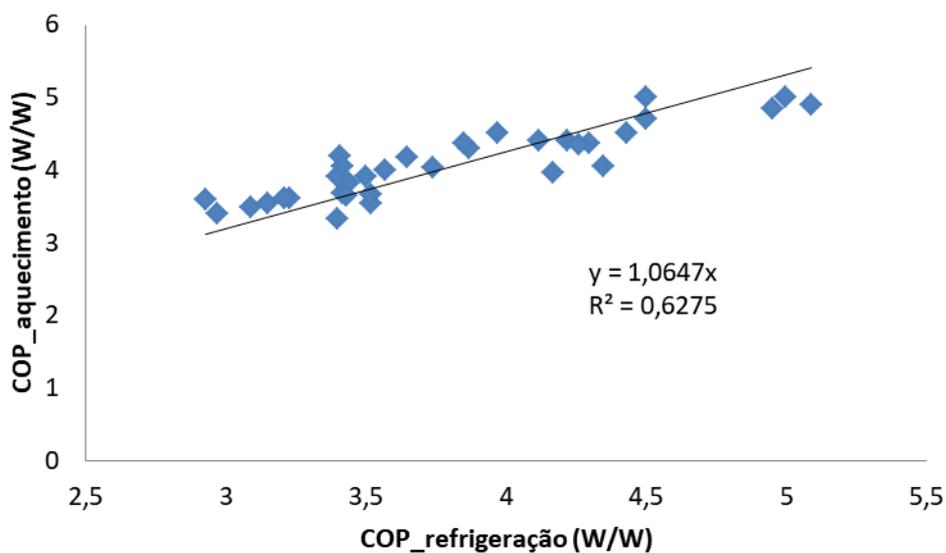
O COP_C foi estimado em 3,05 para um sistema de ar condicionado novo, quando adquirido no ano 2014. Esse valor representa uma média do Coeficiente de Eficiência Energética (CEE) de modelos de ar condicionados tipo *split hi-wall* de rotação fixa etiquetados pelo INMETRO em 2014 (Apêndice O). Em seguida, foi considerada a degradação do desempenho do sistema de ar condicionado (considerando uma idade média de 6,5 anos, conforme dados do Apêndice P), em aproximadamente 3% (de acordo com a curva de degradação de desempenho de sistemas de ar condicionado apresentada no Apêndice O) e o valor do COP_C foi ajustado para 2,95.

As tabelas do Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) apresentam somente o coeficiente de eficiência energética (CEE) para o ciclo de refrigeração dos aparelhos de ar condicionado, mesmo em se tratando de modelos de ciclo reverso. Desta forma, foi necessário estimar o valor do coeficiente de desempenho para o ciclo de aquecimento dos aparelhos de ar condicionado (operando como bomba de calor). Em um modelo ideal de equipamento de ar condicionado com inversão de ciclo, a relação entre o COP_C e o COP_H é dada conforme a equação (14) (DINÇER; KANOGLU, 2010).

$$COP_H = COP_C + 1 \quad (14)$$

A equação (14) é justificada pelo fato de que em ciclos ideais todo o trabalho elétrico realizado sobre o compressor é supostamente convertido em calor para o interior do ambiente climatizado quando se considera o sistema de ar condicionado operando como bomba de calor. Em sistemas reais, uma parcela da energia elétrica é utilizada para operar os ventiladores das unidades evaporadora e condensadora, adicionalmente a isso, devem ser consideradas as perdas de carga no escoamento do fluido refrigerante, as eficiências elétricas e mecânicas dos ventiladores, a eficiência do compressor e as eficiências dos trocadores de calor (evaporador e condensador). Desta forma, na prática o COP_H não é uma unidade maior que o COP_C . A Figura 23 apresenta a correlação obtida entre o COP_H e o COP_C para 34 modelos de aparelhos de ar condicionado de ciclo reverso do fabricante Fujitsu.

Figura 23: Correlação entre os coeficientes de desempenho do ciclo de refrigeração e aquecimento para aparelhos de ar condicionado de ciclo reverso



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de valores catalogados por Fujitsu (2019).

Substituindo o valor $COP_C = 2,95$ na função de regressão linear apresentada na Figura 23 se obtém $COP_H = 3,14$, estes são os valores considerados para o modelamento do sistema de ar condicionado de ciclo reverso com compressor de rotação fixa.

O Quadro 16 apresenta um resumo das variáveis inseridas no *EnergyPlus* (grande parte das variáveis foram adotadas com seus respectivos valores *default* recomendados pelo programa de simulação) para o dimensionamento do sistema de ar condicionado.

Quadro 16: Principais variáveis consideradas no dimensionamento do sistema de ar condicionado e inseridas no *EnergyPlus*

Variável	Valor
Sistema de ar condicionado	<i>Split hi – wall</i> de ciclo reverso, expansão direta e rotação fixa
Capacidade de refrigeração	12.000 BTU/h ou 3,52 kW
Capacidade de aquecimento	12.000 BTU/h ou 3,52 kW
COP _C	2,95
COP _H	3,14
<i>setpoint</i> de temperatura de aquecimento	18°C
<i>setpoint</i> de temperatura de refrigeração	24°C
Eficiência do ventilador de alimentação	0,7
Gradiente de pressão do ventilador de alimentação	600 Pa
Eficiência do motor do ventilador de alimentação	0,9
Temperatura de projeto do ar de alimentação para refrigeração	12,8°C
Carga de refrigeração do ambiente	Dimensionada pelo <i>EnergyPlus</i>
Temperatura de projeto do ar de alimentação para aquecimento	50°C
Carga de aquecimento do ambiente	Dimensionada pelo <i>EnergyPlus</i>
Taxa de renovação de ar por pessoa	0,0094 m ³ /s

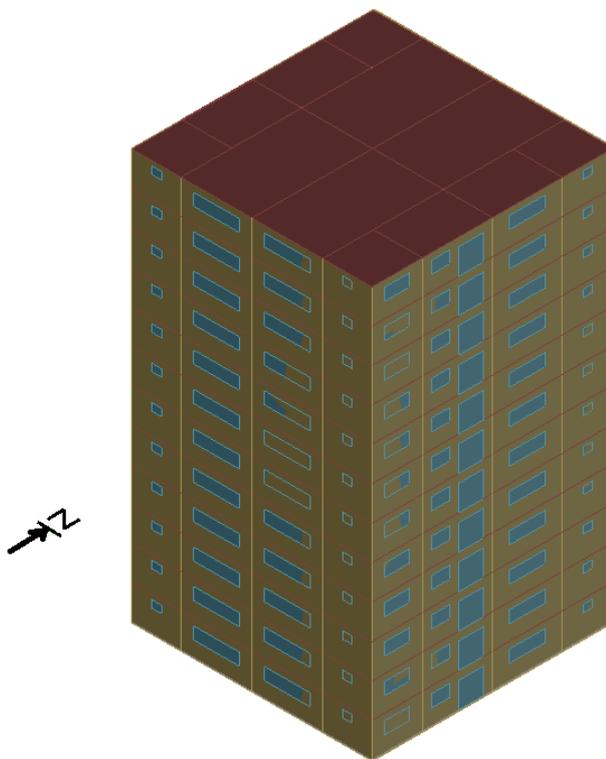
Fonte: Elaborado pelo autor.

5.4.11 Simulação do modelo de base de edifício residencial, ajustes e validação do modelo

As variáveis discutidas da seção 5.4.1 até a 5.4.10 foram inseridas no editor do arquivo de entrada de dados (IDF – *Editor*) do *EnergyPlus*. Os parâmetros restantes para a definição do modelo de base foram utilizados conforme os valores padrões (*default*) recomendados pelo programa de simulação, devido à dificuldade de se encontrarem valores atualizados na literatura. Após a declaração de todas as variáveis definidoras do modelo de base de edifício residencial foi possível simular o consumo anual de energia elétrica e realizar os ajustes

necessários para a calibração do modelo. A Figura 24 apresenta o modelo em 3D do edifício residencial gerado pelo *EnergyPlus* após a simulação.

Figura 24: Modelo de base em 3D do edifício residencial gerado pelo *EnergyPlus* após a simulação

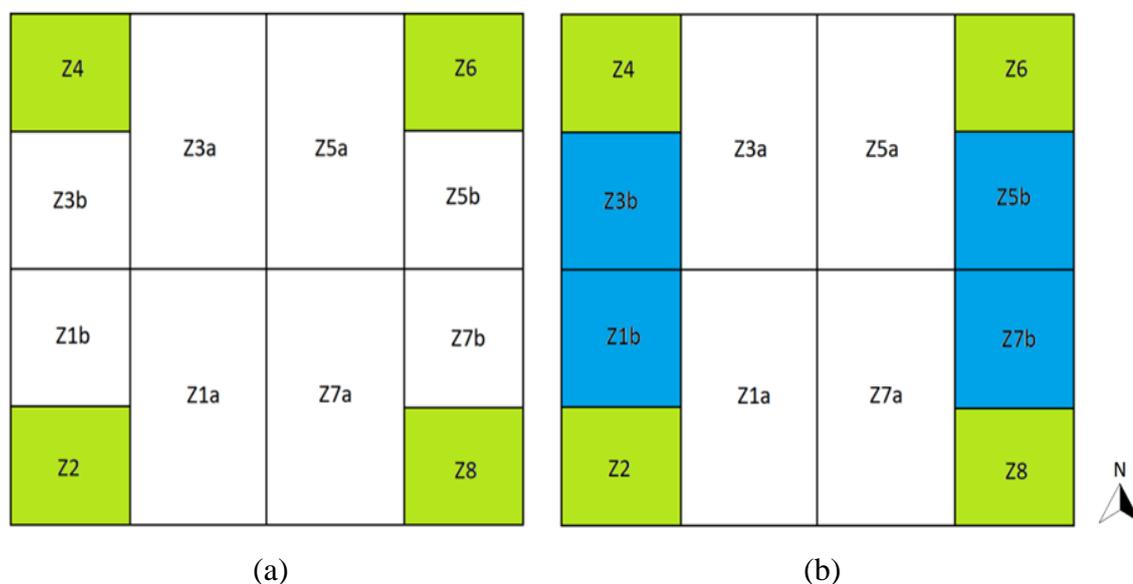


Fonte: Arquivos de saída de dados do *EnergyPlus* (2019).

Nas simulações foi considerada a possibilidade de haver um ou dois aparelhos de ar condicionado instalados em cada apartamento. Na hipótese de haver apenas um aparelho de ar condicionado em cada apartamento, este foi considerado como estando instalado nas suítes (zonas Z2, Z4, Z6 e Z8 da Figura 25). Na hipótese de haver dois aparelhos de ar condicionado instalados nos apartamentos, estes foram considerados como estando instalados nas suítes e em outro ambiente dos apartamentos, representado pelas zonas ímpares b (zonas Z1b, Z3b, Z5b e Z7b da Figura 25). As taxas percentuais de climatização (Quadro 18) correspondentes à situação apresentada na Figura 25 são, respectivamente, de 17,2% para as zonas pares (regiões verdes da Figura 25) e 40,9% para as zonas pares em associação com as ímpares b (regiões verdes e azuis da Figura 25).

Figura 25: Distribuição das zonas climatizadas no modelo de base de edifício residencial:

(a) zonas pares; (b) zonas pares e zonas ímpares b



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados das simulações do modelo de base de edifício residencial para cada uma das possibilidades de climatização apresentadas na Figura 25, em termos de consumo de energia elétrica, são apresentados no Quadro 17.

Considerando que o modelo de base de edifício residencial possui uma área total de piso de 4633,41 m², escrevendo a área climatizada como uma parcela percentual desta área total e calculando o consumo médio mensal de energia por apartamento para os modelos de climatização apresentados no Quadro 17 se obtém os resultados apresentados no Quadro 18.

Quadro 17: Consumo de energia elétrica do modelo de base de edifício residencial para cada uma das possibilidades de climatização apresentadas na Figura 25

Zonas climatizadas (Figura 25)	Área climatizada (m ²)	Consumo de energia elétrica do modelo de base (kWh/ano)
pares	794,88	168480,27
pares e ímpares b	1893,12	219333,58

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 18: Consumos mensais médios de energia elétrica por apartamento em função da área climatizada

Zonas climatizadas (Figura 25)	Área climatizada (%)	Consumo mensal médio de energia elétrica por apartamento (kWh/mês)
pares	17,2	292,5
pares e ímpares b	40,9	380,8

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na seção 5.4.6 o consumo mensal médio de energia elétrica dos apartamentos foi modelado considerando como zonas climatizadas as áreas das suítes (zonas térmicas pares da Figura 25, destacadas em verde) e levando-se em conta as variáveis: renda familiar, área do apartamento e número de moradores; obtendo-se um consumo médio estimado de **293,03 kWh/mês**. Na seção 5.4.7 o consumo mensal de energia dos apartamentos foi modelado considerando as áreas das suítes como zonas climatizadas e levando-se em conta as potências médias e os tempos médios de uso dos equipamentos eletrodomésticos, obtendo-se o consumo médio estimado de **291,30 kWh/mês**. Comparando estes consumos com o consumo previsto pela simulação do modelo de base de edifício residencial para a climatização das zonas pares da Figura 25 (Quadro 18), o qual foi de **292,50 kWh/mês**, tem-se desvios de $-0,18\%$ e $+0,41\%$, respectivamente. Desta forma, pode-se considerar que após todos os ajustes e considerações realizadas nas seções anteriores o modelo base de edifício residencial está calibrado em relação ao consumo médio mensal de energia elétrica por apartamento.

As partições do consumo de energia elétrica, considerando iluminação, climatização e equipamentos, para os resultados do Quadro 18 são apresentadas no Quadro 19.

Quadro 19: Partições do consumo de energia elétrica do modelo de base de edifício residencial após a calibração do modelo

Zonas climatizadas (Figura 25)	Iluminação (%)	Equipamentos (%)	Climatização (%)
pares	15,2	56,0	28,8
pares e ímpares b	11,7	43,0	45,3

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 18 (seção 5.4.7), as partições do consumo de eletricidade considerando a climatização das suítes (zonas pares apresentadas na Figura 25) foram previstas em **59%** para os aparelhos eletrodomésticos, **13%** para a iluminação e **28%** para o sistema de ar condicionado. Comparando esses resultados com os apresentados no Quadro 19 para as zonas pares conclui-se que as previsões de partição de energia elétrica utilizadas para a declaração de variáveis no *EnergyPlus* estão razoavelmente coerentes com os resultados previstos pela simulação do modelo de base de edifício residencial.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo será feita a apresentação e discussão dos resultados em termos de redução do consumo de energia elétrica conseguida com a aplicação de estratégias de projeto passivo, medidas de eficiência energética e estratégias de projeto ativo para os casos de climatização de 17,2% (zonas pares) e 40,9% (zonas pares e zonas ímpares b), apresentados na Figura 25, da área total de piso do modelo de base de edifício residencial validado na seção 5.4.11.

6.1 SIMULAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE PROJETO PASSIVO

As estratégias de projeto passivo simuladas para o modelo de base de edifício residencial foram:

- Substituição dos envidraçados das janelas e portas de sacada por modelos com melhores propriedades térmicas;
- Pintura das paredes externas com tintas de pequeno valor de absorvância no espectro solar;
- Aplicação de camadas de isolamento térmico nas paredes externas;
- Sombreamento das aberturas envidraçadas da fachada norte com a utilização de *overhangs* e *fins* (Figura 30);
- Ventilação natural.

6.1.1 Substituição de envidraçados das janelas e portas de sacadas por modelos com melhores propriedades térmicas

O método empregado na seleção da melhor opção de envidraçado foi simular a aplicação de diversos modelos de vidros, disponíveis no mercado brasileiro, nas janelas e portas de sacadas visando encontrar um modelo que reduzisse os ganhos de calor solar sem causar uma redução excessiva na transmissão luminosa. Três propriedades dos vidros (a definição detalhada das propriedades térmicas e luminosas dos vidros pode ser encontrada no Apêndice G) são especialmente importantes para a definição da melhor opção, são elas: (1) Fator Solar (FS); (2) Transmitância térmica (U) e (3) Transmissão Luminosa (TL).

Após as simulações concluiu-se que a redução do fator solar é a estratégia que apresenta o maior impacto na redução do consumo de energia elétrica. O Quadro 20 apresenta as reduções do consumo de energia elétrica para a simulação da substituição dos vidros das janelas, considerando a climatização das zonas térmicas de números pares (zonas Z2, Z4, Z6 e Z8 da Figura 25), por modelos dos fabricantes CEBRACE e GUARDIAN.

Quadro 20: Resultados da redução do consumo de energia elétrica para a substituição dos vidros das janelas por modelos com melhores propriedades térmicas considerando a climatização das zonas térmicas de números pares

Produto	e (mm)	TL	FS	U (W/m ² .K)	IS	Redução do consumo de energia elétrica
Vidros monolíticos CEBRACE						
Cool-lite ST 120	6	0,20	0,32	5,23	0,63	-7,47%
Cool-lite KNT 140	6	0,41	0,34	3,48	1,21	-7,72%
Cool-lite SKN 144 II	6	0,45	0,27	3,22	1,67	-8,37%
Cool-lite SKN 154	6	0,55	0,29	3,14	1,90	-8,23%
Cool-lite SKN 165	6	0,67	0,35	3,22	1,91	-7,50%
Cool-lite SKN 174	6	0,76	0,43	3,22	1,77	-6,30%
Cool-lite ST 120	6	0,20	0,32	5,23	0,63	-7,47%
Vidros monolíticos GUARDIAN						
Neutral 14 <i>green</i>	4	0,12	0,21	4,27	0,57	-9,19%
Neutral 14 <i>clear</i>	6	0,14	0,22	4,24	0,64	-9,03%
Light Blue 52 <i>clear</i>	4	0,52	0,58	5,61	0,90	-3,27%
Vidros insulados CEBRACE (6mm + 12mm de ar + 6mm, com revestimento na face 2)						
Cool-lite SKN 165 <i>neutral</i>	24	0,58	0,33	1,50	1,76	-6,44%
Cool-lite KNT 155 <i>neutral</i>	24	0,46	0,36	1,90	1,28	-6,62%
Cool-lite KNT 440 <i>green</i>	24	0,31	0,22	1,80	1,41	-8,04%
Cool-lite KNT 455 <i>green</i>	24	0,40	0,27	1,90	1,48	-7,67%

Nota: e – espessura da folha de vidro, TL – índice de transmissão luminosa, FS – fator solar, U – transmitância térmica, IS – índice de seletividade

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados de Westphal (2016).

A partir da análise do Quadro 20 pode-se concluir que as melhores opções de vidros para a redução do consumo de energia elétrica, dentre os modelos estudados, foram os vidros monolíticos do fabricante CEBRACE modelos **cool – lite SKN 144 II** e **cool – lite SKN 154**, pois estes proporcionaram altas reduções do consumo de energia elétrica associadas a altos valores de transmissão luminosa. Os vidros monolíticos do fabricante GUARDIAN modelos **Neutral 14 green** e **Neutral 14 clear**, apesar de terem apresentado as maiores reduções do consumo de energia do Quadro 20, possuem valor bastante reduzido de transmissão luminosa,

fator que poderia escurecer excessivamente o ambiente interno dos apartamentos e aumentar substancialmente a necessidade da utilização de iluminação artificial durante o dia.

As simulações com vidros insulados indicam que a redução excessiva da transmitância térmica (U) dos envidraçados pode não ser uma boa estratégia para a região de Taubaté (Zona bioclimática 3, Apêndice K) pois não conduz à redução do consumo de energia elétrica. Comparando, por exemplo, os modelos de vidro Neutral 14 *clear* (monolítico), da GUARDIAN, com o Cool-lite KNT 440 *green* (insulado), da CEBRACE, os quais possuem o mesmo valor de fator solar (FS), pode-se verificar que a redução da transmitância térmica não conduziu a uma maior economia de energia elétrica, o mesmo valendo quando se comparam os modelos Cool-lite SKN 144 II (monolítico) e Cool-lite KNT 455 *green* (insulado), ambos da CEBRACE. Esse comportamento está associado à redução da perda de calor devido às cargas térmicas internas, pois, ao se reduzir excessivamente a transmitância térmica de elementos da envoltória há uma maior necessidade de utilização do sistema de ar condicionado para remover a carga térmica adicional.

A simulação da substituição dos vidros das superfícies envidraçadas foi realizada empregando-se o objeto “WindowMaterial:SimpleGlazingSystem” do *EnergyPlus*, detalhes da aplicação deste objeto podem ser encontrados no documento *Input output reference* (DOE, 2018d).

6.1.1.1 Substituição de vidros das janelas

Para a simulação da substituição dos vidros das janelas, optou-se pela escolha do modelo de vidro monolítico Cool-lite SKN 144 II (Quadro 20) como referência, devido ao fato deste apresentar uma das mais altas reduções do consumo de energia elétrica, associado a um baixo valor de fator solar e a um dos mais altos índices de seletividade (IS – razão entre o índice de transmissão luminosa e o fator solar, Apêndice G).

O Quadro 21 apresenta as reduções do consumo de energia elétrica proporcionadas pela aplicação do vidro monolítico Cool-lite SKN 144 II do fabricante CEBRACE para os casos de áreas de climatização de 17,2% (zonas pares) e 40,9% (zonas pares e zonas ímpares b, Figura 25). No Quadro 21 são apresentadas somente as parcelas de consumo da energia elétrica que sofreram variação com a aplicação da estratégia de projeto passivo em questão, razão pela qual não são apresentados os consumos devido a iluminação e equipamentos elétricos.

Quadro 21: Resultados da simulação da substituição dos vidros das janelas pelo modelo Cool-lite SKN 144 II do fabricante CEBRACE

Área climatizada igual às zonas pares da Figura 25 (17,2% de área climatizada)			
Tipo de energia	Modelo base (kWh/ano)	EPP (kWh/ano)	Variação no consumo anual de energia elétrica
Aquecimento	276,68	363,45	31,36%
Refrigeração	31857,06	22359,31	-29,81%
Ventilação	16442,19	11753,95	-28,51%
Climatização	48575,93	34476,71	-29,03%
Total	168480,27	154381,05	-8,37%
Área climatizada igual às zonas pares e ímpares b da Figura 25 (40,9% de área climatizada)			
Tipo de energia	Modelo base (kWh/ano)	EPP (kWh/ano)	Variação no consumo anual de energia elétrica
Aquecimento	587,29	767,29	30,65%
Refrigeração	62252,05	43975,41	-29,36%
Ventilação	36589,91	25886,86	-29,25%
Climatização	99429,25	70629,56	-28,97%
Total	219333,58	190533,9	-13,13%

Nota: EEP – Estratégia de Projeto Passivo. A energia de climatização corresponde à soma das parcelas associadas ao aquecimento, refrigeração e ventilação

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conclui-se, a partir da análise dos resultados apresentados no Quadro 21, que a substituição dos vidros da janela por modelos com baixo fator solar permite a redução da carga térmica interna e conseqüentemente reduz o consumo anual de energia elétrica com a refrigeração de ambientes em até 29,8% (climatização das zonas pares). Contudo, há um aumento no consumo de energia para aquecimento dos ambientes em até 31,4% (climatização das zonas pares). O efeito líquido anual da medida é uma redução em torno de 29% no consumo de energia elétrica com climatização dos ambientes, o que pode conduzir a reduções no consumo total de energia elétrica em base anual na faixa de 8,4 a 13,1% para a climatização, respectivamente, das zonas pares (áreas verdes da Figura 25) ou zonas pares e zonas ímpares b (áreas verdes e azuis da Figura 25).

6.1.1.2 Substituição de vidros das portas de sacadas

Seguindo um critério semelhante ao apresentado na seção anterior foi selecionado um vidro laminado modelo Fumê SNL 37 *clear* ($FS = 0,24$, $U = 5,63 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, $TL = 0,23$) de 8 mm de espessura do fabricante GUARDIAN como uma boa opção para as portas das sacadas. O critério principal da escolha foi o vidro com menor fator solar, pois reduzir o fator solar de vidros para regiões de clima quente é uma das estratégias relacionadas a envidraçados que mais contribuem para a redução do consumo de energia elétrica (conforme visto na seção 6.1.1.1). O Quadro 22 apresenta as reduções do consumo de energia elétrica proporcionadas pela aplicação do vidro laminado fumê SNL 37 *clear* da GUARDIAN para os casos de áreas de climatização de 17,2% (zonas pares, Figura 25) e 40,9% (zonas pares e ímpares b, Figura 25).

Quadro 22: Resultados da simulação da substituição dos vidros das portas das sacadas pelo modelo Fumê SNL 37 *clear* do fabricante GUARDIAN

Área climatizada igual às zonas pares da Figura 25 (17,2% de área climatizada)			
Tipo de energia	Modelo base (kWh/ano)	EPP (kWh/ano)	Variação no consumo anual de energia elétrica
Climatização	48575,93	46100,03	-5,10%
Total	168480,27	166004,38	-1,47%
Área climatizada igual às zonas pares e ímpares b da Figura 25 (40,9% de área climatizada)			
Tipo de energia	Modelo base (kWh/ano)	EPP (kWh/ano)	Variação no consumo anual de energia elétrica
Climatização	99429,25	88863,32	-10,63%
Total	219333,58	208767,66	-4,82%

Nota: EPP – Estratégia de Projeto Passivo. A energia de climatização corresponde à soma das parcelas associadas ao aquecimento, refrigeração e ventilação

Fonte: Elaborado pelo autor.

As mesmas conclusões realizadas na seção 6.1.1.1 são válidas para a análise dos resultados apresentados no Quadro 22. Destacando-se que as reduções no consumo de energia elétrica pela substituição dos vidros das portas das sacadas são menores devido a menor área total de envidraçados deste tipo em relação às áreas de janelas.

6.1.2 Pintura das paredes externas com tintas de baixo valor de absorvância no espectro solar

Para estimar o potencial máximo de redução do consumo de energia elétrica com a pintura das paredes externas foi inicialmente simulada a pintura com a tinta que apresenta o menor valor de absorvância no espectro solar encontrado na literatura, a partir do trabalho de Dornelles (2008). O menor valor de absorvância no espectro solar ocorre para a tinta cor branco neve ($\alpha = 10,2\%$), tipo acrílica fosca, da marca Suvinil (outros valores de absorvância para tintas estudadas por Dornelles (2008), que são comumente empregadas em paredes externas, podem ser encontrados no Apêndice H). O Quadro 23 apresenta os resultados encontrados para a aplicação da pintura branco neve, tipo acrílica fosca, da marca Suvinil nas paredes externas.

Quadro 23: Resultados da simulação da pintura das paredes externas com tinta branco neve, tipo acrílica, da marca Suvinil, cuja absorvância é de 10,2%

Área climatizada igual às zonas pares da Figura 25 (17,2% de área climatizada)			
Tipo de energia	Modelo base (kWh/ano)	EPP (kWh/ano)	Variação no consumo anual de energia elétrica
Aquecimento	276,68	449,35	62,41%
Refrigeração	31857,06	20286,92	-36,32%
Ventilação	16442,19	10849,63	-34,01%
Climatização	48575,93	31585,9	-34,98%
Total	168480,27	151490,24	-10,08%
Área climatizada igual às zonas pares e ímpares b da Figura 25 (40,9% de área climatizada)			
Tipo de energia	Modelo base (kWh/ano)	EPP (kWh/ano)	Variação no consumo anual de energia elétrica
Aquecimento	587,29	890,36	51,60%
Refrigeração	62252,05	43992,12	-29,33%
Ventilação	36589,91	27987,04	-23,51%
Climatização	99429,25	72869,52	-26,71%
Total	219333,58	192773,87	-12,11%

Nota: EPP – Estratégia de Projeto Passivo. A energia de climatização corresponde à soma das parcelas associadas ao aquecimento, refrigeração e ventilação

Fonte: Elaborado pelo autor.

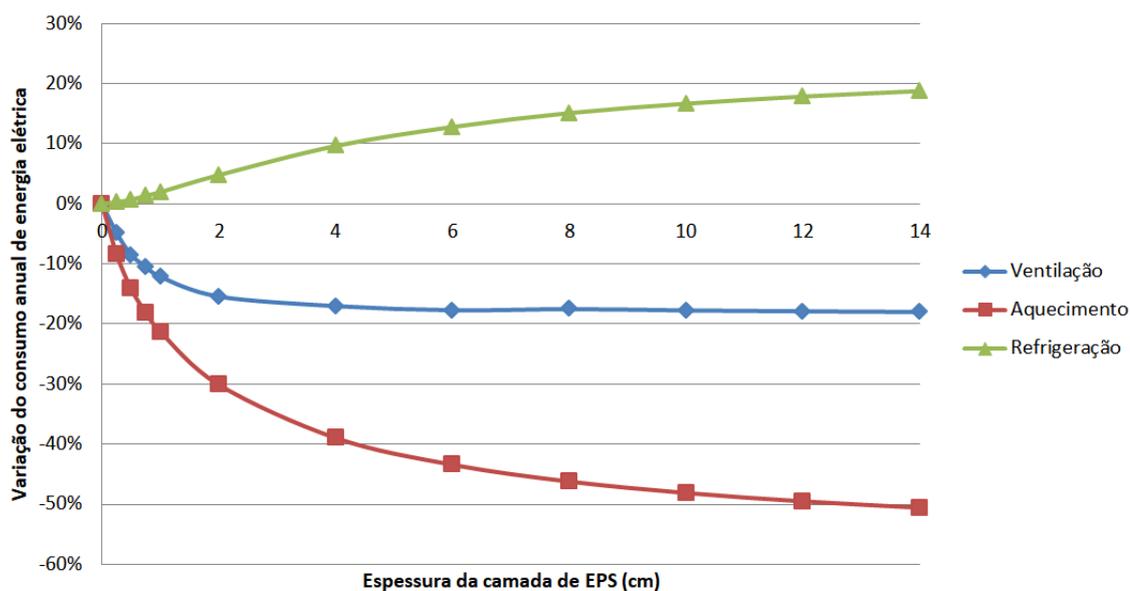
A partir da análise dos resultados apresentados no Quadro 23 é possível concluir que a aplicação de pinturas com baixos valores de absorvância no espectro solar permite a redução do consumo de energia elétrica com climatização de ambientes, para regiões de clima quente, devido à redução das cargas térmicas internas por meio da redução dos ganhos solares. Para os casos de climatização de 17,2% (zonas pares, Figura 25) e 40,9% (zonas pares e ímpares b, Figura 25) os resultados da simulação (Quadro 23) demonstram serem possíveis reduções na faixa de 10 a 12% no consumo de energia elétrica anual com a aplicação de pintura branca, quando se consideram edifícios originalmente com pinturas de cores médias (absorvância variando de 40 a 60%) e sobre o efeito do envelhecimento natural da pintura, o que acarreta um aumento da absorvância em até 15% de acordo com Silva (2017). A simulação da pintura foi realizada a partir do objeto “Material” do *EnergyPlus*, detalhes da aplicação deste objeto podem ser encontrados no documento *Input output reference* (DOE, 2018d).

6.1.3 Aplicação de camadas de isolamento térmico nas paredes externas

Para simular o efeito da aplicação de camadas de isolamento térmico nas paredes da envoltória foram utilizadas as propriedades térmicas do poliestireno expandido (EPS), as quais são apresentadas no Quadro E.1 do Apêndice E. As simulações demonstraram que o comportamento da variação do consumo de energia elétrica anual com a aplicação de camadas de EPS nas paredes externas varia bastante em função da espessura da camada de isolamento térmico e em função da região climatizada dos apartamentos, conforme apresentado nas Figuras 26, 27, 28 e 29.

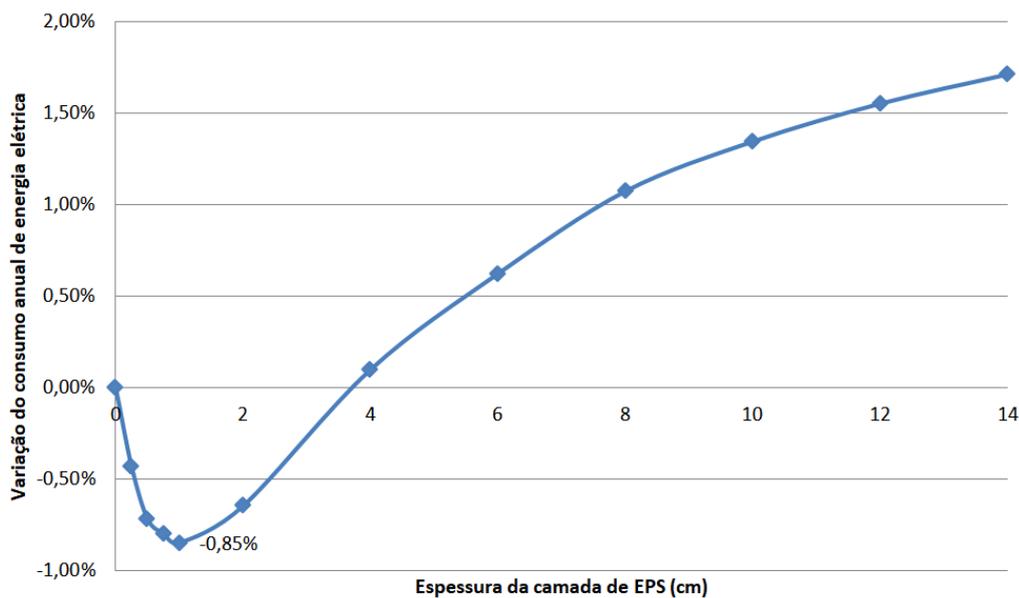
A partir da análise das Figuras 26 e 28 é possível concluir que a aplicação de camadas de isolamento térmico nas paredes externas da envoltória provoca sempre a redução do consumo de energia elétrica com aquecimento, desta forma, o aumento do isolamento térmico da envoltória sempre conduzirá à redução do consumo de energia com climatização para regiões de clima frio nas quais, na maior parte do ano, é preciso aquecer o ambiente interno. Porém, em climas quentes, o super isolamento térmico da envoltória poderá conduzir ao aumento do consumo de energia elétrica com climatização, pois, para este caso, as Figuras 26 e 28 indicam que a tendência é haver o aumento do consumo de energia com refrigeração do ambiente interno.

Figura 26: Impacto da aplicação de camadas de EPS nas paredes da envoltória no consumo de energia elétrica com climatização das zonas pares



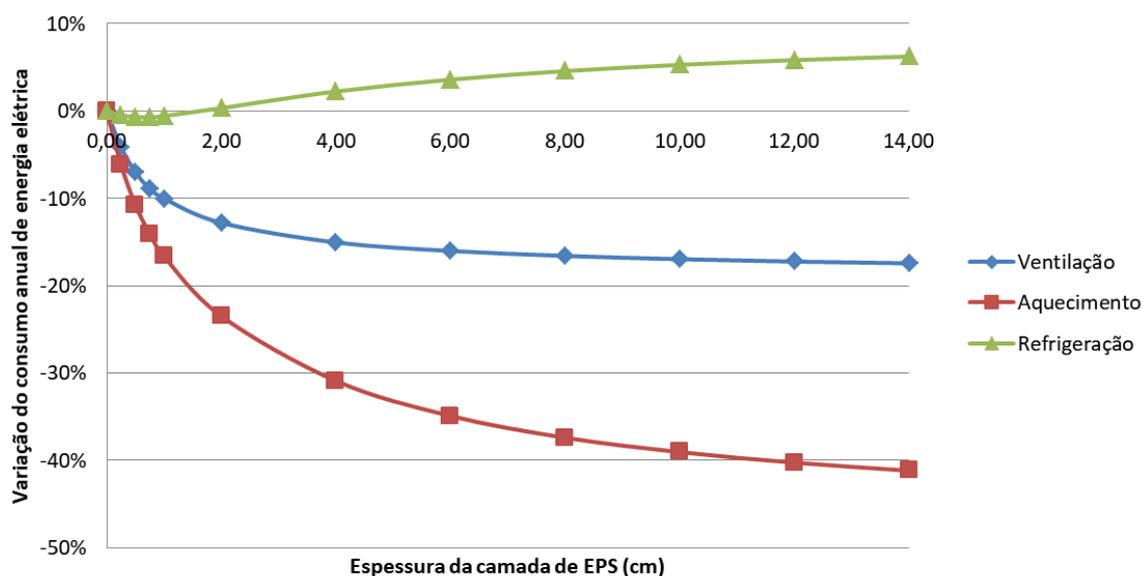
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 27: Variação líquida do consumo anual de energia elétrica com a aplicação de camadas de EPS nas paredes da envoltória para a climatização das zonas pares



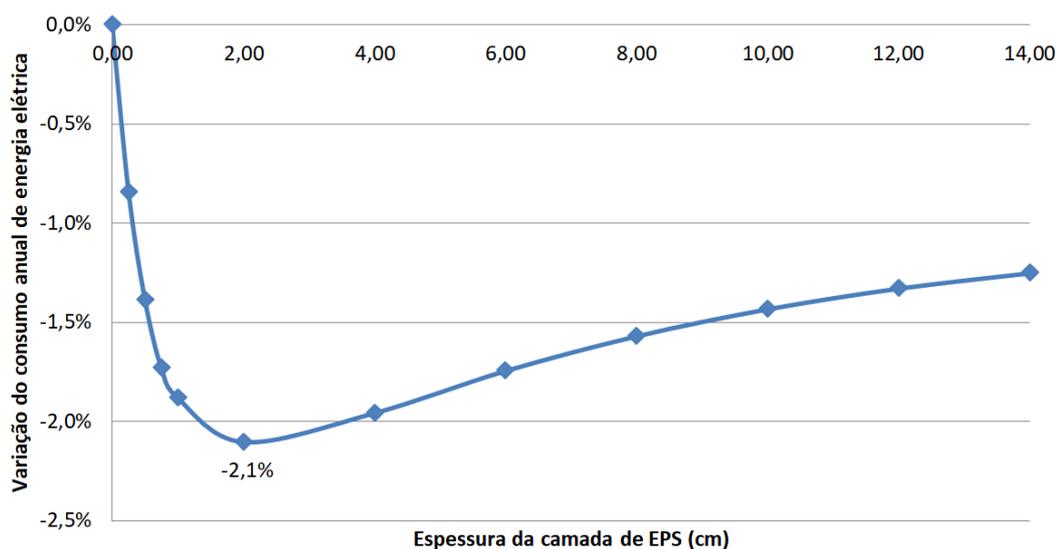
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 28: Impacto da aplicação de camadas de EPS nas paredes da envoltória no consumo de energia elétrica com climatização das zonas pares e ímpares b



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 29: Variação líquida do consumo anual de energia elétrica com a aplicação de camadas de EPS nas paredes da envoltória para a climatização das zonas pares e ímpares b



Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando a Figura 28 é possível concluir que para valores de até aproximadamente 1,5 cm de espessura de camada de EPS ocorre a redução do consumo de energia elétrica com refrigeração, aquecimento e ventilação para o caso de climatização das zonas pares e ímpares b. A partir de 1,5 cm de espessura da camada de EPS o consumo de energia elétrica com a refrigeração do ambiente interno aumenta. Este fenômeno se deve ao fato de que ao

umentar o isolamento térmico da envoltória se reduz as transferências de calor do meio externo para o ambiente interno durante os períodos do dia nos quais a temperatura exterior é maior que temperatura interior; porém, o aumento da resistência térmica da envoltória também reduz a transferência de calor do ambiente interno (devido às cargas térmicas internas e ganhos de calor solar pelas superfícies envidraçadas) para o meio externo durante os períodos do dia nos quais a temperatura interior é maior que a temperatura exterior. Logo, a aplicação de camadas de isolamento térmico poderá ou não conduzir à redução do consumo de energia elétrica dependendo das condições climáticas locais e cargas térmicas internas.

As Figuras 26 e 28 indicam que dependendo dos valores das cargas térmicas internas e quantidade de ambientes climatizados o efeito líquido do isolamento térmico em base anual é reduzir as perdas de calor do ambiente interno para o meio externo. Tal comportamento é benéfico para regiões de clima frio, porém para regiões de clima quente o aumento da resistência térmica da envoltória poderá conduzir ao aumento do consumo de energia elétrica caso o valor da resistência térmica ultrapasse um determinado “valor limite”, o qual depende da quantidade de ambientes climatizados, valores de cargas térmicas internas e, também, das características climáticas locais. Se, na maior parte do ano, o clima é tão quente a ponto de, praticamente, dispensar a necessidade de aquecimento pode-se afirmar que o aumento do isolamento térmico da envoltória provavelmente acarretará o aumento da necessidade de refrigeração dos ambientes internos devido a menor perda da carga térmica interna nos períodos noturnos.

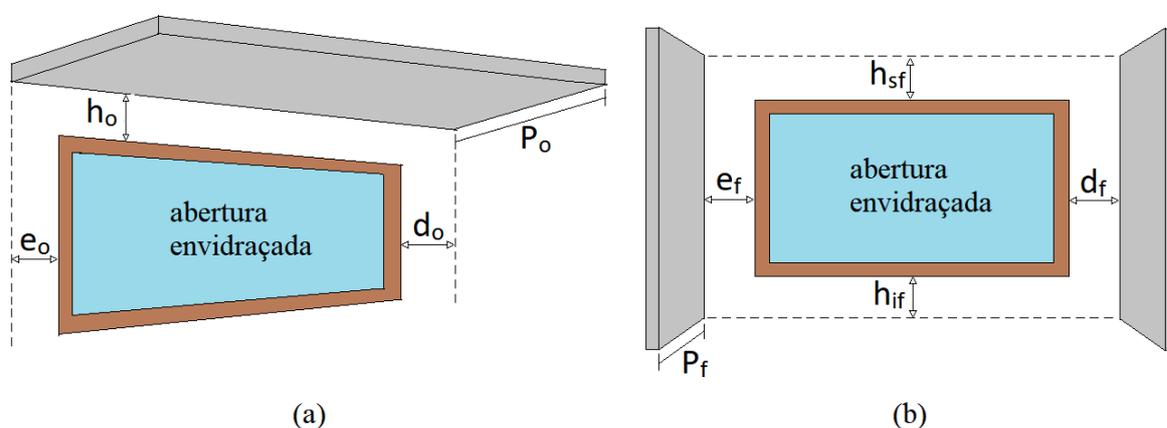
Pacheco e Lamberts (2013) indicaram o fato de que a aplicação de camadas de isolamento térmico é mais efetiva para países de climas frios e que para o caso do Brasil, essa estratégia poderia conduzir ao aumento do consumo de energia com refrigeração dos ambientes devido à redução da perda do calor gerado por meio das cargas térmicas internas.

As Figuras 27 e 29 indicam haver um valor máximo de redução do consumo de energia elétrica com a aplicação de camadas de EPS para regiões de clima quente. Tais máximos de redução ocorreram, neste trabalho, para a aplicação de camadas de EPS de 1 e 2 cm e são, respectivamente, -0,85 e -2,10% para os casos de áreas de climatização de 17,2% (zonas pares) e 40,9% (zonas pares e ímpares b). Para o caso de climatização das zonas pares a aplicação de camadas de EPS com espessura acima de 4 cm, aproximadamente, conduz ao aumento do consumo anual de energia elétrica. A simulação da aplicação de camadas de isolamento térmico nas paredes externas foi realizada a partir dos objetos “Material” e “Construction” do *EnergyPlus*, detalhes da aplicação do objeto podem ser encontrados na referência *Input output reference* (DOE, 2018d).

6.1.4 Sombreamento das aberturas envidraçadas com *overhangs* e *fins* na fachada norte

O sombreamento de aberturas envidraçadas foi simulado somente para a fachada norte (Figuras 15, 17 e 24) do modelo de base de edifício residencial devido ao fato desta ser, ao longo de todo o dia, a fachada com maior incidência direta de radiação solar (Figura 4). Foram simuladas a aplicação isolada de *overhangs* e *fins* (Figura 30) com variadas dimensões, a fim de se encontrar a melhor combinação em termos de redução do consumo de energia elétrica e efeito estético. A definição geométrica de cada um dos parâmetros e dimensões de *overhangs* e *fins* relevantes para a simulação é apresentada na Figura 30.

Figura 30: Parâmetros e dimensões dos elementos de sombreamento de aberturas envidraçadas declaradas nas simulações: (a) *overhang*; (b) *fin*



Nota: P_o – profundidade do *overhang*, h_o – distanciamento vertical entre a lateral superior da abertura e o *overhang*, e_o – distanciamento horizontal entre as laterais esquerdas da abertura e do *overhang*, d_o – distanciamento horizontal entre as laterais direitas da abertura e do *overhang*, P_f – profundidade do *fin*, h_{sf} – distanciamento vertical entre a lateral superior da abertura e o início do *fin*, h_{if} – distanciamento vertical entre a lateral inferior da abertura e o início do *fin*, e_f – distanciamento horizontal entre as laterais esquerdas da abertura e do *fin*, d_f – distanciamento horizontal entre as laterais direitas da abertura e do *fin*

Fonte: Elaborado pelo autor.

As simulações demonstraram que a utilização de *overhangs* e *fins*, como elementos de sombreamento das aberturas envidraçadas, contribui para a redução do consumo anual de energia elétrica. O Quadro 24 apresenta a redução do consumo de energia elétrica com a aplicação de *overhangs* e *fins* para alguns valores de profundidade (os valores dos parâmetros e_o , d_o , e_f e d_f foram definidos em 20 cm, h_o e h_{sf} foram definidos em 10 cm e h_{if} foi definido como tendo valor nulo).

Quadro 24: Resultados da simulação da aplicação de sombreamento externo nas aberturas envidraçadas por meio de *overhangs* e *fins*

P _o (cm)	P _f (cm)	Modelo base (kWh/ano)	EPP (kWh/ano)	Variação no consumo anual de energia elétrica
Área climatizada igual às zonas pares da Figura 25 (17,2% de área climatizada)				
50	50	168480,27	165746,38	-1,62%
80	80	168480,27	164839,03	-2,16%
100	100	168480,27	164470,14	-2,38%
Área climatizada igual às zonas pares e ímpares b da Figura 25 (40,9% de área climatizada)				
50	50	219333,58	216334,71	-1,37%
80	80	219333,58	215341,65	-1,82%
100	100	219333,58	214925,77	-2,01%

Nota: EPP – Estratégia de Projeto Passivo

Fonte: Elaborado pelo autor.

O Quadro 24 demonstra que a aplicação de elementos de sombreamento nas janelas da fachada norte apresenta um potencial de redução do consumo de eletricidade um pouco maior que 2% para o caso de climatização das zonas pares (17,2% de área climatizada) do modelo de base de edifício residencial. Na seção 6.1.6 será visto que, quando combinado com outras estratégias de projeto passivo, a variação de profundidade (P_o e P_f) dos *overhangs* e *fins* não conduz a reduções significativas no consumo de energia elétrica para valores maiores que 50 cm, esse efeito permite reduzir as profundidades dos elementos de sombreamento de modo a não afetar significativamente o ângulo de visão das aberturas envidraçadas, permitindo, ainda, atender a aspectos estéticos das edificações.

A simulação do sombreamento em aberturas envidraçadas foi realizada empregando-se os objetos “Shading: Overhang” e “Shading: Fin” do *EnergyPlus*, detalhes da aplicação do objeto podem ser encontrados na referência *Input output reference* (DOE, 2018d).

6.1.5 Ventilação natural

A simulação da ventilação natural foi realizada por meio da utilização do grupo de objetos “AirflowNetwork” do *EnergyPlus* (DOE, 2018d). A simulação da ventilação natural é feita a partir da definição de um conjunto complexo de parâmetros, como, por exemplo, cronogramas dos pontos de configuração de temperatura das zonas térmicas para os quais a

ventilação natural está disponível, valores máximos e mínimos de fatores de abertura e outros fatores geométricos para as superfícies por onde ocorrem os fluxos de ar, valores máximos e mínimos de gradientes de temperatura entre os ambientes internos e externos para os quais a ventilação natural está disponível, aspectos dimensionais das fachadas, características geométricas das fachadas, coeficientes de pressão do vento em cada fachada, entre outros.

O Quadro 25 apresenta um resumo de algumas variáveis consideradas neste trabalho para a simulação da ventilação natural.

Quadro 25: Resumo de algumas variáveis definidas nos objetos do grupo “AirflowNetwork” para a simulação da ventilação natural

Fatores de abertura das superfícies envidraçadas ²⁷	Janelas 0,5; 0,25 e 0	Portas de sacadas 1 ; 0,50 ; 0,25 e 0
Faixa de temperatura dos ambientes internos para o quais a ventilação natural está disponível ²⁸	20 a 40°C	
Valores mínimo e máximo do gradiente de temperatura entre os ambientes internos e externos para o qual a ventilação está disponível	1 a 20°C	
Cronograma de disponibilidade do sistema	Sempre disponível, desde que atenda aos requisitos anteriores	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados obtidos para a simulação da ventilação natural são apresentados no Quadro 26.

²⁷ Fatores de abertura de superfícies envidraçadas são frações da área total possíveis de serem abertas. Por exemplo, uma janela de área total igual a 4 m² na qual só é possível abrir a metade da área (janelas venezianas de 4 folhas por exemplo) para o fluxo de ar possui um fator de abertura que pode variar de 0 (fechada) até 0,5 (totalmente aberta).

²⁸ Embora o *setpoint* de temperatura de aquecimento para o sistema de ar condicionado tenha sido estabelecido em 18 °C o autor considerou efeitos de sensação térmica por movimentação do ar e estabeleceu um valor mínimo de temperatura interna para a utilização de ventilação natural em 20 °C.

Quadro 26: Resultados da simulação da utilização de ventilação natural

Área climatizada igual às zonas pares da Figura 25 (17,2% de área climatizada)			
Tipo de energia	Modelo base (kWh/ano)	EPP (kWh/ano)	Variação no consumo anual de energia elétrica
Aquecimento	276,68	341,92	23,58%
Refrigeração	31857,06	17874,78	-43,89%
Ventilação	16442,19	13189,51	-19,78%
Climatização	48575,93	31406,21	-35,35%
Total	168480,27	151310,55	-10,19%
Área climatizada igual às zonas pares e ímpares b da Figura 25 (40,9% de área climatizada)			
Tipo de energia	Modelo base (kWh/ano)	EPP (kWh/ano)	Variação no consumo anual de energia elétrica
Aquecimento	587,29	718,37	22,32%
Refrigeração	62252,05	46239,44	-25,72%
Ventilação	36589,91	35563,31	-2,81%
Climatização	99429,25	82521,12	-17,01%
Total	219333,58	202425,45	-7,71%

Nota: EPP – Estratégia de Projeto Passivo. A energia de climatização corresponde à soma das parcelas associadas ao aquecimento, refrigeração e ventilação

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados apresentados no Quadro 26 indicam que existe um potencial de redução do consumo de energia elétrica na faixa de 8 a 10% para a aplicação da estratégia de ventilação natural. Os resultados demonstram que a utilização da ventilação natural pode reduzir o consumo com energia elétrica de climatização em até 35% para o caso de climatização das zonas pares do modelo de base de edifício residencial. As diferenças observadas no Quadro 26 para as áreas de climatização de 17,2% e 40,9% podem ser melhor entendidas quando se consideram as diferenças entre fatores de abertura e distribuição de portas de sacada e janelas definidas em cada zona térmica apresentada na Figura 17.

6.1.6 Combinação das estratégias de projeto passivo

O Quadro 27 apresenta a simulação da combinação das estratégias de projeto passivo vistas nas seções anteriores que conduziram às maiores reduções do consumo de energia elétrica. No Quadro 27 foi utilizado o valor de 50 cm para a profundidade de *overhangs* e *fins* (Figura 30), 1 cm de espessura de camada de EPS para a climatização das zonas pares e

2 cm de espessura de camada de EPS para a climatização das zonas pares e ímpares b. Os valores adotados para as espessuras da camada de EPS foram aqueles que maximizaram a redução do consumo de energia elétrica, conforme foi apresentado nas Figuras 27 e 29.

Quadro 27: Resultados da simulação da combinação das estratégias de projeto passivo que conduziram à maior redução do consumo de energia elétrica

Área climatizada igual às zonas pares da Figura 25 (17,2% de área climatizada)			
Tipo de energia	Modelo base (kWh/ano)	EPP (kWh/ano)	Variação no consumo anual de energia elétrica
Aquecimento	276,68	605,48	118,84%
Refrigeração	31857,06	4196,18	-86,83%
Ventilação	16442,19	3790,51	-76,95%
Climatização	48575,93	8592,17	-82,31%
Total	168480,27	128496,51	-23,73%
Área climatizada igual às zonas pares e ímpares b da Figura 25 (40,9% de área climatizada)			
Tipo de energia	Modelo base (kWh/ano)	EPP (kWh/ano)	Variação no consumo anual de energia elétrica
Aquecimento	587,29	1086,16	84,94%
Refrigeração	62252,05	13613,78	-78,13%
Ventilação	36589,91	12239,24	-66,55%
Climatização	99429,25	26939,18	-72,91%
Total	219333,58	146843,52	-33,05%

Nota: EPP – Estratégia de Projeto Passivo. A energia de climatização corresponde à soma das parcelas associadas ao aquecimento, refrigeração e ventilação

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir dos resultados apresentados no Quadro 27 é possível concluir que as estratégias de projeto passivo estudadas neste trabalho apresentam um grande potencial de redução do consumo de energia elétrica com climatização de ambientes internos quando utilizadas em conjunto. De modo geral, os resultados indicam reduções na faixa de 73% a 82% no consumo de energia elétrica associada à climatização de ambientes, conduzindo a uma redução total entre 23,7% e 33,1% no consumo de energia elétrica em base anual, respectivamente, para os casos de climatização de 17,2% (zonas pares) e 40,9% (zonas pares e ímpares b) da área total de piso.

É importante destacar que a combinação das estratégias de projeto passivo apresentadas no Quadro 27 reduziu o consumo de energia elétrica com climatização de ambientes de tal forma que praticamente dispensou a utilização de aparelhos de ar condicionado. Para o caso de climatização das zonas pares o consumo de energia elétrica associado à refrigeração dos ambientes caiu para o valor de 4196,2 kWh/ano para o edifício inteiro, isso representa apenas em torno de 7,3 kWh/ano de consumo de energia elétrica com refrigeração por apartamento. Esse valor representa apenas 21,5 kWh/ano de carga térmica retirada do ambiente interno (considerando um COP igual a 2,95) para se manter as condições de conforto térmico estabelecidas na seção 5.3.3. Considerando a utilização de um aparelho de ar condicionado de capacidade nominal de refrigeração de 9000 BTU/h (2,64 kW) durante seis meses do ano e oito horas de operação diária, chega-se a conclusão que este aparelho é capaz de retirar uma carga térmica do ambiente interno da ordem de 177 vezes maior do que a requerida, desta forma, após a aplicação das estratégias de projeto passivo praticamente se eliminou a necessidade de utilização de aparelhos de ar condicionado.

6.2 SIMULAÇÃO DE MEDIDAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

As medidas de eficiência energética simuladas para as áreas de climatização representadas pelas zonas pares (17,2% da área total de piso) e zonas pares e ímpares b (40,9% da área total de piso) são:

- Substituição da iluminação com lâmpadas fluorescentes por lâmpadas LED;
- Substituição de equipamentos eletrodomésticos por modelos mais eficientes;
- Substituição do sistema de ar condicionado pelo modelo mais eficiente disponível no mercado brasileiro de ciclo reverso e que possui a tecnologia *inverter*.

6.2.1 Substituição da iluminação com lâmpadas fluorescentes por lâmpadas LED

Para a simulação da iluminação com lâmpadas LED foram escolhidas lâmpadas com altos valores de eficiência luminosa (definida como a razão entre o fluxo luminoso e a potência). O Quadro 28 apresenta as opções de lâmpadas escolhidas para cada ambiente após a realização do cálculo luminotécnico (Apêndice L).

Quadro 28: Modelos de iluminação LED empregados nas simulações

Ambiente	Modelo	Fabricante	Potência (W)	Eficiência luminosa (lm/W)
Suíte	Ultraled bulbo A60	Golden	14	107,6
Quartos	Ultraled bulbo 4U	Golden	18	102,0
Sala	Ultraled bulbo 4U	Golden	18	102,0
Cozinha	Ultraled bulbo 4U	Golden	18	102,0
Banheiros	ALP-LB-08w-B-150-009LM-840	Alper	8	117,0

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados de Golden (2018) e PROCEL (2019).

O cálculo luminotécnico com iluminação LED (Apêndice L) para os ambientes apresentados no Quadro 28 conduziu a uma densidade média de potência de iluminação de $3,17 \text{ W/m}^2$ (Apêndice L). Outros fatores importantes a serem considerados e que são requeridos para a simulação de iluminação são a fração radiante e a fração visível, os valores considerados neste trabalho para a iluminação LED foram 0 e 0,25, respectivamente, conforme recomendação de DOE (2007). Os resultados para a simulação da substituição de lâmpadas fluorescente por lâmpadas LED são apresentados no Quadro 29.

A partir da análise dos resultados apresentados no Quadro 29 é possível concluir que a substituição de lâmpadas fluorescentes por lâmpadas LED apresenta um potencial de redução do consumo de energia elétrica com iluminação de até 43,4%. A substituição por lâmpadas LED também reduz o consumo de energia elétrica com climatização em aproximadamente 1,5% devido ao fato das lâmpadas LED possuírem uma fração radiante desprezível em comparação com as lâmpadas fluorescentes (DOE, 2007).

O impacto no consumo total de energia elétrica dependerá da participação percentual da iluminação no consumo, o Quadro 29 demonstra que é possível atingir valores na faixa de 5,7 a 7,1% de redução no consumo total de energia elétrica.

A simulação da iluminação com lâmpadas LED foi realizada a partir do objeto “Lights” do *EnergyPlus*, detalhes da aplicação do objeto podem ser encontrados na referência *Input output reference* (DOE, 2018d).

Quadro 29: Resultados da simulação da substituição de iluminação fluorescente por iluminação LED

Área climatizada igual às zonas pares da Figura 25 (17,2% de área climatizada)			
Tipo de energia	Modelo base (kWh/ano)	EPP (kWh/ano)	Variação no consumo anual de energia elétrica
Iluminação	25707,09	14552,05	-43,39%
Aquecimento	276,68	290,37	4,95%
Refrigeração	31857,06	31186,85	-2,10%
Ventilação	16442,19	16324,49	-0,72%
Climatização	48575,93	47801,71	-1,59%
Total	168480,27	128496,51	-23,73%
Área climatizada igual às zonas pares e ímpares b da Figura 25 (40,9% de área climatizada)			
Tipo de energia	Modelo base (kWh/ano)	EPP (kWh/ano)	Variação no consumo anual de energia elétrica
Iluminação	25707,09	14552,05	-43,39%
Aquecimento	587,29	614,85	4,69%
Refrigeração	62252,05	61044,18	-1,94%
Ventilação	36589,91	36410,81	-0,49%
Climatização	99429,25	98069,84	-1,37%
Total	219333,58	206819,14	-5,71%

Notas: MEE – Medida de Eficiência Energética. A energia de climatização corresponde à soma das parcelas associadas ao aquecimento, refrigeração e ventilação

Fonte: Elaborado pelo autor.

6.2.2 Substituição de aparelhos eletrodomésticos por modelos mais eficientes

Devido a dificuldade de se realizar levantamentos de dados de ganhos de eficiência de equipamentos eletrodomésticos, ao longo dos últimos anos, de forma individualizada, optou-se por realizar uma estimativa de ganhos médios de eficiência energética considerando a idade média de posse de aparelhos eletrodomésticos e estimativas médias de ganhos de eficiência energética, elaboradas pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Para a determinação da idade média dos equipamentos eletrodomésticos de uma residência foram utilizados dados da pesquisa de posse e hábitos de consumo, realizada pelo programa nacional de conservação de energia elétrica em 2007 (PROCEL, 2007).

A partir dos resultados do PROCEL (2007) foi possível estimar uma idade média de posse de aparelhos elétricos em 6,5 anos (Apêndice P). Posteriormente foi realizada uma

estimativa de ganhos médios de eficiência energética em base anual para aparelhos eletrodomésticos utilizando projeções da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2016) do ano de 2014 até 2019 (Apêndice P).

Os resultados encontrados a partir do método apresentado no Apêndice P indicam que o ganho anual médio de eficiência energética dos equipamentos eletrodomésticos é da ordem de 0,86% ao ano. Por meio do produto deste valor pela idade média dos equipamentos eletrodomésticos (6,5 anos) é possível concluir que a substituição dos equipamentos eletrodomésticos de uma residência conduziria a um ganho médio de eficiência energética em torno de 5,6%. A partir deste ganho seria possível reduzir, por meio da substituição, a densidade de potência dos equipamentos eletrodomésticos de 50,0 para 47,2 W/m². O Quadro 30 apresenta os resultados da simulação da substituição dos equipamentos eletrodomésticos dos apartamentos do modelo de base de edifício residencial por modelos novos.

Quadro 30: Resultados da simulação da substituição de equipamentos eletrodomésticos por modelos novos

Área climatizada igual às zonas pares da Figura 25 (17,2% de área climatizada)			
Tipo de energia	Modelo base (kWh/ano)	EPP (kWh/ano)	Variação no consumo anual de energia elétrica
Equipamentos	25707,09	88922,2	-5,60%
Aquecimento	276,68	283,63	2,51%
Refrigeração	31857,06	31480,65	-1,18%
Ventilação	16442,19	16354,33	-0,53%
Climatização	48575,93	48118,61	-0,94%
Total	168480,27	162747,91	-3,40%
Área climatizada igual às zonas pares e ímpares b da Figura 25 (40,9% de área climatizada)			
Tipo de energia	Modelo base (kWh/ano)	EPP (kWh/ano)	Variação no consumo anual de energia elétrica
Equipamentos	25707,09	88922,2	-5,60%
Aquecimento	587,29	601,33	2,39%
Refrigeração	62252,05	61567,18	-1,10%
Ventilação	36589,91	36448,53	-0,39%
Climatização	99429,25	98617,04	-0,82%
Total	219333,58	213246,34	-2,78%

Notas: MEE – Medida de Eficiência Energética. - Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados apresentados no Quadro 30 indicam potenciais de redução no consumo de energia elétrica no intervalo de 2,8 a 3,4% para a substituição de aparelhos eletrodomésticos para os casos de áreas de climatização de 17,2% e 40,9%, respectivamente. Pode-se concluir, também, que a substituição dos aparelhos eletrodomésticos conduz a uma redução aproximada de 1% no consumo de energia elétrica associada à climatização de ambientes, devido à redução da fração radiante total.

A simulação da substituição de equipamentos elétricos por modelos mais eficientes foi realizada a partir do objeto “ElectricEquipment” do *EnergyPlus*, detalhes da aplicação do objeto podem ser encontrados na referência *Input output reference* (DOE, 2018d).

6.2.3 Substituição dos aparelhos de ar condicionado pelo modelo mais eficiente disponível no mercado brasileiro de ciclo reverso e com a tecnologia *inverter*

Após a simulação de combinações de estratégias de projeto passivo (seção 6.1.6) se verificou que ocorrem grandes reduções no consumo de energia com climatização dos ambientes internos. Para o caso da climatização das zonas pares, houve redução de 82,3% no consumo de energia elétrica com climatização e para a climatização das zonas pares e ímpares b houve uma redução de 72,9% no consumo de energia elétrica com climatização. Desta forma, após a aplicação das estratégias de projeto passivo não é mais necessário utilizar equipamentos de ar condicionado com capacidades de refrigeração de 12.000 BTU/h, sendo possível climatizar os ambientes com aparelhos de capacidade muito menor.

Neste trabalho optou-se pela escolha de um modelo de aparelho de ar condicionado tipo *split hi-wall* de rotação variável (compressor com a tecnologia *inverter*)²⁹ e ciclo reverso com capacidade de refrigeração de 9000 BTU/h conforme especificado no Quadro 31. O motivo da escolha foi o fato do modelo apresentar o maior coeficiente de desempenho disponível no mercado brasileiro, dentre os modelos encontrados na literatura.

Os resultados da simulação da substituição do aparelho de ar condicionado do tipo *split hi-wall* de rotação fixa e capacidade de refrigeração igual a 12000 BTU/h, pelo modelo apresentado no Quadro 31 são apresentados no Quadro 32.

²⁹ Maiores detalhes de funcionamento da tecnologia *inverter*, bem como do ciclo reverso e outras características de aparelhos de ar condicionado tipo *split* podem ser encontradas no Apêndice Q.

Quadro 31: Aparelho de ar condicionado tipo *split hi-wall* de ciclo reverso, compressor de rotação variável com o maior coeficiente de desempenho encontrado na literatura e disponível no mercado brasileiro

Marca	GREE	
Modelo	Unidade interna	GWH09TB-D3DNA1C/I
	Unidade externa	GWH09TB-D3DNA1C/O
Tipo de compressor	De rotação variável (<i>Inverter</i>)	
Tipo de ciclo	Quente e frio (ciclo reverso)	
Capacidade de refrigeração	9000 BTU/h (2637 W)	
Capacidade de Aquecimento	9000 BTU/h (2637 W)	
COP ⁽¹⁾ do ciclo de refrigeração	4,79 (W/W)	
COP do ciclo de aquecimento	5,10 (W/W) ³⁰	
Tensão	220 V	
Faixa de classificação no PBE ⁽²⁾	A (mais eficiente)	
Consumo mensal de energia elétrica para teste padrão de 1h por dia	11,6 kWh/mês	

Nota: (1) COP – *Coefficient of Performance*; (2) PBE – Programa Brasileiro de Etiquetagem

Fonte: INMETRO (2018).

Analisando os resultados apresentados no Quadro 32 é possível concluir que a substituição dos aparelhos de ar condicionado com compressor de rotação fixa e coeficiente de desempenho, para o ciclo de refrigeração, igual a 2,95 por um modelo com a tecnologia *inverter* (compressor de rotação variável) e coeficiente de desempenho, para o ciclo de refrigeração, igual a 4,79, pode conduzir a grandes economias de energia elétrica (na faixa de 17,5 a 28,6% para os casos de climatização estudados neste trabalho).

Os valores de redução do consumo de energia elétrica com climatização dos ambientes apresentados no Quadro 32 (entre 60,7 e 63,2%) estão de acordo com valores previstos por fabricantes de ar condicionado para a substituição de aparelhos com compressores de rotação fixa por modelos com a tecnologia *inverter*. Por exemplo, o fabricante DAIKIN prevê que com a substituição de aparelhos de ar condicionado convencionais por modelos similares, contudo, *inverter*, é possível gerar economias de energia elétrica na faixa de 30 a 50% (DAIKIN, 2018).

³⁰ Estimado por meio da equação de regressão linear apresentada na Figura 23.

Quadro 32: Resultados da simulação da substituição do sistema de ar condicionado pelo modelo apresentado no Quadro 31

Área climatizada igual às zonas pares da Figura 25 (17,2% de área climatizada)			
Tipo de energia	Modelo base (kWh/ano)	EPP (kWh/ano)	Variação no consumo anual de energia elétrica
Aquecimento	276,68	201,99	-27,00%
Refrigeração	31857,06	16789,6	-47,30%
Ventilação	16442,19	2079,55	-87,35%
Climatização	48575,93	19071,14	-60,74%
Total	168480,27	138975,48	-17,51%
Área climatizada igual às zonas pares e ímpares b da Figura 25 (40,9% de área climatizada)			
Tipo de energia	Modelo base (kWh/ano)	EPP (kWh/ano)	Variação no consumo anual de energia elétrica
Aquecimento	587,29	438	-25,42%
Refrigeração	62252,05	32060,45	-48,50%
Ventilação	36589,91	4111,39	-88,76%
Climatização	99429,25	36609,84	-63,18%
Total	219333,58	156514,18	-28,64%

Notas: MEE – Medida de Eficiência Energética. A energia de climatização corresponde à soma das parcelas associadas ao aquecimento, refrigeração e ventilação

Fonte: Elaborado pelo autor.

A simulação da substituição do sistema de ar condicionado foi realizada por meio da inserção de dados em objetos do grupo “HVACTemplate” do *EnergyPlus*, detalhes da aplicação do grupo de objeto podem ser encontrados em DOE (2018d).

6.2.4 Combinação das medidas de eficiência energética

Os resultados da simulação da combinação das medidas de eficiência energética apresentadas da seção 6.2.1 até a 6.2.3 são apresentados no Quadro 33. Pela análise do Quadro 33 pode-se concluir que é possível atingir grandes economias de energia com medidas de eficiência energética, principalmente com a substituição de lâmpadas fluorescentes por lâmpadas LED e com a substituição de equipamentos de ar condicionado de rotação fixa por modelos com a tecnologia *inverter*, de pequena capacidade de refrigeração (após a redução das cargas térmicas com a aplicação de estratégias de projeto passivo) e grande valor de

coeficiente de desempenho. As simulações demonstram que é possível reduzir o consumo de eletricidade na faixa de 27,6 a 36,6% para os casos de climatização de um ou dois ambientes dos apartamentos (Figura 25), respectivamente.

Quadro 33: Resultados da simulação da combinação de medidas de eficiência energética

Área climatizada igual às zonas pares da Figura 25 (17,2% de área climatizada)			
Tipo de energia	Modelo base (kWh/ano)	EPP (kWh/ano)	Variação no consumo anual de energia elétrica
Iluminação	25707,09	14552,05	-43,39%
Equipamentos	25707,09	88922,2	-5,60%
Aquecimento	276,68	218,14	-21,16%
Refrigeração	31857,06	16227,44	-49,06%
Ventilação	16442,19	2029,81	-87,65%
Climatização	48575,93	18475,39	-61,97%
Total	168480,27	121949,64	-27,62%
Área climatizada igual às zonas pares e ímpares b da Figura 25 (40,9% de área climatizada)			
Tipo de energia	Modelo base (kWh/ano)	EPP (kWh/ano)	Variação no consumo anual de energia elétrica
Iluminação	25707,09	14552,05	-43,39%
Equipamentos	25707,09	88922,2	-5,60%
Aquecimento	587,29	473,13	-19,44%
Refrigeração	62252,05	31041,28	-50,14%
Ventilação	36589,91	4032,88	-88,98%
Climatização	99429,25	35547,29	-64,25%
Total	219333,58	139021,55	-36,62%

Notas: MEE – Medida de Eficiência Energética. A energia de climatização corresponde à soma das parcelas associadas ao aquecimento, refrigeração e ventilação

Fonte: Elaborado pelo autor.

6.3 SIMULAÇÃO DA COMBINAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE PROJETO PASSIVO E MEDIDAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Os resultados da simulação da combinação das estratégias de projeto passivo (vistas na seção 6.1) e medidas de eficiência energética (vistas na seção 6.2) que conduziram às maiores reduções do consumo de energia elétrica são apresentados no Quadro 34.

Quadro 34: Resultados da simulação da combinação de estratégias de projeto passivo e medidas de eficiência energética

Área climatizada igual às zonas pares da Figura 25 (17,2% de área climatizada)			
Tipo de energia	Modelo base (kWh/ano)	EPP (kWh/ano)	Variação no consumo anual de energia elétrica
Iluminação	25707,09	14552,05	-43,39%
Equipamentos	25707,09	88922,2	-5,60%
Aquecimento	276,68	369,57	33,57%
Refrigeração	31857,06	2175,33	-93,17%
Ventilação	16442,19	508,53	-96,91%
Climatização	48575,93	3053,43	-93,71%
Total	168480,27	106527,68	-36,77%
Área climatizada igual às zonas pares e ímpares b da Figura 25 (40,9% de área climatizada)			
Tipo de energia	Modelo base (kWh/ano)	EPP (kWh/ano)	Variação no consumo anual de energia elétrica
Iluminação	25707,09	14552,05	-43,39%
Equipamentos	25707,09	88922,2	-5,60%
Aquecimento	587,29	682,97	16,29%
Refrigeração	62252,05	6743,34	-89,17%
Ventilação	36589,91	1450,36	-96,04%
Climatização	99429,25	8876,67	-91,07%
Total	219333,58	112350,92	-48,78%

Notas: MEE – Medida de Eficiência Energética. A energia de climatização corresponde à soma das parcelas associadas ao aquecimento, refrigeração e ventilação

Fonte: Elaborado pelo autor.

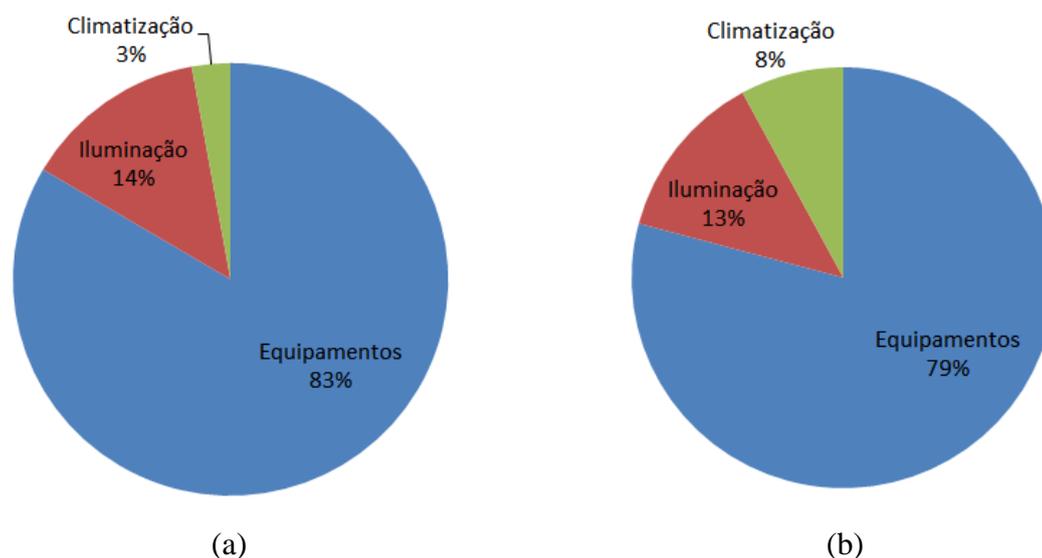
A partir dos resultados apresentados no Quadro 34 é possível concluir que por meio da aplicação de estratégias de projeto passivo e medidas de eficiência energética é possível reduzir o consumo de energia elétrica em até 36,8% e 48,8% para edifícios com um ou dois aparelhos de ar condicionado, respectivamente, instalados, nas suítes e sala de estar; simulados, neste trabalho, por meio da climatização das zonas pares (regiões pintadas em verde na Figura 25) e zonas pares associadas com zonas ímpares b (regiões pintadas em verde e azul na Figura 25).

Os resultados encontrados neste trabalho para as reduções do consumo de energia elétrica concordam com resultados apontados pela literatura como, por exemplo, o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL) estima em 30 e 50%,

respectivamente, o potencial de redução do consumo de energia em edificações antigas e novas por meio da aplicação de medidas de eficiência energética (PROCEL, 2019a). Pavel e Blagoeva (2018) estimam que a aplicação de medidas profundas de renovação pode reduzir em, aproximadamente, 36% o consumo de energia das edificações.

Considerando os consumos de energia elétrica apresentados no Quadro 34 como particionados em equipamentos, iluminação e condicionamento de ambientes têm-se as partições de consumo apresentadas na Figura 31. Torna-se bastante claro, analisando a Figura 31, que após a aplicação das estratégias de projeto passivo e medidas de eficiência energética é possível praticamente eliminar as necessidades de consumo de energia com climatização dos ambientes internos. Tal possibilidade foi apontada, por exemplo, por Anderson (2016) que destacou que, dependendo da zona climática, é possível até mesmo eliminar a necessidade de utilização de equipamentos de ventilação e condicionamento de ar.

Figura 31: Partições do consumo anual de energia elétrica após a aplicação de estratégias de projeto passivo e medidas de eficiência energética: (a) climatização das zonas pares; (b) climatização das zonas pares e ímpares b

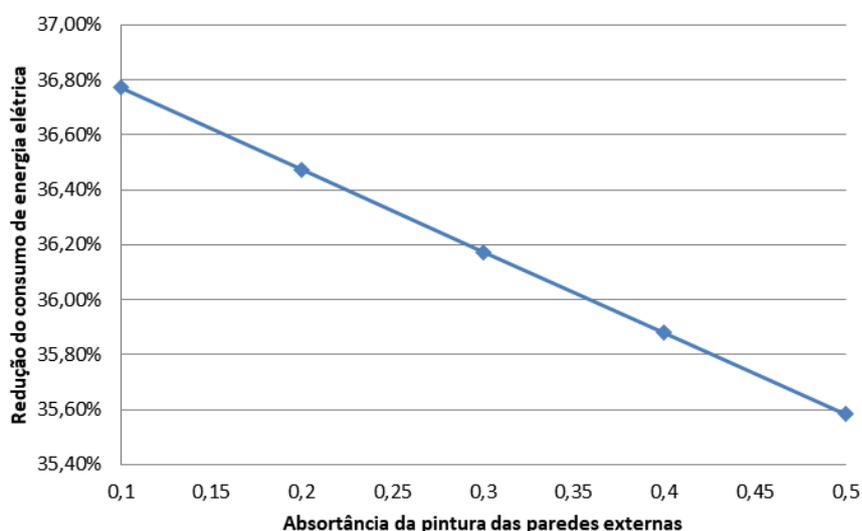


Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados apresentados no Quadro 34 consideraram a pintura das paredes externas com tinta branca de absorvância no espectro solar igual a 0,10. Quando em associação com outras estratégias de projeto passivo (seção 6.1) e medidas de eficiência energética (seção 6.2) a variação da absorvância no espectro solar da pintura das paredes externas até valores de 0,5 (cores médias) não conduz a grandes diminuições no potencial de redução do consumo de

energia elétrica, conforme apresentado na Figura 32 para o caso de climatização das zonas pares (17,2% de área climatizada).

Figura 32: Variação da redução do consumo de energia elétrica em função da absortância no espectro solar da pintura das paredes externas para o caso de climatização das zonas pares



Fonte: Elaborado pelo autor.

Como pode ser observado na Figura 32, a redução do consumo de energia elétrica varia pouco em função da absortância solar da pintura externa quando esta estratégia é utilizada em conjunto com as estratégias de projeto passivo e medidas de eficiência energética discutidas nas seções 6.1 e 6.2. A Figura 32 indica que a diferença entre as reduções do consumo de energia elétrica conseguidas com pintura de absortância igual a 0,1 e absortância igual a 0,4 é menor que 1%, desta forma, quando em associação com outras estratégias de projeto passivo e medidas de eficiência energética, a utilização de pintura branca não é obrigatória para se conseguir grandes reduções do consumo de energia elétrica, porém, o autor recomenda a utilização de valores menores que 0,4.

6.4 SIMULAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE PROJETO ATIVO

Neste trabalho, a única estratégia de projeto ativo considerada nas simulações é a geração de energia elétrica por meio da instalação de painéis fotovoltaicos no telhado do edifício. Tal simplificação leva em conta o fato desta ser a estratégia de projeto ativo mais comumente empregada em edifícios de energia zero (Tabela 5).

A simulação da geração de energia elétrica local é feita no *EnergyPlus* por meio da utilização de objetos do grupo “Electric Load Center Generator Specifications” (DOE, 2018d) e se constitui em um processo complexo. Há três objetos possíveis de se utilizar para o modelamento das propriedades físicas dos painéis fotovoltaicos, compostos por um modelo simples (baseado apenas na eficiência das células fotovoltaicas, fatores de conversão de energia e em cronogramas de utilização e disponibilidade) e dois modelos mais complexos, sendo um empírico (baseado em coeficientes empíricos estabelecidos por *Sandia National Laboratory*) e o outro baseado em modelos teóricos do comportamento físico do diodo. Neste trabalho optou-se pela utilização do modelo equivalente de um diodo³¹ (detalhes deste modelo podem ser encontrados no Apêndice R) para a descrição do comportamento físico dos painéis fotovoltaicos devido ao fato desta abordagem ser largamente utilizada na literatura.

Após a declaração das propriedades físicas dos painéis fotovoltaicos é necessário declarar no *EnergyPlus* as propriedades dos inversores e os arranjos dos circuitos pertencentes ao telhado de cada uma das zonas térmicas definidas para o último andar do modelo de base do edifício. O objeto escolhido neste trabalho para o modelamento dos painéis fotovoltaicos não permite especificar angulações dos painéis em relação à superfície de apoio. O ângulo de inclinação do painel em relação ao plano horizontal (β) e seu respectivo ângulo de azimute (γ) são considerados, pelo objeto escolhido, como sendo os mesmos da superfície de apoio dos painéis fotovoltaicos. Desta forma, para simular uma inclinação (β) maior que zero foi necessário declarar superfícies “virtuais” de propriedades térmicas semelhantes às do ar para servir de apoio a cada um dos painéis fotovoltaicos.

Outra questão a ser resolvida é determinação da combinação mais eficiente do arranjo de circuitos de painéis fotovoltaicos e inversores na região de telhado de cada uma das zonas térmicas do último andar de modo a aproveitar o melhor ângulo de inclinação e azimute, minimizar efeitos de sombreamento entre painéis vizinhos e maximizar o aproveitamento do espaço disponível, alocando a maior quantidade possível de painéis fotovoltaicos. Tal tarefa pode ser feita por ajustes sucessivos baseados nos resultados de simulações com o *EnergyPlus*, porém, essa solução é exaustiva, pois requer a declaração e atualização de um grande número de dados de entrada, além do fato de consumir um tempo considerável com simulações.

³¹ O modelo equivalente de um diodo consiste em representar o comportamento físico de um painel fotovoltaico por meio da representação em um circuito contendo uma fonte de corrente ligada em paralelo com um diodo e com uma carga resistiva externa (CHEN, 2011). Um maior nível de detalhamento sobre as equações e circuitos empregados no modelo equivalente de um diodo é apresentado no Apêndice R.

Assim, neste trabalho optou-se por pré-selecionar parâmetros através de um estudo realizado com o auxílio do *software* Excel, empregando-se sistemas de coordenadas esféricas para a determinação da direção de incidência dos raios solares sobre os painéis fotovoltaicos, determinação do melhor ângulo de inclinação dos painéis e minimização do efeito de sombreamento entre painéis vizinhos, considerando os solstícios de verão e inverno ao meio dia local verdadeiro da cidade de Taubaté. Foi também realizado um estudo de otimização da utilização do espaço disponível e do arranjo para a instalação dos circuitos de painéis fotovoltaicos e inversores (detalhes dos equacionamentos são apresentados no Apêndice R).

Conjuntos de painéis fotovoltaicos foram testados visando encontrar os modelos cuja combinação de dimensões, eficiência e potência de pico³² conduzissem à maior produção de eletricidade em base anual por metro quadrado dentre os modelos pesquisados.

Após os estudos foram selecionados dois modelos de painéis fotovoltaicos para a realização de simulações da produção local de energia elétrica renovável. Primeiramente foram realizadas simulações com um painel fotovoltaico do fabricante Canadian Solar modelo CS6-K 275P, cuja eficiência (16,8%) corresponde aproximadamente à eficiência média (16,5%) de 226 modelos de módulos fotovoltaicos certificados com o selo Procel em fevereiro de 2020 (PROCELINFO, 2020). Posteriormente foram realizadas simulações da produção de energia elétrica local utilizando o modelo de painel fotovoltaico mais eficiente entre os 226 modelos certificados com selo Procel em fevereiro de 2020 (o qual foi o modelo SPR-E20327-COM do fabricante SunPower, que possui uma eficiência de 20,1%).

6.4.1 Simulação da produção de energia elétrica fotovoltaica local com o modelo de painel fotovoltaico CS6-K 275P do fabricante Canadian Solar

As propriedades necessárias para a definição no *Energyplus* do modelo equivalente de um diodo para o módulo fotovoltaico CS6-K 275P do fabricante Canadian Solar são apresentadas no Quadro 35.

³² Potência de pico é a potência obtida em teste padrão com irradiação de 1000 W/m² e 25°C de temperatura de acordo com Canadian Solar (2017).

Quadro 35: Propriedades do painel fotovoltaico CS6-K 275P do fabricante Canadian Solar para a definição do modelo equivalente de um diodo

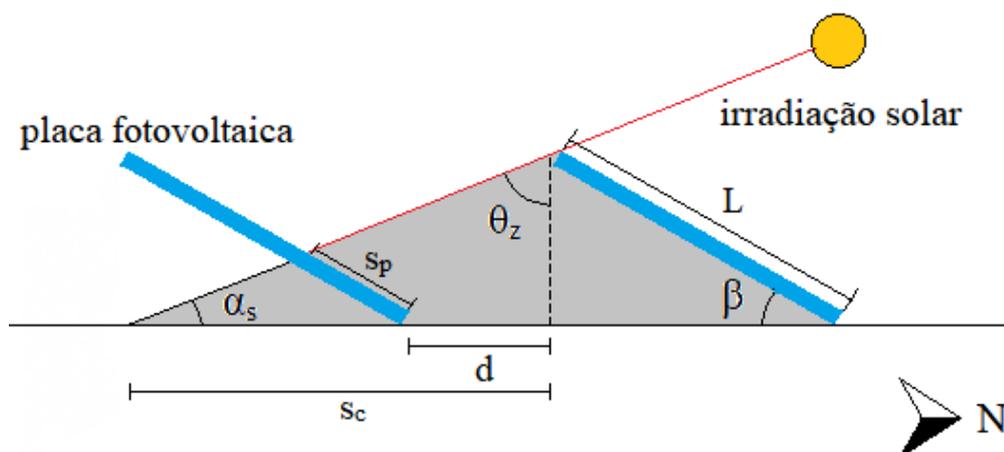
Dados elétricos	
Potência nominal máxima ($P_{\text{máx}}$)	275 W
Tensão no ponto de máxima potência (V_{mp})	31,0 V
Corrente elétrica no ponto de máxima potência (I_{mp})	8,88 A
Tensão de circuito aberto (V_{oc})	38,0 V
Corrente de curto circuito (I_{sc})	9,45 A
Eficiência do módulo	16,8%
Dados mecânicos	
Tipo de célula	policristalina
Configuração de células	60 (6x10)
Dimensões	1650 x 992 x 40 mm
Massa	18,2 kg
Características de temperatura	
Faixa de temperatura de operação	-40 a 85°C
Coefficiente de temperatura (P_{max})	-0,41% / °C
Coefficiente de temperatura (V_{oc})	-0,31% / °C
Coefficiente de temperatura (I_{sc})	0,053% / °C

Nota: Os dados elétricos foram obtidos em teste padrão com irradiação de 1000 W/m² e 25°C de temperatura de operação

Fonte: Canadian Solar (2017).

A pré-seleção de parâmetros realizada com o auxílio do *software* Excel indicou, como uma das melhores opções, a utilização do ângulo de inclinação dos painéis fotovoltaicos e ângulo de azimute igual, respectivamente, a 23 e 0° (Apêndice R). Os circuitos de painéis fotovoltaicos e inversores foram planejados nas áreas correspondentes ao telhado de cada uma das zonas térmicas do último andar do modelo de base de edifício residencial de modo a alocar o maior número de painéis e reduzir os efeitos de sombreamento o máximo possível. Foi considerado como limite de tolerância um sombreamento máximo de 5% da área do painel fotovoltaico para os períodos do ano de menor elevação solar. O modelo geométrico utilizado para os cálculos de sombreamento e distanciamento entre painéis fotovoltaicos vizinhos é apresentado na Figura 33.

Figura 33: Modelo geométrico para a determinação do efeito de sombreamento entre painéis fotovoltaicos vizinhos para o hemisfério sul

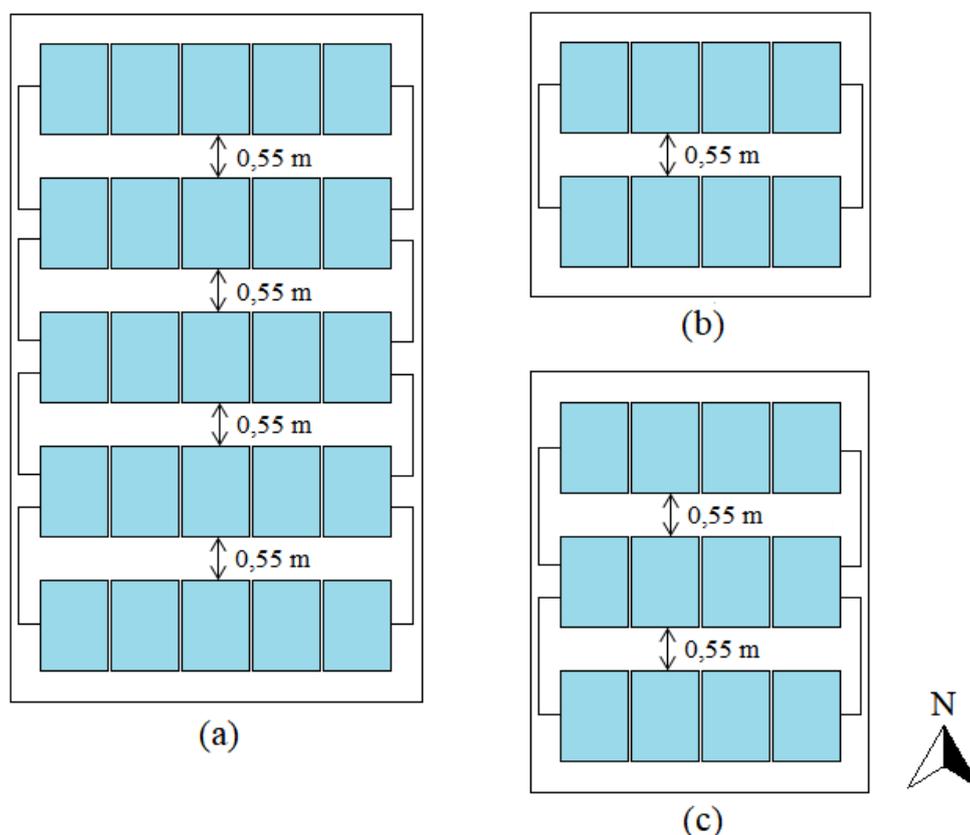


Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 33, α_s é o ângulo de elevação solar em relação ao plano horizontal; θ_z é o ângulo de zênite; β é o ângulo de inclinação do painel fotovoltaico em relação ao plano horizontal; L é o comprimento da placa; S_p é o comprimento da sombra que um painel fotovoltaico projeta sobre seu vizinho; S_c é o comprimento da sombra no plano horizontal produzida por um painel a partir de sua borda superior e d é o distanciamento no plano horizontal entre a borda superior de um painel e o lado apoiado ao chão do painel vizinho. O equacionamento para o cálculo do sombreamento considerando a situação apresentada na Figura 33 pode ser encontrado no Apêndice R.

A partir dos dados geométricos do painel fotovoltaico apresentado no Quadro 35, do modelo esquemático apresentado na Figura 33 e das dimensões das zonas térmicas (Figura 17), foi possível concluir que apoiar os painéis no teto do edifício por meio de sua menor dimensão e calcular um distanciamento que admita no máximo um sombreamento de 5% de um painel sobre seu vizinho nos períodos do ano de menor elevação solar, representa uma das soluções que permite a alocação do maior número de painéis nas regiões do telhado correspondentes a cada uma das zonas térmicas do último andar do modelo de base de edifício residencial. A configuração dos circuitos de painéis fotovoltaicos aplicando esta estratégia é apresentada na Figura 34, respectivamente para as regiões de telhado correspondentes às zonas térmicas pares, ímpares a e ímpares b.

Figura 34: Disposição dos painéis fotovoltaicos modelo CS6-K 275P do fabricante Canadian Solar em circuitos nas regiões de telhado correspondentes às zonas térmicas apresentadas na Figura 17: (a) circuito de painéis fotovoltaicos nas zonas ímpares a; (b) circuito de painéis fotovoltaicos nas zonas pares; (c) circuito de painéis fotovoltaicos nas zonas ímpares b



Fonte: Elaborado pelo autor.

Como pode ser observado a partir da Figura 34, é possível instalar até 25, 8 e 12 painéis fotovoltaicos, com as propriedades apresentadas no Quadro 35, em cada uma das regiões de telhado correspondentes a cada uma das zonas térmicas: (1) zonas ímpares a; (2) zonas pares e (3) zonas ímpares b. Na Figura 34 foi considerado um ângulo de inclinação dos painéis fotovoltaicos em 23° em relação ao plano horizontal (Figura 33, com $\beta = 23^\circ$) e azimute igual a 0° .

Com base nas propriedades dos circuitos em série e paralelo para associação de geradores e considerando as propriedades dos painéis fotovoltaicos apresentadas no Quadro 35, pode-se demonstrar que as potências e tensões máximas para as associações de circuitos da Figura 34 apresentam as distribuições apresentadas no Quadro 36.

Quadro 36: Potências e tensões máximas para cada associação de circuitos de painéis fotovoltaicos pertencentes ao telhado das zonas pares, ímpares a e ímpares b

Zona térmica	Potência máxima (W)	Tensão máxima (V)
Zona ímpar a	6875	190
Zona ímpar b	3300	152
Zona par	2200	152

Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando os resultados apresentados no Quadro 36 foram escolhidos os inversores apresentados no Quadro 37 para a realização das simulações de geração de energia elétrica fotovoltaica.

Quadro 37: Dados de inversores do fabricante Fronius

Variáveis	Zona ímpar a	Zona ímpar b	Zona par
Fabricante	Fronius	Fronius	Fronius
Modelo	Primo 8.2 – 1	Primo 3.5 – 1	Primo 3.0 – 1
Dados de entrada			
Tensão mínima (V)	80	80	80
Tensão máxima (V)	1000	1000	1000
Potência máxima (W)	12300	5250	4500
Dados de saída			
Faixa de tensão (V)	180 – 270	180 – 270	180 – 270
Potência nominal (W)	8200	3500	3000
Frequência (Hz)	50 – 60	50 – 60	50 – 60

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados de Fronius (2015) e Fronius (2019).

Uma variável importante para a correta simulação das perdas de energia na conversão de tensão elétrica realizada pelos inversores é o comportamento da eficiência do inversor em função da potência de saída. Os valores utilizados nas simulações são os apresentados no Quadro 38.

Quadro 38: Comportamento da eficiência dos inversores para teste padrão com tensão de entrada de 270 V

Eficiência	primo 8.2 – 1 (%)	primo 3.5 – 1(%)	primo 3.0 – 1(%)
10% de P_n	92,2	86,3	84,1
20% de P_n	94,9	91,6	90,3
30% de P_n	95,8	93,5	92,7
50% de P_n	96,3	95,0	94,5
75% de P_n	96,3	95,6	95,4
100% de P_n	96,2	95,8	95,7

Nota: P_n – potência nominal

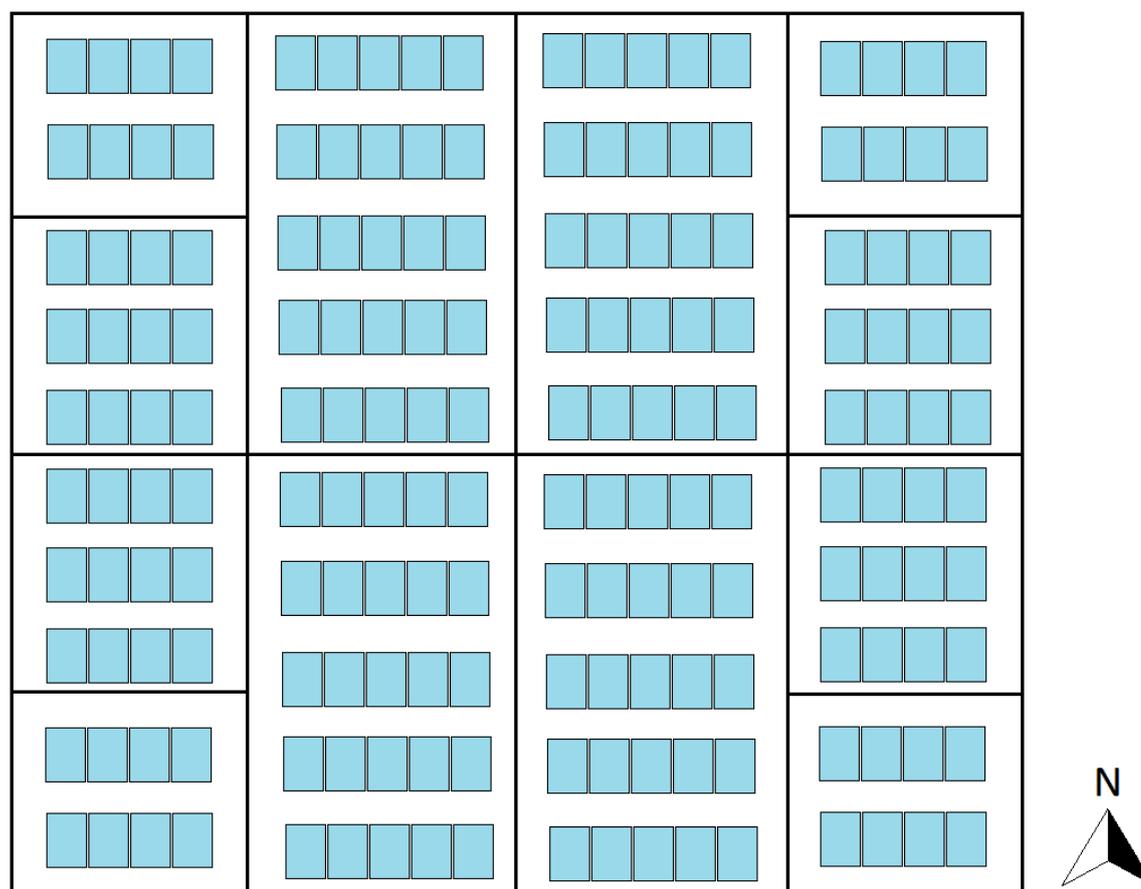
Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados de Fronius (2015) e Fronius (2019).

Nas seções seguintes (6.4.1 e 6.4.2) é apresentado os resultados das simulações da geração fotovoltaica após a aplicação das estratégias de projeto passivo e medidas de eficiência energética apresentada na seção 6.3.

6.4.1.1 Instalação de painéis fotovoltaicos modelo CS6-K 275P do fabricante Canadian Solar em 86% da área de telhado

Considerando que é possível instalar painéis fotovoltaicos em 86% da área total do telhado (instalação máxima permitida pelo modelo de base de edifício residencial definido no *EnergyPlus*, devido às características geométricas dos telhados de cada zona térmica do último andar), têm-se a configuração esquemática apresentada na Figura 35, a qual é composta por 180 painéis com as dimensões apresentadas no Quadro 35.

Figura 35: Instalação de painéis fotovoltaicos modelo CS6-K 275P do fabricante Canadian Solar nas áreas de telhado correspondentes a todas as zonas térmicas



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados das simulações da geração fotovoltaica (após a aplicação das estratégias de projeto passivo e medidas de eficiência energética (Quadro 34), considerando as propriedades do painel fotovoltaico modelo CS6-K 275P do fabricante Canadian Solar (Quadro 35), inversores da Fronius (Quadros 37 e 38), circuitos de placas conforme apresentado na Figura 35 e disposição dos circuitos nas áreas de cada zona térmica do telhado conforme apresentado na Figura 34) são apresentados no Quadro 39 para os casos de climatização das zonas pares (17,2% de área climatizada) e climatização das zonas pares e ímpares b (40,9% de área climatizada).

Quadro 39: Resultados da simulação da geração fotovoltaica após a aplicação das estratégias de projeto passivo e medidas de eficiência energética para o caso de instalação de painéis fotovoltaicos, modelo CS6-K 275P do fabricante Canadian Solar, em 86% da área do telhado

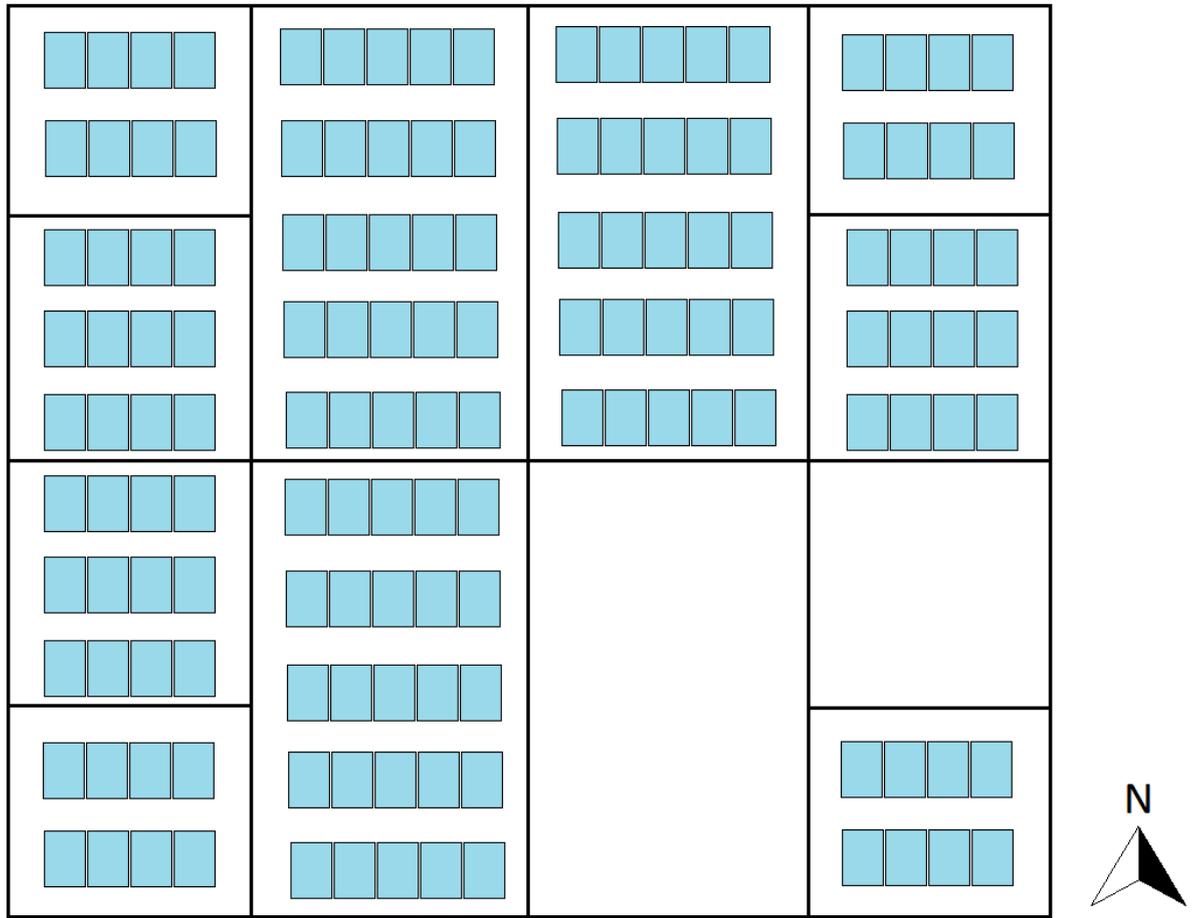
Área climatizada igual às zonas pares da Figura 25 (17,2% de área climatizada)	
Variável	Resultado (kWh/ano)
Consumo de serviços auxiliares dos inversores (consumo não útil) na conversão de corrente direta para corrente alternada (C_{inv})	11628,60
Geração fotovoltaica bruta	66229,70
Perdas de conversão de energia elétrica	3385,54
Geração fotovoltaica líquida (E_{gl})	62844,16
Parcela da energia elétrica gerada consumida no local (E_{gc})	30776,55
Parcela da energia elétrica gerada exportada para a rede (E_{gr})	32067,60
Área climatizada igual às zonas pares e ímpares b da Figura 25 (40,9% de área climatizada)	
Consumo de serviços auxiliares dos inversores (consumo não útil) na conversão de corrente direta para corrente alternada (C_{inv})	11628,60
Geração fotovoltaica bruta	66229,70
Perdas de conversão de energia elétrica	3385,54
Geração fotovoltaica líquida (E_{gl})	62844,16
Parcela da energia elétrica gerada consumida no local (E_{gc})	31645,18
Parcela da energia elétrica gerada exportada para a rede (E_{gr})	31198,98

Fonte: Elaborado pelo autor.

6.4.1.2 Instalação de painéis fotovoltaicos modelo CS6-K 275P do fabricante Canadian Solar em 70% da área de telhado

Considerando que somente 70% da área do telhado está disponível para a instalação de painéis fotovoltaicos (devido a espaços físicos destinados a outros tipos de serviços, tais como caixas d'água e casa de máquina de elevadores) tem-se, como uma das possibilidades, o arranjo esquemático apresentado na Figura 36, o qual é composto por 143 placas com as dimensões apresentadas no Quadro 35.

Figura 36: Instalação de painéis fotovoltaicos modelo CS6-K 275P do fabricante Canadian Solar em 70% da área do telhado



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados da simulação da geração fotovoltaica para a configuração de circuitos de painéis conforme apresentado na Figura 36 são apresentados no Quadro 40 para os casos de climatização das zonas pares (17,2% de área climatizada) e climatização das zonas pares e ímpares b (40,9% de área climatizada).

Quadro 40: Resultados da simulação da geração fotovoltaica após a aplicação das estratégias de projeto passivo e medidas de eficiência energética para o caso de instalação de painéis fotovoltaicos, modelo CS6-K 275P do fabricante Canadian Solar, em 70% da área do telhado

Área climatizada igual às zonas pares da Figura 25 (17,2% de área climatizada)	
Variável	Resultado (kWh/ano)
Consumo de serviços auxiliares dos inversores (consumo não útil) na conversão de corrente direta para corrente alternada (C_{inv})	9690,50
Geração fotovoltaica bruta	52983,75
Perdas de conversão de energia elétrica	2746,82
Geração fotovoltaica líquida (E_{gl})	50236,93
Parcela da energia elétrica gerada consumida no local (E_{gc})	28989,26
Parcela da energia elétrica gerada exportada para a rede (E_{gr})	21247,67
Área climatizada igual às zonas pares e ímpares b da Figura 25 (40,9% de área climatizada)	
Consumo de serviços auxiliares dos inversores (consumo não útil) na conversão de corrente direta para corrente alternada (C_{inv})	9690,50
Geração fotovoltaica bruta	52983,75
Perdas de conversão de energia elétrica	2746,82
Geração fotovoltaica líquida (E_{gl})	50236,93
Parcela da energia elétrica gerada consumida no local (E_{gc})	29481,02
Parcela da energia elétrica gerada exportada para a rede (E_{gr})	20775,91

Fonte: Elaborado pelo autor.

6.4.2 Simulação da produção de energia elétrica fotovoltaica local com o modelo SPR-E20327-COM do fabricante SunPower considerando a instalação de painéis fotovoltaicos em 86% da área do telhado

As propriedades necessárias para a definição no *Energypus* do modelo equivalente de um diodo para o módulo fotovoltaico SPR-E20327-COM do fabricante SunPower são apresentadas no Quadro 41.

Quadro 41: Propriedades do painel fotovoltaico SPR-E20327-COM do fabricante SunPower para a definição do modelo equivalente de um diodo

Dados elétricos	
Potência nominal máxima ($P_{m\acute{a}x}$)	327 W
Tensão no ponto de máxima potência (V_{mp})	54,7 V
Corrente elétrica no ponto de máxima potência (I_{mp})	5,98 A
Tensão de circuito aberto (V_{oc})	64,9 V
Corrente de curto circuito (I_{sc})	6,46 A
Eficiência do módulo	20,1%
Dados mecânicos	
Tipo de célula	Silício monocristalino
Configuração de células	96
Dimensões	1559 x 1046 x 46 mm
Massa	18,6 kg
Características de temperatura	
Coeficiente de temperatura (P_{max})	-0,38% / K
Coeficiente de temperatura (V_{oc})	-0,177 V / K
Coeficiente de temperatura (I_{sc})	0,05% / K

Nota: Os dados elétricos foram obtidos em teste padrão com irradiação de 1000 W/m^2 e 25°C de temperatura de operação

Fonte: SunPower (2016).

Considerando as semelhanças dimensionais entre o modelo de módulo fotovoltaico CS6-K 275P do fabricante Canadian Solar (Quadro 35) e o modelo SPR-E20327-COM do fabricante SunPower (Quadro 41), os quais possuem a mesma área superficial (igual a $1,63 \text{ m}^2/\text{módulo}$), pôde-se utilizar a mesma distribuição de painéis fotovoltaicos apresentada na Figura 34 para a região de telhado correspondente a cada uma das zonas térmicas dos apartamentos do último andar do modelo de base de edifício residencial e, também, os mesmos modelos de inversores, cujas propriedades são apresentadas nos Quadros 37 e 38, para cada um dos circuitos de painéis fotovoltaicos apresentados na Figura 34.

Os resultados da simulação da produção de energia elétrica fotovoltaica com o modelo de painel SPR-E20327-COM do fabricante SunPower em 86% da área de telhado (situação que corresponde ao máximo aproveitamento da área total do telhado permitido pelo modelo de base quando se consideram as limitações do modelo e efeitos de sombreamento entre painéis fotovoltaicos) são apresentados no Quadro 42.

Quadro 42: Resultados da simulação da geração fotovoltaica após a aplicação das estratégias de projeto passivo e medidas de eficiência energética para o caso de instalação de painéis fotovoltaicos, modelo SPR-E20327-COM do fabricante SunPower, em 86% da área do telhado

Área climatizada igual às zonas pares da Figura 25 (17,2% de área climatizada)	
Variável	Resultado (kWh/ano)
Consumo de serviços auxiliares dos inversores (consumo não útil) na conversão de corrente direta para corrente alternada (C_{inv})	11628,60
Geração fotovoltaica bruta	78738,50
Perdas de conversão de energia elétrica	4024,97
Geração fotovoltaica líquida (E_{gl})	74713,53
Parcela da energia elétrica gerada consumida no local (E_{gc})	30776,55
Parcela da energia elétrica gerada exportada para a rede (E_{gr})	43936,98
Área climatizada igual às zonas pares e ímpares b da Figura 25 (40,9% de área climatizada)	
Consumo de serviços auxiliares dos inversores (consumo não útil) na conversão de corrente direta para corrente alternada (C_{inv})	11628,60
Geração fotovoltaica bruta	78738,50
Perdas de conversão de energia elétrica	4024,97
Geração fotovoltaica líquida (E_{gl})	74713,53
Parcela da energia elétrica gerada consumida no local (E_{gc})	31645,18
Parcela da energia elétrica gerada exportada para a rede (E_{gr})	43068,35

Fonte: Elaborado pelo autor.

6.5 CLASSIFICAÇÃO DO EDIFÍCIO EM RELAÇÃO AO NÍVEL DE ATINGIMENTO DA ENERGIA LÍQUIDA ZERO LOCAL

Dois conceitos importantes para mensurar o impacto da aplicação das estratégias de projeto passivo, medidas de eficiência energética e estratégias de projeto ativo são a energia líquida local e a geração evitada de energia elétrica. A energia líquida local (E_{local}) do modelo de base de edifício residencial para a abordagem *net zero site energy* pode ser determinada por meio da aplicação da equação (2) (apresentada na seção 2.2.4). Para as finalidades deste

trabalho, a equação (2) foi adaptada de modo a considerar as nomenclaturas específicas, aqui empregadas, associadas aos consumos e geração de energia elétrica. A energia líquida local é calculada, neste trabalho, por meio da aplicação da equação (15).

$$E_{\text{local}} = E_{\text{gl}} - (C_{\text{ef}} + C_{\text{inv}}) \quad (15)$$

Em que:

C_{ef} : Consumo de eletricidade do modelo de base de edifício residencial após a aplicação das estratégias de projeto passivo e medidas de eficiência energética

C_{inv} : Consumo de eletricidade de serviços auxiliares dos inversores (consumo não útil)

E_{gl} : Geração líquida de energia elétrica do sistema fotovoltaico

Por meio do princípio de conservação da energia pode ser demonstrado que a geração evitada de energia elétrica (após a aplicação das estratégias de projeto passivo, medidas de eficiência energética e geração fotovoltaica) pode ser calculada por meio da equação (16).

$$G_{\text{ev}} = \frac{(C_{\text{ei}} - C_{\text{ef}}) + (E_{\text{gc}} - C_{\text{inv}})}{1 - i} + E_{\text{gr}} \quad (16)$$

Em que:

G_{ev} : Geração evitada de energia elétrica

C_{ei} : Consumo inicial de energia elétrica do modelo de base de edifício residencial, antes da aplicação das estratégias de projeto passivo e medidas de eficiência energética

C_{ef} : Consumo do modelo de base após a aplicação das estratégias de projeto passivo e medidas de eficiência energética

E_{gc} : Parcela da energia elétrica gerada pelo sistema fotovoltaico consumida no local

C_{inv} : Consumo de eletricidade de serviços auxiliares dos inversores (consumo não útil)

E_{gr} : Parcela da energia elétrica gerada pelo sistema fotovoltaico exportada para a rede elétrica

i : Taxa de perda de energia elétrica na transmissão da usina geradora até o consumidor final

Segundo EPE (2018c), em 2017 as perdas totais no Sistema Interligado Nacional (SIN) foram de 19,2%. Considerando os resultados apresentados nos Quadros 34, 39, 40 e 42 e aplicando-se as equações (15) e (16) se obtém os resultados apresentados nos Quadros 43, 44

e 45, nos quais está destacado em negrito os resultados obtidos a partir da aplicação das equações (15) e (16).

Quadro 43: Energia líquida local e geração de energia elétrica evitada para o caso de instalação de painéis fotovoltaicos, modelo CS6-K 275P do fabricante Canadian Solar, em 86% da área do telhado

Variável	Resultado (kWh/ano)	
	17,2% de área climatizada (Figura 25)	40,9% de área climatizada (Figura 25)
C_{ei}	168480,27	219333,58
C_{ef}	106527,68	112350,92
C_{inv}	11628,60	11628,60
E_{gl}	62844,16	62844,16
E_{gc}	30776,55	31645,18
E_{gr}	32067,61	31198,98
E_{local}	-55312,12	-61135,36
G_{ev}	132439,56	188376,26

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 44: Energia líquida local e geração de energia elétrica evitada para o caso de instalação de painéis fotovoltaicos, modelo CS6-K 275P do fabricante Canadian Solar, em 70% da área do telhado

Variável	Resultado (kWh/ano)	
	17,2% de área climatizada (Figura 25)	40,9% de área climatizada (Figura 25)
C_{ei}	168480,27	219333,58
C_{ef}	106527,68	112350,92
C_{inv}	9690,50	9690,50
E_{gl}	50236,93	50236,93
E_{gc}	28989,26	29481,02
E_{gr}	21247,67	20775,91
E_{local}	-65981,25	-71804,49
G_{ev}	123043,90	177673,41

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 45: Energia líquida local e geração de energia elétrica evitada para o caso de instalação de painéis fotovoltaicos, modelo SPR-E20327-COM do fabricante SunPower, em 86% da área do telhado

Variável	Resultado (kWh/ano)	
	17,2% de área climatizada (Figura 25)	40,9% de área climatizada (Figura 25)
C_{ei}	168480,27	219333,58
C_{ef}	106527,68	112350,92
C_{inv}	11628,60	11628,60
E_{gl}	74713,53	74713,53
E_{gc}	30776,55	31645,18
E_{gr}	43936,98	43068,353
E_{local}	-43442,70	-61135,36
G_{ev}	144308,9	200245,63

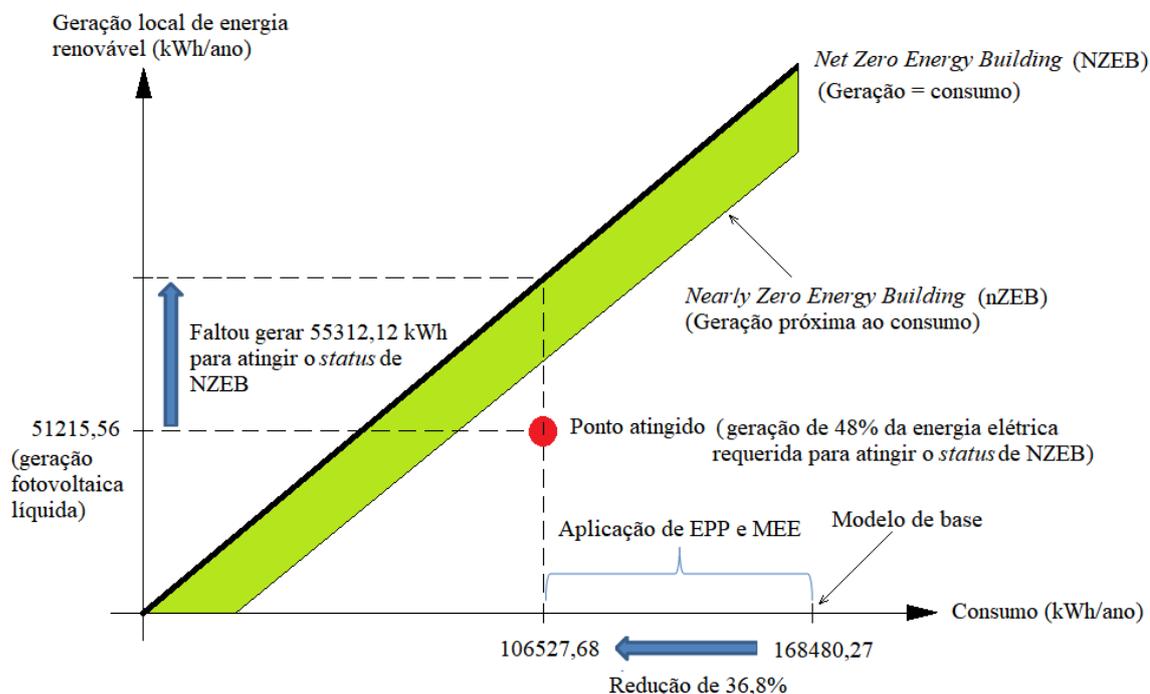
Fonte: Elaborado pelo autor.

Observando os resultados apresentados no Quadros 43, 44 e 45 pode-se concluir que a energia líquida local após a aplicação das estratégias de projeto passivo, medidas de eficiência energética e estratégias de projeto ativo para os casos de climatização de 17,2% e 40,9% da área total de piso apresentaram valores bastante distantes do valor nulo, desta forma, nenhum dos casos estudados atingiu o padrão de edifício de energia zero.

As Figuras 37, 38, 39 e 40³³ apresentam diagramas da geração de energia fotovoltaica versus o consumo de energia do edifício após a aplicação das estratégias de projeto passivo e medidas de eficiência energética apresentadas no Quadro 34 para a classificação em edifício de energia líquida zero (NZEB) e edifício de energia líquida quase zero (nZEB) para o caso de implantação de painéis fotovoltaicos modelos CS6-K 275P (do fabricante Canadian Solar) e SPR-E20327-COM (do fabricante SunPower) em 86% da área de telhado.

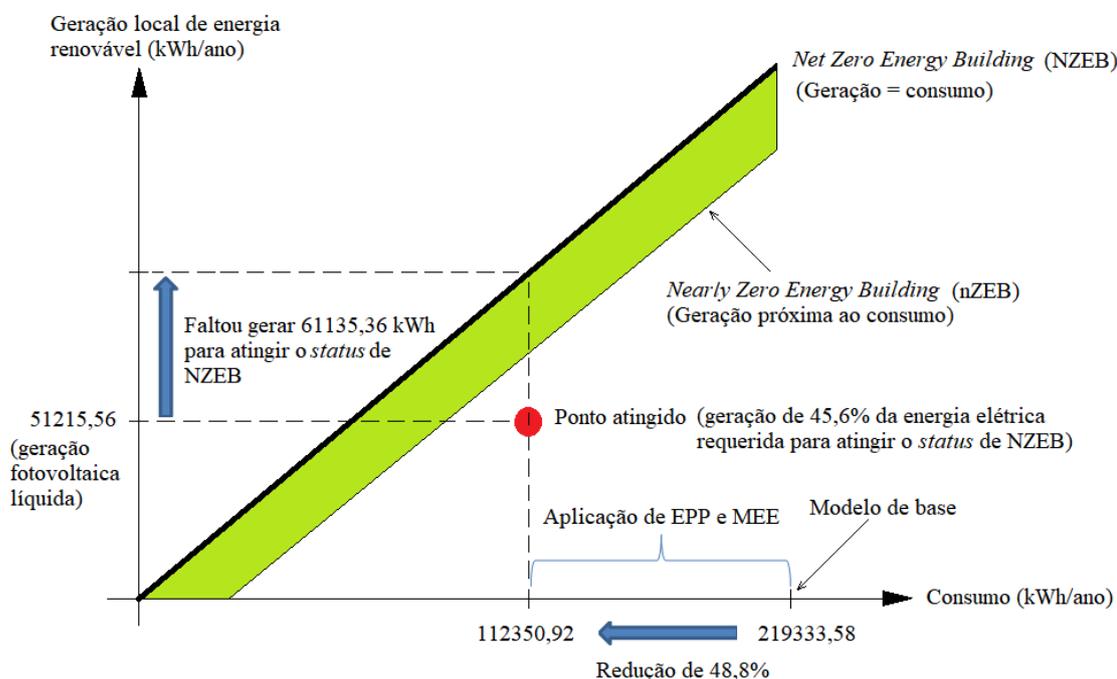
³³ Nas Figuras 37, 38, 39 e 40 a geração fotovoltaica líquida foi calculada descontando-se da geração fotovoltaica bruta as parcelas referentes às perdas de conversão de energia elétrica e os consumos de serviços auxiliares dos inversores (consumos não úteis) apresentados nos Quadros 39 e 42.

Figura 37: Diagrama de geração versus consumo de energia para o caso de climatização de 17,2% da área total de piso e instalação de painéis fotovoltaicos, modelo CS6-K 275P do fabricante Canadian Solar, em 86% da área de telhado



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 38: Diagrama de geração versus consumo de energia para o caso de climatização de 40,9% da área total de piso e instalação de painéis fotovoltaicos, modelo CS6-K 275P do fabricante Canadian Solar, em 86% da área de telhado



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 39: Diagrama de geração versus consumo de energia para o caso de climatização de 17,2% da área total de piso e instalação de painéis fotovoltaicos, modelo SPR-E20327-COM do fabricante SunPower, em 86% da área de telhado

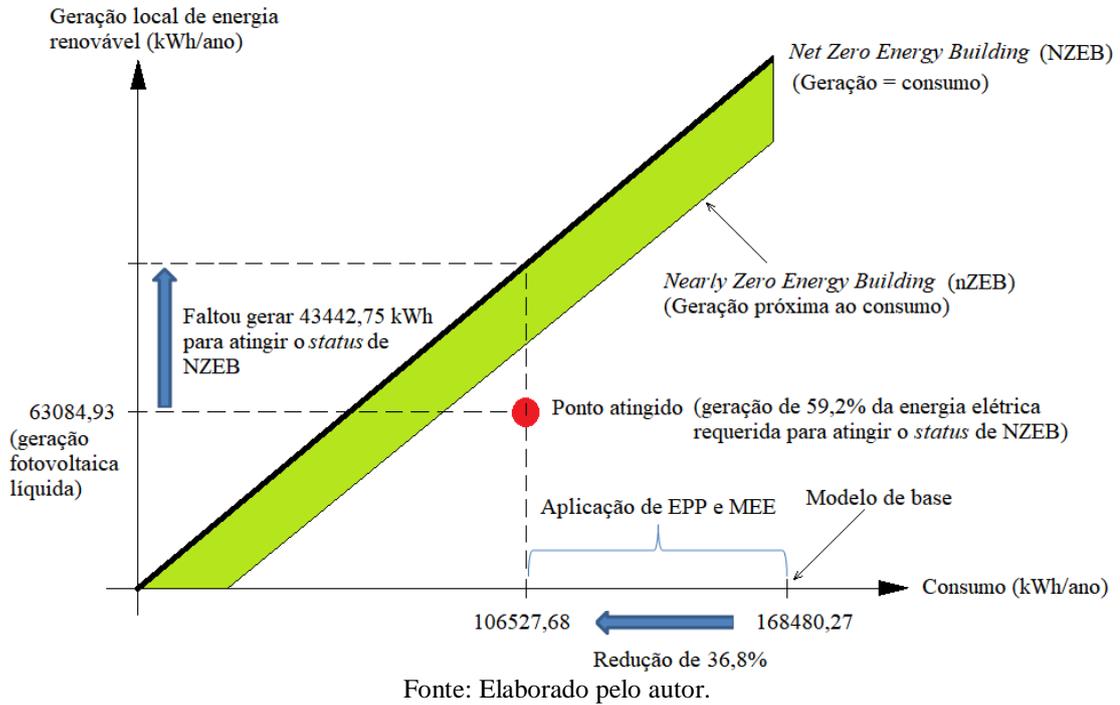
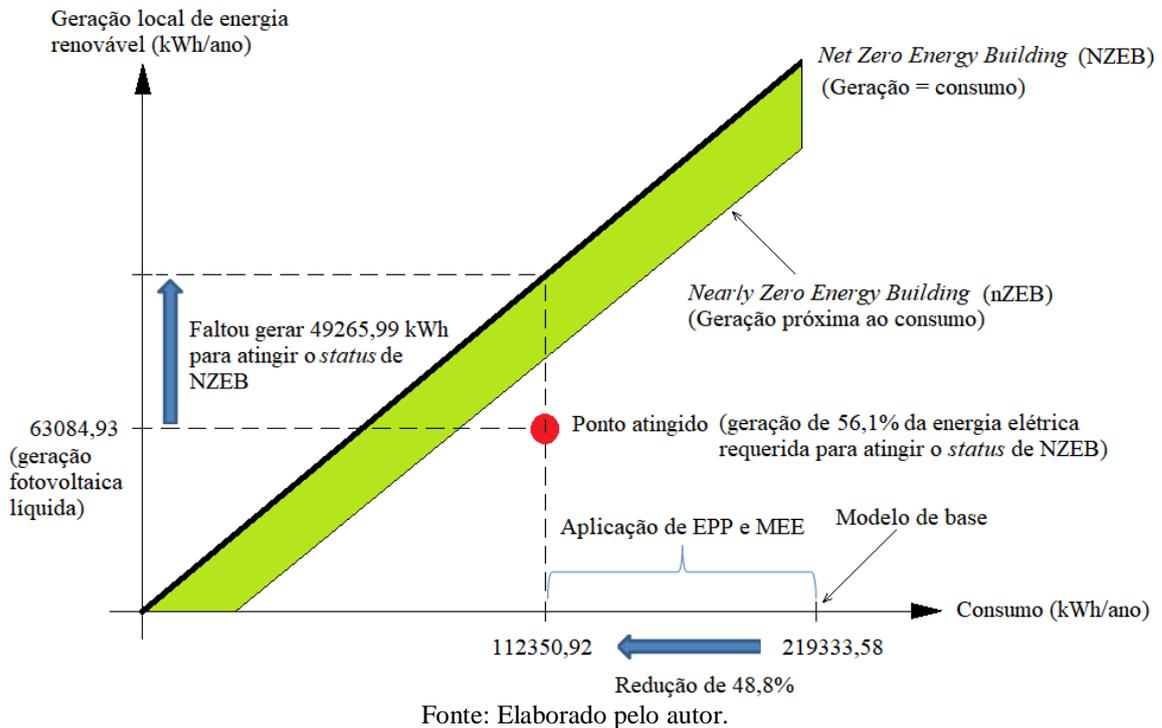


Figura 40: Diagrama de geração versus consumo de energia para o caso de climatização de 40,9% da área total de piso e instalação de painéis fotovoltaicos, modelo SPR-E20327-COM do fabricante SunPower, em 86% da área de telhado



A partir da análise das Figuras 37, 38, 39 e 40 pode-se concluir que mesmo utilizando praticamente toda a área disponível do telhado do edifício para a geração fotovoltaica não é possível gerar energia elétrica suficiente para atingir o *status* de edifício de energia líquida zero ou edifício de energia líquida quase zero. A energia elétrica gerada com os modelos de módulos fotovoltaicos CS6-K 275P do fabricante Canadian Solar e SPR-E20327-COM do fabricante SunPower, instalados em 86% da área de telhado, para os casos de climatização de 17,2 e 40,9% da área de piso, atende a aproximadamente metade do consumo de eletricidade do modelo de base de edifício residencial após aplicação das estratégias de projeto passivo e medidas de eficiência energética apresentadas no Quadro 34. O melhor resultado ocorreu para a aplicação do modelo SPR-E20327-COM do fabricante SunPower e área de climatização de 17,2% (um aparelho de ar condicionado por apartamento), para o qual a geração de eletricidade correspondeu a 59,2% do consumo de energia elétrica do edifício.

Extrapolações dos resultados por meio de simulações demonstraram que utilizando somente a área de telhado para a geração fotovoltaica a eficiência de módulos fotovoltaicos com dimensões semelhantes as dos modelos CS6-K 275P (do fabricante Canadian Solar) e SPR-E20327-COM (do fabricante SunPower) deveria estar na faixa de 30 a 35% para possibilitar o atingimento da energia líquida zero em base anual de operação para o modelo de base de edifício residencial estudado neste trabalho. Tal faixa de eficiência para painéis fotovoltaicos é conseguida em laboratório, porém ainda não está disponível para modelos comerciais (MIT, 2015) desta forma, pode-se concluir que com o aumento da eficiência dos painéis fotovoltaicos será mais viável atingir o status de edifício de energia líquida zero no futuro empregando-se somente a área de telhado para a geração fotovoltaica. No momento presente é necessário utilizar outras superfícies do edifício ou das vizinhanças deste para geração fotovoltaica visando atingir o balanço nulo em base anual de operação.

Assim, uma das possíveis conclusões é que para edifícios com mais de cinco a seis andares (o que corresponde à metade do consumo de energia elétrica do modelo de base deste trabalho, o qual possui doze andares) a área de telhado pode não ser suficiente para gerar o montante de energia elétrica requerido pelo edifício (após a aplicação de estratégias de projeto passivo e medidas de eficiência energética) para atingir o balanço nulo em base anual de operação. Para este caso, há a necessidade de instalação de painéis fotovoltaicos em outros elementos construtivos no interior do lote no qual se encontra o edifício como, por exemplo, em coberturas de estacionamentos; ou mesmo, há a necessidade de intercâmbio de energia elétrica renovável local com construções vizinhas ou parques de geração de energia renovável nas proximidades.

6.6 DETERMINAÇÃO DAS EMISSÕES EVITADAS DE DIÓXIDO DE CARBONO EQUIVALENTE

As emissões de dióxido de carbono equivalente da energia elétrica brasileira, ofertada no Sistema Interligado Nacional (SIN), dependem da participação de usinas termelétricas na geração total. Nos últimos anos tem crescido a participação de fontes renováveis na matriz de geração elétrica nacional, principalmente, devido à regularização do regime de chuvas e ao aumento da geração eólica. As emissões de dióxido de carbono equivalente da energia elétrica disponibilizada no SIN de período 2013 a 2017 são apresentadas na Tabela 15.

Tabela 15: Emissões de dióxido de carbono equivalente associadas à produção da energia elétrica disponibilizada no Sistema Interligado Nacional

Ano	Fator de emissão (gCO ₂ eq/kWh)
2013	109,0
2014	143,0
2015	142,2
2016	94,4
2017	87,8

Fonte: Adaptado de EPE (2018b) e EPE (2018c).

Considerando a tendência de crescimento da participação de fontes renováveis na geração da energia elétrica brasileira e adotando o valor de emissões de 2017 como referência pode-se estimar as emissões evitadas de dióxido de carbono equivalente do modelo de base de edifício residencial após a aplicação das estratégias de projeto passivo, medidas de eficiência energética e estratégias de projeto ativo (geração fotovoltaica) empregando-se a equação (17).

$$E_{ev} = f_e \cdot G_{ev} \quad (17)$$

Em que:

E_{ev} : Emissões evitadas de dióxido de carbono equivalente (CO₂eq)

f_e : Fator de emissão de CO₂eq na geração de energia elétrica (Tabela 15)

G_{ev} : Geração evitada de energia elétrica

Os resultados obtidos a partir da aplicação da equação (17), para os casos de climatização com um (17,2% de área climatizada) ou dois (40,9% de área climatizada) aparelhos de ar condicionado por apartamento, geração fotovoltaica em 70 e 86% da área de telhado e utilização dos módulos fotovoltaicos modelos CS6-K 275P e SPR-E20327-COM, respectivamente dos fabricantes Canadian Solar e SunPower, são apresentados no Quadro 46.

Quadro 46: Emissões evitadas de dióxido de carbono equivalente com a aplicação das estratégias de projeto passivo, medidas de eficiência energética e geração fotovoltaica

Climatização em relação à área total de piso	Área de instalação fotovoltaica em relação à área do telhado	Emissões evitadas (toneladas de CO ₂ eq/ano)	Redução de emissões em relação ao modelo de base
Modelo de módulo fotovoltaico: CS6-K 275P (do fabricante Canadian Solar)			
17,2%	86%	11,63	-63,5%
40,9%	86%	16,54	-69,4%
17,2%	70%	10,80	-59,0%
40,9%	70%	15,60	-65,5%
Modelo de módulo fotovoltaico: SPR-E20327-COM (do fabricante SunPower)			
17,2%	86%	12,67	-69,2%
40,9%	86%	17,58	-73,8%

Fonte: Elaborado pelo autor.

O Quadro 46 demonstra que o potencial de redução das emissões de dióxido de carbono equivalente para a aplicação de conceitos de NZEB em edifícios residenciais de cidades localizadas na região sudeste do Brasil está na faixa, aproximada, de 11 a 18 toneladas de CO₂eq/ano por edifício. O que representa de 60 a 74% de redução quando comparado com as emissões de gases de efeito estufa do modelo de base de edifício residencial, antes da aplicação das estratégias de projeto passivo, medidas de eficiência energética e estratégias de projeto ativo (geração fotovoltaica para o caso deste trabalho), para cada um dos casos apresentados no Quadro 46. Essa faixa de redução potencial de emissões de gases de efeito estufa é bastante significativa e pode possibilitar que as edificações atinjam as metas de redução de emissões de gases de efeito estufa determinadas pelo IPCC (2014), a qual é de 80% até o ano de 2050, necessárias para limitar o aquecimento global em, no máximo, 2 °C até o ano de 2100.

7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foi realizado um estudo do impacto da aplicação de estratégias de projeto passivo, medidas de eficiência energética e estratégias de projeto ativo (geração fotovoltaica, no caso deste trabalho) em um modelo de edifício residencial padrão que pode ser encontrado em cidades do Vale do Paraíba (SP). As simulações energéticas foram realizadas empregando-se o *software EnergyPlus* e utilizando, como referência, um arquivo de dados climáticos da cidade de Taubaté (cidade pertencente ao Vale do Paraíba, região sudeste do Brasil).

O modelo de base de edifício residencial foi construído considerando 12 andares, família de quatro integrantes e características construtivas comumente encontradas em edificações brasileiras (conforme considerações da seção 2.1.1 e Capítulo 5). Foi simulado o consumo de energia elétrica para o caso de climatização das suítes do modelo de base (17,2% da área total de piso) e para o caso de climatização da suíte em associação com um segundo ambiente (40,9% da área total de piso), o qual pode ser um quarto ou a sala de estar. Os resultados, após a calibração do modelo de base, indicaram um consumo mensal médio de energia elétrica dos apartamentos de 292,5 e 380,8 kWh/mês, respectivamente para os casos de climatização de 17,2 e 40,9% da área total de piso.

As simulações de estratégias de projeto passivo em associação com medidas de eficiência energética demonstraram serem possíveis reduções de 36,8% a 48,8% no consumo de energia elétrica para os casos de climatização de 17,2% e 40,9% da área total de piso, respectivamente.

Os resultados, também, demonstraram que é possível reduzir o consumo de energia elétrica com climatização de ambientes para valores muito pequenos com a aplicação de combinações de estratégias de projeto passivo associadas à utilização de um equipamento de ar condicionado de ciclo reverso, rotação variável (compressor com a tecnologia *inverter*) e alto coeficiente de desempenho. Os resultados apresentados na seção 6.3 demonstram que é possível reduzir o consumo de energia elétrica com climatização de ambientes em torno de 90% seguindo essas estratégias.

Os resultados apresentados no Capítulo 6 demonstram que as estratégias de projeto passivo que conduziram às maiores reduções do consumo de energia elétrica do modelo de base de edifício residencial foram a substituição dos vidros das janelas por modelos com melhores propriedades térmicas, a pintura das paredes da envoltória com tinta de baixa absorvância no espectro solar e a utilização de ventilação natural.

Para o caso da substituição dos envidraçados, os resultados demonstram que a utilização de modelos com baixo fator solar (0,2 a 0,3) e transmitância térmica moderada (U variando entre 3 a 4 $W/m^2.K$) conduzem às maiores reduções do consumo de energia elétrica. As simulações indicam reduções de 8,4% a 13,1% no consumo de energia elétrica para a substituição dos vidros das janelas para os casos de climatização de 17,2% e 40,9% da área total de piso, respectivamente.

Para o caso da pintura das paredes da envoltória, as simulações indicam que é possível reduzir o consumo de energia elétrica entre 10,1% e 13,1%, enquanto que a utilização da ventilação natural levou a reduções de 10,2% e 7,7% no consumo de energia elétrica, respectivamente, para os casos de climatização de 17,2% e 40,9% da área total de piso.

Os resultados, também, demonstraram que a redução do consumo de energia com climatização por meio da aplicação de camadas de isolamento térmico nas paredes da envoltória apresenta um comportamento variável em função da espessura da camada de isolante térmico e em função da taxa de climatização do edifício. A aplicação de camadas de isolamento térmico apresentou máximos de redução no consumo de energia elétrica quando as espessuras das camadas são de 1 e 2 cm, respectivamente, para os casos de climatização de 17,2% e 40,9% da área total de piso. Para o caso de climatização das suítes (17,2%) os resultados indicaram que camadas de EPS acima de 4 cm de espessura conduzem ao aumento do consumo de energia elétrica em base anual de operação, desta forma, para climas quentes o super isolamento térmico de elementos da envoltória pode conduzir ao aumento do consumo de energia elétrica.

Considerando as medidas de eficiência energética, os resultados apresentados no Capítulo 6 demonstram que a substituição da iluminação fluorescente por iluminação LED e a substituição de equipamentos de ar condicionado por modelos novos de menor capacidade de refrigeração (9000 BTU/h), compressor com tecnologia *inverter* e alto coeficiente de desempenho (acima de 4,5) conduzem às maiores reduções no consumo de energia elétrica. A substituição de iluminação fluorescente por iluminação LED conduziu a reduções de 7,1% e 5,7%, enquanto que a substituição do equipamento de ar condicionado apresentou reduções de 17,5% e 28,6% no consumo anual de energia elétrica, respectivamente, para os casos de climatização de 17,2% e 40,9% da área total de piso.

Para o caso da aplicação de estratégias de projeto ativo, a simulação da geração fotovoltaica no telhado do edifício demonstrou que é possível gerar uma quantidade de energia elétrica líquida (descontada as perdas de conversão e consumo dos inversores) em base anual que corresponde a 59,2% e 56,1% do consumo do modelo de base de edifício

residencial, após a aplicação das estratégias de projeto passivo e medidas de eficiência energética, para os casos de climatização de 17,2% e 40,9% da área total de piso, respectivamente, quando se considera a possibilidade de instalação de painéis fotovoltaicos modelo SPR-E20327-COM (o qual é o modelo mais eficiente dentre os 226 modelos certificados com selo PROCEL em fevereiro de 2020) do fabricante SunPower em 86% da área de telhado. Tal resultado demonstra que atualmente é bastante difícil atingir o *status* de edifício de energia líquida zero para edificações com mais de cinco a seis andares utilizando somente a área de telhado para geração da energia elétrica. Extrapolações dos resultados das simulações demonstram que será possível atingir a energia líquida zero em base anual de operação para edifícios com até 12 andares utilizando somente a área de telhado para geração fotovoltaica quando a eficiência dos modelos comerciais de painéis fotovoltaicos atingir valores na faixa de 30% a 35%.

Os resultados apresentados na seção 6.5 demonstram que através da aplicação de estratégias de projeto passivo, medidas de eficiência energética e geração fotovoltaica em 86% da área de telhado é possível evitar a geração de energia elétrica na faixa de 123 a 200 MWh por edifício em base anual de operação. A geração evitada de energia elétrica conduz a uma faixa de redução de emissões de dióxido de carbono equivalente entre 10,8 e 17,6 toneladas por ano por edifício, quando se considera a possibilidade de operação de um ou dois aparelhos de ar condicionado por apartamento e a geração de energia elétrica fotovoltaica empregando-se os modelos de painéis CS6-K 275P (do fabricante Canadian Solar) e SPR-E20327-COM (do fabricante SunPower). Este intervalo de redução de emissão corresponde a uma faixa de 59,0% a 73,8% de redução em relação às emissões do modelo de base de edifício residencial convencional.

Considerando a atual relevância dos edifícios de energia zero para o atingimento da sustentabilidade do setor de energia em nível mundial e as limitações relacionadas ao escopo do presente trabalho, limitações do modelo de base de edifício residencial e limitações relacionadas à declaração de variáveis e procedimentos de simulação com o *Energyplus*; o autor propõe para a realização de trabalhos futuros as seguintes linhas de pesquisa:

- Construção e simulação de modelos de base de edifícios residenciais que considerem uma análise completa de custos e emissões de gases de efeito estufa ao longo do ciclo de vida dos materiais construtivos (avaliação do ciclo de vida), bem como das estratégias de projeto passivo, medidas de eficiência energética e estratégias de projeto ativo que podem ser empregadas para o atingimento da energia líquida zero em base anual de operação, considerando as características de fabricação, transporte, fase de

construção, fase de operação e fase de disposição final dos materiais construtivos considerando o contexto das diversas regiões econômicas brasileiras;

- Construção e simulação de modelos de base de edifícios residenciais considerando a variabilidade bioclimática brasileira (atualmente o Brasil é dividido em oito regiões bioclimáticas), conforme o zoneamento bioclimático brasileiro apresentado na norma NBR 15220 (ABNT, 2003), visando o atingimento do padrão de edifício de energia zero e destacando as principais peculiaridades, em termos de adoção de estratégias de projeto passivo, medidas de eficiência energética e estratégias de projeto ativo, existentes para o atingimento da energia líquida zero para cada região bioclimática;
- Construção e simulação de modelos de base de edifícios residenciais que incluam a possibilidade de geração de energia elétrica fotovoltaica, energia eólica (dependendo da intensidade dos ventos para o clima local) e outras fontes de energia renovável disponíveis no local, empregando outras superfícies do edifício além do telhado como, por exemplo, superfícies de elementos de sombreamento de aberturas, paredes voltadas para a fachada norte, coberturas de passagem de pedestres, coberturas de estacionamentos, dentre outros elementos do interior do lote do edifício e, também, elementos urbanos nas vizinhanças do edifício, além de, outros edifícios vizinhos que possibilitem o atingimento da energia líquida nula em base anual de operação por meio do intercâmbio de energia renovável entre construções vizinhas (abordagem relacionada ao conceito de comunidades e bairros/distritos de energia líquida zero – *Net Zero Energy Communities and Neighborhoods*)³⁴.

³⁴ (1) NREL. **Definition of a “Zero Net Energy” Community**: Technical Report (task No.FE09. 3410). Golden: National Renewable Energy Laboratory, 2009. 20 p. disponível em: <https://www.nrel.gov/docs/fy10osti/46065.pdf>. Acesso em: 01 mar. 2020; (2) KARUNATHILAKE, H. *et al.* Renewable energy selection for net-zero energy communities: life cycle based decision making under uncertainty. **Renewable Energy**, Amsterdam, v. 130, p. 558-573, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.06.086>. Acesso em: 01 mar. 2020; (3) VERMETTE, C. H. *et al.* Towards achieving net-zero energy communities: investigation of design strategies and seasonal solar collection and storage net-zero. **Solar Energy**, Amsterdam, v. 192, p. 169-185, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.07.024>. Acesso em: 01 mar. 2020.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE PESQUISA (ABEP). **Critério de classificação econômica Brasil**. São Paulo: ABEP, 2019. 6 p. Disponível em: http://www.abep.org/criterioBr/01_cceb_2019.pdf. Acesso em: 25 ago. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12721**: avaliação de custos de construção para incorporação imobiliária e outras disposições para condomínios edilícios. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220**: desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: projeto de estrutura de concreto: procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO/CIE 8995-1**: iluminação de ambientes de trabalho. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

AFONSO, A. R. P. **Pontes térmicas**: perdas térmicas lineares, valores por defeito. 2012. 295 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2012.

AKSAMIJA, A. Regenerative design and adaptive reuse of existing commercial buildings for net-zero energy use. **Sustainable Cities and Society**, Amsterdam, v.27, p.185-195, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.06.026>. Acesso em: 23 abr. 2018.

ANDERSON, J. **Modelling and performance evaluation of net zero energy buildings**. 2016. 169 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Wollongong, Wollongong, 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **BIG**. Brasília: ANEEL, 2017. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br>. Acesso em: 17 set. 2017.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE CERÂMICA PARA REVESTIMENTOS, LOUÇAS SANITÁRIAS E CONGENERES (ANFACER). **Manual setorial de desempenho**. São Paulo: ANFACER, 2016. 81 p. Disponível em: <https://www.anfacer.org.br/manual-de-desempenho>. Acesso em: 05 jun. 2018.

ALAJMI, A. *et al.* Achieving annual and monthly net-zero energy of existing building in hot climate. **Applied Energy**, London, v.165, p.511-521, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.11.073>. Acesso em: 11 jan. 2018.

AUGUSTO, C. *et al.* Building insulation materials: Beyond operational energy. **Habitat Sustainable**, Amsterdam, v.6, p.30 -39, 2016. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1822/44588>. Acesso em: 03 abr. 2018.

BARBOLINI, F. *et al.* A design strategy to reach nZEB standards integrating energy efficiency measures and passive energy use. **Energy Procedia**, Amsterdam, v.111, p.205-214, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.022>. Acesso em: 11 fev. 2018.

BEL, C. V. **Insulation materials, cellulose fiber and expanded polystyrene insulations: study of insulation materials, properties and behaviors.** 2017. 35 f. Estudo técnico (Ciências Térmicas) – Universidade de tecnologia de Brno, Brno, 2017.

BERGHER, R. TOP 10: as smart TVs mais vendidas em junho de 2019. **Zoom**, [S.l.], 24 jul. 2019. Disponível em: <https://www.zoom.com.br>. Acesso em: 28 ago. 2019.

BISWAS, K. *et al.* Insulation materials for commercial buildings in North America: an assessment of lifetime energy and environmental impacts. **Energy and Buildings**, Amsterdam, v.112, p.256 - 269, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.12.013>. Acesso em: 16 dez. 2017.

BORLIN, G. **Challenges of nearly zero energy in urban áreas: from performance to cost-case study.** 2013. 119 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2013.

BUILDINGS PERFORMANCE INSTITUTE EUROPE (BPIE). **Nearly zero energy buildings definitions across Europe.** Brussels: BPIE, 2015. 8 p. Disponível em: http://bpie.eu/uploads/lib/document/attachment/128/BPIE_factsheet_nZEB_definitions_across_Europe.pdf. Acesso em: 02 mar. 2019.

BRASIL. Lei nº 11.498, de 28 de junho de 2007. **Diário Oficial da União**, Brasília, dez. 2007. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2007/Lei/L11498.htm. Acesso em: 26 ago. 2019.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Programa Brasileiro de eliminação dos HCFCs-PBH: treinamento e capacitação para boas práticas em sistemas de ar condicionado do tipo Split.** Brasília: MMA, 2015. 192 p.

BRASIL. Decreto nº 9.661, de 1º de janeiro de 2019. **Diário Oficial da União**, Brasília, jan. 2019. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato20192022/2019/Decreto/D9661.htm. Acesso em: 26 ago. 2019.

BRASIL. Decreto nº 9.255, de 29 de dezembro de 2017. **Diário Oficial da União**, Brasília, dez. 2017. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato20152018/2017/Decreto/D9255.htm. Acesso em: 25 ago. 2019.

CANADIAN SOLAR. **CS6K-260|265|270|275.** São Paulo: Canadian Solar, 2017. 2 p. Disponível em: <http://www.nhssolar.com.br/wp-content/uploads/2017/08/Catalogo-Modulo-Fotovoltaico-NHS-Solar-Canadian.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2019.

CARRIERDOBRASIL. **Dimensionador.** Disponível em: <https://carrierdobrasil.com.br/dimensionador/>. Acesso em: 03 jun. 2019.

CEBRACE. **Cool lite**: proteção solar e liberdade de escolha. 3. ed. Jacarei: Cebrace, 2015. 6 p. Disponível em: <https://docplayer.com.br/12048608-Cool-lite-protecao-solar-e-liberdade-de-escolha.html>. Acesso em: 12 jun. 2019.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS S.A. **Guia do melhor consumo**: dicas de economia de energia e segurança com a rede elétrica. Belo Horizonte: CEMIG, 2014. 44 p. Disponível em: <http://www.cemig.com.br/pt-br/Paginas/default.aspx>. Acesso em: 23 set. 2018.

CONSUL. **Simulador**. Disponível em: <https://www.consul.com.br/simulador/>. Acesso em: 03 jun. 2019.

CHEN, C. J. **Physics of solar energy**. Hoboken: John Wiley & Sons Ltd, 2011. 352 p.

CUNHA, F. A. O. **Estudo de estratégias e tecnologias de climatização para atingir edifícios nZEB**. 2015. 169 f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2015.

DAIKIN. **Inverter technology**: true innovation in climate control. Dubai: Daikin, 2018. Disponível em: <http://docplayer.net/132371632-Inverter-technology-true-innovation-in-climate-control.html>. Acesso em: 20 set. 2019.

DINÇER, I.; KANOGLU, M. **Refrigeration systems and applications**. 2. ed. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2010. 464p.

DORNELLES, K. A. **Absortância solar de superfícies opacas**: métodos de determinação e base de dados para tintas látex acrílica e PVA. 2008. 152 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

DUARTE, R. A. F. **Reabilitação de edifícios com novas tendências NZEB**: caso de estudo, edifício de serviços em Setúbal. 2014. 126 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2014.

DUIJVE, M. **Comparative assessment of insulating materials on technical, environmental and health aspects for application in building renovation to the passive house level**. 2012. 139 f. Dissertação (Mestrado em Ciência de Energia) – Universidade de Utrecht, Utrecht, 2012.

EUROPEAN CELLULOSE INSULATION ASSOCIATION (ECIA). **Environmental Product Declaration**: in accordance with EN 15804 and ISO 14025. Bruxelas: ECIA, 2018. 19 p. Disponível em: <http://www.ecia.eu.com/>. Acesso em: 14 abr. 2018.

EICKER, U. **Solar Technologies for buildings**. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2003. 323 p.

ELAIAB, F. M. **Thermal comfort investigation of multi-storey residential buildings in mediterranean climate with reference to Darnah, Libya**. 2014. 250 p. Tese (Doutorado em Arquitetura) – Universidade de Nottingham, Nottingham, 2014.

ELETROBRAS. **Manual de iluminação**. Rio de Janeiro: Eletrobras, 2011. 54 p. Disponível em: <https://docplayer.com.br/15219631-Manual-de-iluminacao.html>. Acesso em: 18 nov. 2018.

ELETROBRAS. **Dicas de economia de energia por setor de consumo**. Rio de Janeiro: Eletrobras, 2016. 96 p. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br>. Acesso em: 21 jan. 2019.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Eficiência energética e geração distribuída**. Rio de Janeiro: EPE, 2016. 92 p. Disponível em: <https://www.epe.gov.br>. Acesso em: 14 abr. 2019.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanco energético nacional 2017**. Rio de Janeiro: EPE, 2017. 296 p. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/>. Acesso em: 05 fev. 2018.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanco energético nacional 2019: relatório síntese**. Rio de Janeiro: EPE, 2019. 67 p. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/>. Acesso em: 01 fev. 2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE-a). **Uso de ar condicionado no setor residencial brasileiro: perspectivas e contribuições para o avanço em eficiência energética**. Rio de Janeiro: EPE, 2018. 296 p. Disponível em: <https://epe.gov.br/>. Acesso em: 08 jun. 2019.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE-b). **Balanco energético nacional 2018**. Rio de Janeiro: EPE, 2018. 296 p. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/>. Acesso em: 05 fev. 2018.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE-c). **Anuário estatístico de energia elétrica 2018**. Rio de Janeiro: EPE, 2018. 249 p. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/>. Acesso em: 05 fev. 2018.

EUROPEAN INSULATION MANUFACTURERS ASSOCIATION (EURIMA). **Mineral wool: building a sustainable future**. Bruxelas: EURIMA, 2013. 32 p. Disponível em: www.eurima.org. Acesso em: 20 mar. 2018.

FASSA BORTOLLO. **Argamassa de colagem e regularizadora: ficha técnica - A 96**. 12ª. ed. São Mamede, 2018. 2 p. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/vendasmat/argamassa-de-colagem-a-64-fassabortolo>. Acesso em: 20 jan. 2019.

FRIGELAR. **Ar condicionado: convencional x inverter**. Porto Alegre, 2019. Disponível em: <https://www.frigelar.com.br/convencional-x-inverter>. Acesso em: 18 jul. 2019.

FRIGELAR. **Calculadora**. Disponível em: <https://www.frigelar.com.br/calculadora>. Acesso em: 03 jun. 2019.

FRONIUS. **Fronius primo: catálogo de produtos**. Diadema: Fronius, 2015. 4 p. Disponível em: <https://download.aldo.com.br/pdfprodutos/Produto30438IdArquivo4545.pdf>. Acesso em: 28 set. 2019.

FRONIUS. **Fronius primo**: o inversor comunicativo para gestão otimizada de energia. Diadema, 2019. Disponível em: <https://www.fronius.com/pt-br/brasil>. Acesso em: 28 set. 2019.

FUJITSU. **Split catalogue 2019**. Tóquio: FUJITSU, 2019. 308 p. Disponível em: <https://www.fujitsu-general.com/eu/support/downloads/split/index.html>. Acesso em: 14 set. 2019.

GEORGIOU, G. **Assessing energy and thermal comfort of domestic buildings in the Mediterranean region**. 2015. 377 p. Tese (Doctor of Philosophy of Loughborough University) – Universidade de Loughborough, Loughborough, 2015.

GOLDEN. **Produtos para iluminação 2018**. [S.l.], 2018. Disponível em: <http://www.lampadaskgolden.com.br>. Acesso em: 20 mar. 2019.

GUERREIRO, C. D. C. **Análise do consumo de energia no edifício da biblioteca de Rio Maior: Simulação, desempenho energético e medidas de melhoria**. 2016. 110 f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente) – Universidade de Lisboa, Lisboa, 2016.

HENDERSON, R. M. *et al.* **Climate Change in 2017: implications for Business**. Boston: Harvard Business School, 2017. 39 p. Disponível em: https://www.hbs.edu/environment/Documents/Climate_Change_2017.pdf. Acesso em: 25 abr. 2019.

HULD, T. *et al.* Assembling typical meteorological year data sets for building energy performance using reanalysis and satellite-based data. **Atmosphere**, Basel, v.9, p.53 -74, 2018. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4433/9/2/53/pdf>. Acesso em: 02 fev. 2019.

IAR.UNICAMP. **Illuminância e cálculo luminotécnico**. Campinas: UNICAMP, 2010. Disponível em: <https://hosting.iar.unicamp.br/lab/luz/ld/Arquitetural/tabelas/luminotecnica.pdf>. Acesso em: 23 jan. 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Projeção da população 2018**: número de habitantes do país deve parar de crescer em 2047. Rio de Janeiro: Agência IBGE notícias, 2018. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/pt/agencia-home.html>. Acesso em: 26 dez. 2018.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Energy and climate change: world energy outlook special report**. Paris: IEA, 2015, 200 p. Disponível em: <https://webstore.iea.org/weo-2015-special-report-energy-and-climate-change>. Acesso em: 16 mar. 2018.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA-a). **World Energy Outlook 2016**. Paris: Internacional Energy Agency, 2016. 684 p. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2016>. Acesso em: 18 mar. 2018.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Transition to sustainable Buildings, strategies and opportunities to 2050: executive summary**. Paris: IEA, 2013. 12 p. Disponível em: https://www.oecd-ilibrary.org/energy/transition-to-sustainable-buildings_9789264202955-en. Acesso em: 20 out. 2017.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Normais climatológicas do Brasil**. Brasília: INMET, 2019. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/>. Acesso em: 10 jan. 2019.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL (INMETRO). Portaria nº 16, de 05 de janeiro de 2011. Regulamento Técnico Metrológico para comercialização de componentes cerâmicos para alvenaria. Rio de Janeiro, 2011.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL (INMETRO). Portaria nº 18, de 16 de janeiro de 2012. Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais. Rio de Janeiro, 2012.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL (INMETRO). **Programa brasileiro de etiquetagem**: eficiência energética de condicionadores de ar split hi-wall com rotação fixa. Rio de Janeiro: INMETRO, 2014. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/consumidor/tabelas.asp>. Acesso em: 16 mar. 2019.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL (INMETRO-a). **Programa brasileiro de etiquetagem**: tabela de consumo de energia elétrica de chuveiros elétricos. Rio de Janeiro: INMETRO, 2016. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/consumidor/tabelas.asp>. Acesso em: 16 mar. 2019.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL (INMETRO-b). **Programa brasileiro de etiquetagem**: eficiência energética de congeladores verticais. Rio de Janeiro: INMETRO, 2016. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/consumidor/tabelas.asp>. Acesso em: 24 abr. 2019.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL (INMETRO-c). **Programa brasileiro de etiquetagem**: tabela de consumo de energia elétrica de fornos micro-ondas. Rio de Janeiro: INMETRO, 2016. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/consumidor/tabelas.asp>. Acesso em: 17 mar. 2019.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL (INMETRO). **Programa brasileiro de etiquetagem**: eficiência energética do modo de espera de televisores cinescópico. Rio de Janeiro: INMETRO, 2017. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/consumidor/tabelas.asp>. Acesso em: 21 mar. 2019.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL (INMETRO). **Programa brasileiro de etiquetagem**: eficiência energética de condicionadores de ar *split hi-wall*. Rio de Janeiro: INMETRO, 2018. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/consumidor/tabelas.asp>. Acesso em: 09 abr. 2019.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL (INMETRO). **Programa brasileiro de etiquetagem**: eficiência energética de lavadoras de roupa automáticas com abertura superior. Rio de Janeiro: INMETRO, 2019. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/consumidor/tabelas.asp>. Acesso em: 04 abr. 2019.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2014: synthesis report**, contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [core writing team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. Geneva: IPCC, 2014. 151 p. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf. Acesso em: 22 jun. 2019.

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA (IFSC). **Fator de utilização de conjuntos luminárias e lâmpadas - PHILIPS**. Joinville: IFSC, 2009. Disponível em: [http://joinville.ifsc.edu.br/~anabarbara/Projetos_Eletricos/Catalagos/Fatores_de_Utilizacao_PHILIPS_\(parte_I\).pdf](http://joinville.ifsc.edu.br/~anabarbara/Projetos_Eletricos/Catalagos/Fatores_de_Utilizacao_PHILIPS_(parte_I).pdf). Acesso em: 23 jan. 2019.

ISLAM, K.I. *et al.* Correlation between atmospheric temperature and soil temperature: a case study for Dhaka, Bangladesh. **Scientific Research Publishing**, Wuhan, v.5, p.200-208, 2015. Disponível em: <https://www.scirp.org/journal/paperinformation.aspx?paperid=56942>.. Acesso em: 03 jun. 2018.

JORGE, A. F. M. **Convergência para NZEB de um edifício classificado**. 2013. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2013.

KOMEKO. **Simulador de ar condicionado**. Disponível em: <http://www.komeco.com.br/simulador-de-ar-condicionado.html>. Acesso em: 03 jun. 2019.

LAMBERTS, R.; XAVIER, A. A. P. **Conforto térmico e stress térmico**. 2002. 111 f. Relatório Técnico (Ciências Térmicas) – Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

LG. **Ar-condicionado/simulador**. Disponível em: <https://www.lg.com/br/ar-condicionado/simulador>. Acesso em: 03 jun. 2019.

MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY (MIT). **The future of solar energy**. Massachusetts: MIT, 2015. 332 p. Disponível em: <http://energy.mit.edu/research/future-solar-energy/>. Acesso em: 14 fev. 2020.

MENDONÇA, A. M. **Caracterização do estoque de edificações históricas de uso institucional ou público localizadas em Florianópolis com relação ao consumo de eletricidade**. 2014. 277 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

METEOBLUE. **Clima Taubaté**. Disponível em: https://www.meteoblue.com/pt/tempo/historyclimate/climatemodelled/taubat%C3%A9_brasil_3446682. Acesso em 10 abr. 2019.

MEULAR.PROPERATI. **Face norte, por que é importante**. Disponível em: <http://meular.properati.com.br/face-norte-por-que-importante>. Acesso em 23 jun. 2018.

MONTEIRO, C. Os chuveiros mais vendidos em 2018. **Zoom**, [S.l.], 26 nov. 2018. Disponível em: <https://www.zoom.com.br>. Acesso em: 14 abr. 2019.

MONTEIRO, C. As geladeiras mais vendidas em 2019. **Zoom**, [S.l.], 04 abr. 2019. Disponível em: <https://www.zoom.com.br>. Acesso em: 20 abr. 2019.

NASCIMENTO, R. L. **Energia solar no Brasil: situação e perspectivas**. 2017. 46 f. Estudo Técnico (Engenharia Fotovoltaica) – Câmara dos Deputados, Brasília, 2017. Disponível em: http://bd.camara.gov.br/bd/bitstream/handle/bdcamara/32259/energia_solar_limp.pdf?sequencia=1. Acesso em: 11 ago. 2018.

PACHECO, M.; LAMBERTS, R. Assessment of technical and economical viability for large-scale conversion of single family residential buildings into zero energy buildings in Brazil: Climatic and cultural considerations. **Energy Policy**, Amsterdam, v.63, p.716-725, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.07.133>. Acesso em: 23 nov. 2017.

PAJARSKAS, K. **Achieving a nearly zero energy building (nZEB) status for a residential house in Finland**. 2017. 79 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Serviços de Edifícios) – South Eastern Finland University of Applied Science, 2017.

PAOLETTI, G. *et al.* Nearly Zero Energy Buildings: An overview of the main construction features across Europe. **Buildings**, Wuhan, v.7, p.43-65, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/buildings7020043>. Acesso em: 05 abr. 2018.

PARGANA, N. *et al.* Comparative environmental life cycle assessment of thermal insulation materials of buildings. **Energy and Buildings**, Amsterdam, v.82, p.466-481, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.05.057>. Acesso em: 05 abr. 2018.

PAVEL, C. C.; BLAGOEVA, D. T. **Competitive landscape of the EU's insulation materials industry for energy-efficient buildings**. Luxembourg: European Commission, 2018, 21 p. Disponível em: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC108692/kj1a28816enn.pdf>. Acesso em: 23 jul. 2019.

PEREIRA, C. D. **Influência da refletância e da emitância de superfícies externas no desempenho térmico de edificações**. 2014. 207 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

PEREIRA, E. B. *et al.* **Atlas brasileiro de energia solar**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2006. 60 p.

PHILIPS. **Guia prático Philips iluminação: lâmpadas, reatores e luminárias**. [S.l.], 2014. Disponível em: <https://www.philips.com.br/>. Acesso em: 11 jun. 2018.

PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DA ENERGIA ELÉTRICA (PROCEL). **Avaliação do mercado de eficiência energética no Brasil: pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de consumo**. Rio de Janeiro: Eletrobras, 2007. 159 p. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br>. Acesso em: 05 jan. 2019.

PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DA ENERGIA ELÉTRICA (PROCEL-a). **Procel edifica: eficiência energética nas edificações**. Rio de Janeiro: Eletrobras, 2019. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br>. Acesso em: 20 jan. 2019.

PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DA ENERGIA ELÉTRICA (PROCEL-b). **Lâmpadas LED:** selo procel. Rio de Janeiro: Eletrobras, 2019. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br>. Acesso em: 02 jul. 2019.

PROCELINFO. **Selo procel:** módulos fotovoltaicos. Rio de Janeiro: Eletrobras, 2020. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br>. Acesso em: 28 fev. 2020.

QGDI. **Ecoville residence.** Disponível em: <http://www.qgdi.com.br/pe/imovel/ecoville-residence>. Acesso em: 14 fev. 2019.

RATTANONGPHISAT, W.; RORDPRAPAT, W. Strategy for energy efficient buildings in tropical climate. **Energy Procedia**, Amsterdam, v.52, p.10-17. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.07.049>. Acesso em: 08 mar. 2019.

RODRIGUES, M. V. P. **Avaliação da eficiência energética de edificações residenciais em fase de projeto:** análise de desempenho térmico pelo método prescritivo e por simulação computacional aplicados a estudo de caso de projeto-tipo do exército brasileiro. 2015. 132 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2015.

SALIH, T. W. M. **Insulation Materials for undergraduate students 4th class.** 2016. 99 f. Material Didático (Ciências Térmicas) – Colégio de Engenharia, Universidade de Al-Mustansiriyah, Bagdá, 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/338208869_Insulation_Materials_For_Undergraduate_Students_4_th_Class. Acesso em: 13 fev. 2018.

SANTOS, P. A. C. **NZEB: Nearly Zero Energy Building** – metodologias para implementação de NZEB, aplicação a edifício unifamiliar novo. 2017. 228 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Coimbra, 2017.

SCHIAVONI, S. *et al.* Insulation materials for building sector: a review and comparative analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v.62, p.988-1011, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.045>. Acesso em: 17 jan. 2018.

SCOGNAMIGLIO, A. *et al.* How net zero energy buildings and cities might look like?: new challenges for passive design and renewables design. **Energy Procedia**, Amsterdam, v.61, p.1163-1166, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.11.1044>. Acesso em: 07 fev. 2018.

SENA, J. *et al.* Simulação do comportamento da temperatura do solo através da temperatura do ar. **Revista Ciência e Natura**, Santa Maria, Edição Especial, p. 258-261, dez. 2013.

SILVA, N. L. **Análise dos parâmetros de conforto térmico em habitações populares de um conjunto em João Pessoa/PB.** 2015. 151 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2015.

SILVA, S. M. *et al.* Contribution of the solar systems to the nZEB and ZEB design concept in Portugal: energy, economics and environmental life cycle analysis. **Solar Energy Materials & Solar Cells**, Amsterdam, v.156, p.59-74, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.04.053>. Acesso em: 26 mar. 2018.

SILVA, I. L. M. **Estudo de durabilidade de pinturas frias e convencionais expostas ao envelhecimento natural**. 2017. 170 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

SOUZA, E. P. **Economia de energia em ar condicionado no Brasil: eficiência e economicidade**. 2010. 137 f. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia de Energia) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2010.

SUN POWER. **SunPower® e-series residential solar panels - E20-327**. San José: SunPower, 2016. 2 p. Disponível em: <https://us.sunpower.com/sites/default/files/media-library/data-sheets/ds-e20-series-327-residential-solar-panels.pdf>. Acesso em 29 fev. 2020.

TAVARES, S. F.; FRITSCHÉ, I. D. **AET N° 01/04: desenvolvimento de uma metodologia para criação de uma base nacional de dados sobre o consumo específico de energia**. 2007. 37 f. Autorização de Execução de Trabalho (Engenharia Elétrica) – Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

TEIXEIRA, C. A. *et al.* **Levantamento das características de edifícios residenciais brasileiros**. 2015. 87 f. Relatório Técnico (Engenharia Civil) – Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

TORGAL, F. P. *et al.* **Nearly zero energybuilding refurbishment: a multidisciplinary approach**. London: Springer, 2013. 655 p.

U.S Department of Energy (DOE). **Thermal management of white LEDs**. Washington, D.C: DOE, 2007. 2 p. Disponível em: https://www1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/thermal_led_feb07_2.pdf. Acesso em: 02 fev. 2018.

U.S Department of Energy (DOE). **Insulation: a guide for contractors to share with homeowners**. Washington, D.C: Pacific Northwest National Laboratory & Oak Ridge National Laboratory, 2012. 138 p. Disponível em: https://www1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/building_america/insulation_guide.pdf. Acesso em: 12 mai. 2018.

U.S Department of Energy (DOE). **A common definition for zero energy buildings**. Washington, D.C: U.S Department of Energy and National institute of Building Sciences, 2015. 22 p. Disponível em: <https://www.energy.gov/eere/buildings/downloads/common-definition-zero-energy-buildings>. Acesso em: 13 out. 2017.

U.S Department of Energy (DOE-a). **EnergyPlus™ version 9.0.1 documentation: getting Started**. Washington, D.C: DOE, 2018. 87 p. Disponível em: <https://energyplus.net/>. Acesso em: 25 set. 2018.

U.S Department of Energy (DOE-b). **EnergyPlus™ version 9.0.1 documentation: engineering reference**. Washington, D.C: DOE, 2018. 1732 p. Disponível em: <https://energyplus.net/>. Acesso em: 27 set. 2018.

U.S Department of Energy (DOE-c). **EnergyPlus™ version 9.0.1 documentation: output details and examples**. Washington, D.C: DOE, 2018. 276 p. Disponível em: <https://energyplus.net/>. Acesso em: 05 out. 2018.

U.S Department of Energy (DOE-d). **EnergyPlus™ version 9.0.1 documentation: input output Reference**. Washington, D.C: DOE, 2018. 276 p. Disponível em: <https://energyplus.net/>. Acesso em: 02 out. 2018.

WEI, X.; SHICONG, Z. **APEC 100 best practice analysis of nearly/net zero energy building**. Pequim: China academy of building research & China passive building alliance, 2017. 253 p. Disponível em: <https://www.apec.org/Publications/2017/05/APEC-100-Best-Practice-Analysis-of-NearlyNet-Zero-Energy-Building>. Acesso em: 14 mar. 2019.

WETHER SPARK. **Condições meteorológicas médias de Taubaté**. [S.l.], 2019. Disponível em: <https://pt.weatherspark.com/y/30389/Clima-caracter%C3%ADstico-emTaubat%C3%A9-Brasil-durante-o-ano>. Acesso em: 21 jan. 2019.

WILLIAMS, J. *et al.* Less is more: a review of low energy standards and the urgent need for an international universal zero energy standard. **Building Engineering**, Amsterdam, v.6, p.65-74, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2016.02.007>. Acesso em: 22 ago. 2019.

WESTPHAL, F. S. **Manual técnico do vidro plano para edificações**. São Paulo: ABIVIDRO, 2016. 184 p. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/313693214_Manual_Tecnico_do_Vidro_Plano_para_Edificacoes. Acesso em: 12 fev. 2019.

APÊNDICE A – Cálculo da área útil dos apartamentos do modelo de base de edifício residencial

Considerando as dimensões apresentadas na planta baixa do pavimento tipo (Figura 15) do modelo de base de edifício residencial para a simulação energética a área útil dos apartamentos pode ser calculada a partir da área perimetral destes subtraindo - se a área de paredes internas conforme apresentado nos Quadros A.1 e A.2.

Quadro A.1: Área útil dos apartamentos superiores da planta do pavimento tipo

Área perimetral	$9,79 \times 9,86 - 1,00 \times 2,26 = 94,27 \text{ m}^2$
Comprimento das paredes internas	31,76 m
Espessura das paredes internas	0,14 m
Área das paredes internas a serem descontadas da área perimetral	$31,76 \times 0,14 = 4,45 \text{ m}^2$
Área útil do apartamento	$94,27 - 4,45 = 89,82 \text{ m}^2$

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro A.2: Área útil dos apartamentos inferiores da planta do pavimento tipo

Área perimetral	$9,72 \times 9,72 - 1,00 \times 2,40 = 92,08 \text{ m}^2$
Comprimento das paredes internas	34,54 m
Espessura das paredes internas	0,14 m
Área das paredes internas a serem descontadas da área perimetral	$34,54 \times 0,14 = 4,84 \text{ m}^2$
Área útil do apartamento	$92,08 - 4,84 = 87,24 \text{ m}^2$

Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando os valores de áreas úteis dos apartamentos conforme apresentados nos Quadros A.1 e A.2 tem-se uma área útil média dos apartamentos de $88,5 \text{ m}^2$.

APÊNDICE B – Cálculo das dimensões das aberturas envidraçadas

O Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ – R) requer que a soma das áreas das aberturas para iluminação natural de cada ambiente sejam, no mínimo, correspondentes a 12,5% da área útil do ambiente (INMETRO, 2012). Para o cálculo das dimensões das aberturas considerou-se as áreas dos ambientes dos apartamentos superiores da planta baixa do pavimento tipo (Figura 15) do modelo de base de edifício residencial. A Tabela B.1 apresenta os valores encontrados.

Tabela B.1: Dimensionamento das áreas de aberturas envidraçadas

Ambiente	C(m)	L(m)	A(m ²)	A_RTQ-R(m ²)	DC (Alt x Larg) (m)	Ab/Am (%)
Suíte	3,86	3,36	12,97	1,62	1,0x2,0	15,4
Quarto 1	2,86	3,92	11,21	1,40	1,0x1,5	13,4
Quarto 2	3,16	3,50	11,06	1,38	1,0x1,5	13,6
Sala	6,86	3,99	27,37	3,42	2,1x2,0	15,3
Cozinha	7,52	1,36	10,22	1,27	1,2x1,2	14,1
Banheiro	1,56	1,52	2,37	0,29	0,6x0,8	20,2
Escadas	4,50	2,40	10,80	1,35	1,0x1,5	13,9

Nota: C – comprimento do ambiente, L – largura do ambiente, A – área útil do ambiente para fins de cálculo da área de abertura, A_RTQ-R – Área da abertura que atende ao requisito mínimo de 12,5% recomendado pelo RTQ-R, DC – dimensões comerciais de janelas que atendem ao requisito mínimo do RTQ-R para área de aberturas, Ab/Am – porcentagem da área de abertura real em relação a área do ambiente após a seleção das dimensões comerciais de janelas ou porta.

Fonte: Elaborado pelo autor.

APÊNDICE C – Definição de propriedades dos materiais de isolamento térmico e equacionamentos para os elementos da envoltória

Neste Apêndice são apresentadas algumas definições de propriedades térmicas necessárias ao entendimento do modo como a adição de camadas de material isolante na envoltória opaca de um edifício pode afetar as trocas térmicas entre os ambientes interno e externo.

C.1 – Condutividade térmica

Segundo Bel (2017) e Schiavoni *et al.* (2016), um dos principais parâmetros que expressa o desempenho térmico de um material isolante é a sua condutividade térmica (λ) (considerando-se estado uniforme). A condutividade térmica é definida como o fluxo de calor que atravessa uma unidade de área de 1 m de espessura de um material homogêneo devido à existência de um gradiente de temperatura igual a 1 K nas superfícies opostas no material. A condutividade térmica é expressa, em unidade do SI, em W/m.K

C.2 – Transmitância térmica e resistência térmica

Para uma parede de camadas múltiplas as propriedades térmicas dos materiais são agrupadas em um único coeficiente chamado de Transmitância térmica (U). O qual é definido como o fluxo de calor que atravessa uma unidade de área de um componente complexo ou material não homogêneo devido à existência de um gradiente de temperatura de 1K, em unidades SI é expresso em W/m²K. O inverso da transmitância térmica é definido como resistência térmica (R). A transmitância térmica considera a espessura do material isolante e a transferência de calor devido à convecção e radiação (BEL, 2017; SCHIAVONI *et al.*, 2016).

C.3 – Procedimento de cálculo para a resistência térmica de paredes compostas por múltiplas camadas de materiais diferentes

A norma brasileira NBR 15220 (ABNT, 2003) define equacionamentos para o cálculo da resistência térmica de paredes compostas por várias seções de materiais com condutividades térmicas diferentes. A resistência térmica total (R_T) de uma parede composta por várias seções é definida pela equação (C.1).

$$R_T = R_{si} + R_t + R_{se} \quad (C.1)$$

Na equação (C.1), R_{si} e R_{se} são, respectivamente, as resistências térmicas superficiais interna e externa, as quais dependem de fatores como emissividade, velocidade do ar e temperatura de superfície. Os valores de R_{si} e R_{se} são tabelados pela NBR 15220 (ABNT, 2003). Na equação (C.1), R_t é a resistência térmica da parte massiva da parede, definida pela equação (C.2).

$$R_t = \frac{\sum A_i}{\sum \frac{A_i}{R_i}} \quad (C.2)$$

Na equação (C.2), A_i é área transversal ao fluxo de calor da seção i da parede e R_i é a resistência térmica da seção i da parede, a qual é definida, segundo a norma NBR 15220 (ABNT, 2003) pela equação (C.3).

$$R_i = \sum \frac{e_j}{\lambda_j} \quad (C.3)$$

Em que, e_j e λ_j , são, respectivamente, a espessura e condutividade térmica do material j que compõe a seção i da parede.

O equacionamento para o cálculo da transmitância térmica (U) de uma parede composta por várias seções e materiais é, também, definido pela norma NBR 15220 (ABNT, 2003) da forma indicada na equação (C.4).

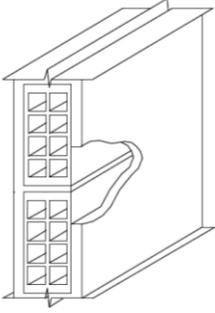
$$U = \frac{1}{R_t} \quad (C.4)$$

APÊNDICE D – Cálculo das propriedades físicas e térmicas das paredes

Segundo Teixeira *et al.* (2015), os elementos construtivos das envoltórias dos edifícios residenciais brasileiros são bastante semelhantes, um dos materiais mais utilizados é o bloco de cerâmica 8 furos com dimensões 9x19x19 (cm). Tal bloco foi adotado neste trabalho como o padrão para a constituição das paredes externas e internas do modelo de base de edifício residencial. As paredes construídas com esses blocos não apresentam constituição homogênea ao longo de toda a seção, uma vez que há a alternância de camadas de argamassa (de emboço e assentamento) com o material cerâmico dos blocos e com camadas de ar aprisionadas no interior dos furos dos blocos cerâmicos. Essa característica inviabiliza a declaração individual dos materiais componentes das paredes no *EnergyPlus*, desta forma, as paredes foram declaradas como camadas homogêneas de propriedades físicas e térmicas iguais as propriedades médias ponderadas de seus materiais constituintes.

A norma NBR 15220 (ABNT, 2003) apresenta o procedimento de cálculo da transmitância térmica, bem como as dimensões de argamassas de emboço e assentamento para diversos tipos de paredes levando em conta a não homogeneidade dos materiais ao longo da seção transversal. O Quadro D.1 apresenta os resultados encontrados para a parede composta por blocos de cerâmica 8 furos 9x19x19 (cm) (ABNT, 2003).

Quadro D.1: Transmitância térmica e dimensões para paredes compostas por blocos de cerâmica 8 furos.

Parede	Descrição	U (W/m ² .K)
	Parede de tijolos 8 furos quadrados, assentados na menor dimensão Dimensões do tijolo: 9,0 x 19,0 x 19,0 (cm) Espessura da argamassa de assentamento: 1,0 cm Espessura da argamassa de emboço: 2,5 cm Espessura total da parede: 14,0 cm	2,49

Fonte: Adaptado da ABNT (2003).

D.1 - Cálculo da condutividade térmica da parede

A transmitância térmica (U) é definida como o inverso da resistência térmica (R) e é dada pela equação (D.1).

$$U = \frac{1}{R} \quad (D.1)$$

A resistência térmica (R) pode ser definida como a razão entre a espessura do material (e) e a condutividade térmica do material (λ), como apresentado na equação (D.2).

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad (D.2)$$

A partir das equações (D.1) e (D.2), pode-se demonstrar que a condutividade térmica (λ) pode ser escrita como o produto da espessura pela transmitância térmica, da forma apresentada na equação (D.3).

$$\lambda = e.U \quad (D.3)$$

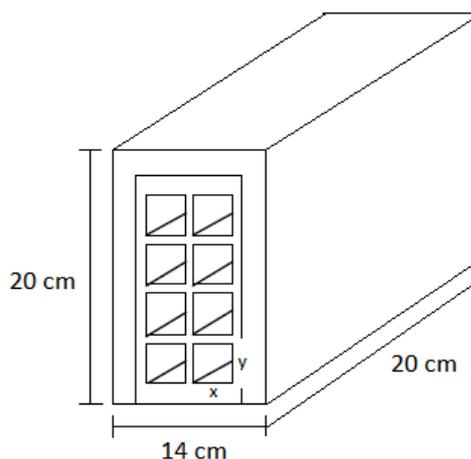
Utilizando-se a equação (D.3) e o valor de transmitância térmica e espessura da parede apresentadas no Quadro D.1 calculou-se o valor da condutividade térmica média da parede, como mostra a equação (D.4)

$$\lambda = e.U = 0,14 \text{ m} \cdot 2,49 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} = 0,35 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \quad (D.4)$$

D.2 - Cálculo da massa específica da parede

No cálculo da massa específica da parede foi desconsiderada a contribuição da massa de ar aprisionada no interior dos furos dos blocos cerâmicos, uma vez que o ar apresenta massa específica desprezível em relação aos outros componentes da parede. Para o cálculo do volume de um elemento da parede foi considerado o bloco de 8 furos 9 x 19 x 19 (cm), mais 2,5 cm de argamassa de emboço nas superfícies externa e interna, e 1 cm de argamassa de assentamento nos lados superiores e posterior do bloco de cerâmica, a montagem completa considerada nos cálculos é apresentada na Figura D.2.

Figura D.2: Elemento construtivo considerado no cálculo da massa específica da parede



Fonte: Elaborado pelo autor.

A massa específica do elemento de parede apresentado na Figura D.2 é definida de acordo com a equação (D.5)

$$\rho_e = \frac{m_e}{V_e} \quad (\text{D.5})$$

Em que V_e é o volume do elemento de parede e m_e é a massa do elemento de parede, definida pela equação (D.6)

$$m_e = m_a + m_c = \rho_a \cdot V_a + \rho_c \cdot V_c \quad (\text{D.6})$$

Em que:

m_a : Massa de argamassa (emboço e assentamento)

m_c : Massa de cerâmica do bloco de 8 furos

ρ_a : Massa específica da argamassa

ρ_c : Massa específica da cerâmica do bloco de 8 furos

V_a : Volume da argamassa

V_c : Volume da cerâmica do bloco de 8 furos

Para calcular a massa específica do elemento de parede é necessário conhecer a massa específica da argamassa e a massa específica da cerâmica do bloco de 8 furos. Neste trabalho, os valores adotados para as massas específicas das argamassas (de emboço e assentamento) e

da cerâmica do bloco de 8 furos foram obtidos da norma NBR 15220 (ABNT, 2003) e apresentam, respectivamente, os valores:

- $\rho_a = 2000 \text{ kg/m}^3$
- $\rho_c = 1600 \text{ kg/m}^3$

Outra grandeza necessária na equação (D.6) é o volume da cerâmica (V_c), o qual pode ser calculado conforme a equação (D.7)

$$V_c = V_b - 8.V_f \quad (\text{D.7})$$

Em que: V_b é o volume do bloco de 8 furos e V_f é o volume de um furo.

Para calcular o volume de um furo (V_f) do bloco de cerâmica é necessário primeiro determinar a largura (x) e o comprimento (y) do furo (Figura D.2), esses valores dependem das espessuras das paredes externas e septos do bloco de cerâmica. Neste trabalho foi considerado o valor de 7 mm pois este corresponde ao valor mínimo recomendado pela Portaria nº 16, de 05 de janeiro de 2011 do Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO, 2011). Desta forma, o volume de um furo (V_f) pode ser calculado como mostrado na equação (D.8).

$$V_f = x.y.18,3. \text{ cm}^3 = 3,5.3,9.18,3 \text{ cm}^3 = 249,8.10^{-6} \text{ m}^3 \quad (\text{D.8})$$

Substituindo o volume do furo (V_f) e o volume do bloco ($V_b = 3,249.10^{-3} \text{ m}^3$) na equação (D.7) se obtém o volume de cerâmica do bloco. O volume de argamassa (V_a) apresentado na equação (D.6) pode ser calculado como apresentado na equação (D.9).

$$V_a = V_e - V_b \quad (\text{D.9})$$

Substituindo os valores de volume e massa específica da argamassa e da cerâmica na equação (D.6) obtém-se a massa do elemento de parede apresentado na Figura D.2, em seguida, calculando-se a razão entre a massa e o volume do elemento de parede se obtém a massa específica mostrada na equação (D.10).

$$\rho_e = \frac{m_e}{V_e} = \frac{6,7 \text{ kg}}{5,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3} = 1196 \text{ kg/m}^3 \quad (\text{D.10})$$

Em que: m_e : Massa do elemento de parede apresentado na Figura D.2

V_e : Volume do elemento de parede apresentado na Figura D.2

ρ_e : Massa específica do elemento de parede apresentado na Figura D.2

D.3 - Cálculo do calor específico da parede

A partir de cálculos de termodinâmica é possível demonstrar que o calor específico médio de uma superfície composta por dois materiais diferentes pode ser determinado a partir da média ponderada dos calores específicos de cada componente da mistura tomando-se as massas das substâncias participantes como fator de ponderação, logo, o calor específico do elemento de parede apresentado na Figura D.2 pode ser calculado a partir da equação (D.11).

$$c_e = \frac{m_a c_a + m_c c_c}{m_a + m_c} \quad (\text{D.11})$$

Em que: c_e : Calor específico do elemento de parede

c_a : Calor específico da argamassa (de emboço e assentamento)

c_c : Calor específico da cerâmica do bloco de 8 furos

m_a : Massa da argamassa (de emboço e assentamento)

m_c : Massa da cerâmica do bloco de 8 furos

Substituindo - se os valores $c_e = 0,92 \text{ kJ/kg.K}$ e $c_a = 1,00 \text{ kJ/kg.K}$, dados pela ABNT (2003), bem como os valores de massa de argamassa e cerâmica calculados através da equação (D.6) se obtém o calor específico médio do elemento de parede apresentado da Figura (D.2). O valor encontrado foi: $c_e = 0,976 \text{ kJ/kg.K}$.

APÊNDICE E – Propriedades dos materiais de isolamento térmico empregados no setor de edifício

Além da condutividade térmica (λ), massa específica (ρ) e capacidade térmica específica (C_p) outros critérios utilizados na seleção de materiais isolantes são sua resistência ao fogo e resistência ao vapor de água. Na União Europeia os critérios para classificação de resistência ao fogo de materiais de construção são estabelecidos pela norma EN-13501-1. Nesta norma há sete classes principais de classificação: A1, A2, B, C, E e F; na qual, em ordem crescente de inflamabilidade, A1 é não inflamável e E é altamente inflamável. Se o produto não tem especificação ou é extremamente inflamável este recebe a classificação F (DUIJVE, 2012). Outro parâmetro importante é a resistência do material isolante à difusão do vapor de água (μ), pois problemas de absorção de umidade podem causar danos estruturais como apodrecimento de madeira, pontes frias e pontos úmidos que podem provocar a proliferação de mofo (DUIJVE, 2012). O Quadro E.1 apresenta vários materiais de isolamento térmico com seus respectivos valores de condutividade térmica, massa específica, capacidade térmica específica, resistência ao fogo (conforme classificação Europeia) e resistência à difusão de vapor de água (maiores valores de resistência indicam menor tendência à absorção de umidade).

Quadro E.1: Propriedades dos materiais de isolamento térmico atualmente mais empregados no setor de edifícios

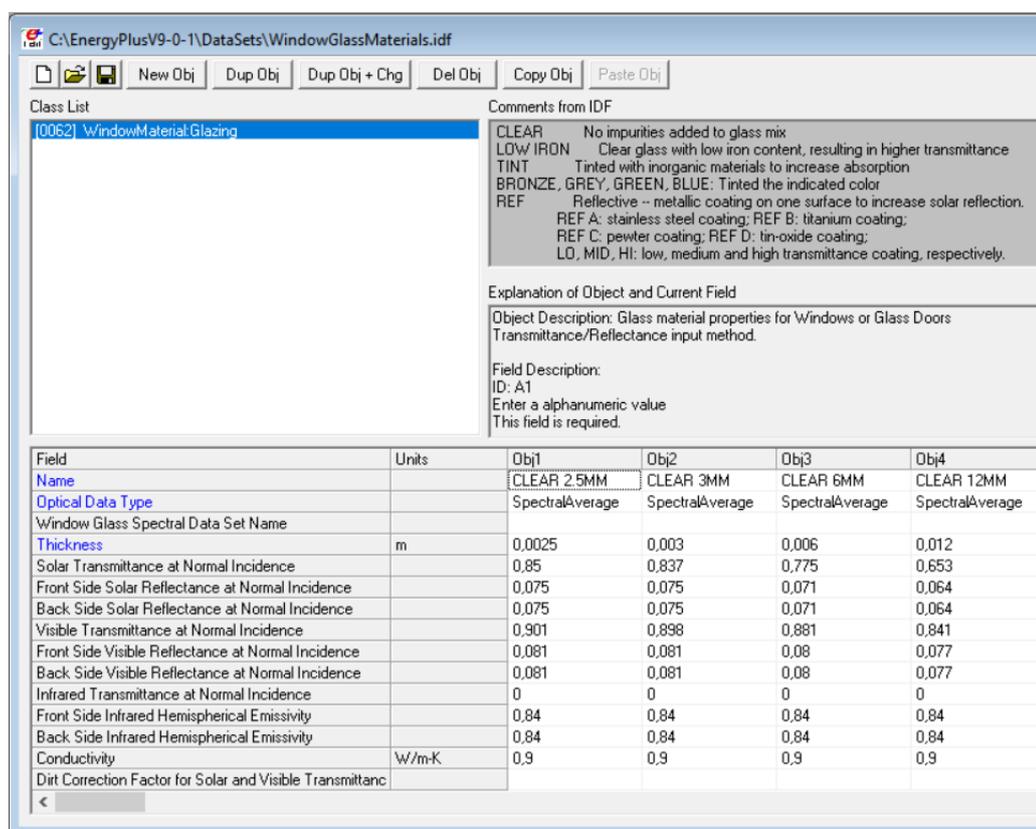
Isolante	ρ (kg/m ³)	λ (W/m.K)	C_p (kJ/kg.K)	Resistência ao fogo	Resistência ao vapor(μ)
Poliestireno extrudado (XPS)	25 – 40 ^a 37 ^c ; 40 ^d 32 – 40 ^g	0,037 ^a ; 0,032 ^c 0,035 ^d 0,032 – 0,037 ^g	1,45 – 1,70 ^g 1,4 ^d	E – F ^e	80 – 300 ^e
Poliestireno expandido (EPS)	15 – 20 ^a 30 ^c 15 – 35 ^g	0,040 ^a 0,037 ^b 0,035 ^c 0,031 – 0,038 ^g	1,25 ^g 1,45 ^d	E – F ^e	20 – 100 ^e
Poliuretano (PUR)	20 – 50 ^a 40 ^c 30 ^d 15 – 45 ^g	0,042 ^a 0,030 ^c 0,025 ^d 0,022 – 0,040 ^g	1,3 – 1,45 ^g 1,4 ^d	D – F ^e	50 – 100 ^e
Poliisocianurato (PIR)	28 – 40 ^e 30 – 45 ^g	0,020 – 0,035 ^e 0,018 – 0,028 ^g	1,4 – 1,5 ^g	D – F ^e	50 – 100 ^e
cortiça	90 – 140 ^a 100 – 120 ^e 110 – 170 ^g	0,045 ^a 0,040 ^b 0,037 – 0,043 ^e 0,037 – 0,050 ^g	1,5 – 1,7 ^g	E ^e	5 – 30 ^e
celulose	28 – 35 ^a 30 – 70 ^e 23 – 80 ^f 30 – 80 ^g	0,040 ^{b,e} 0,039 ^f 0,037 – 0,042 ^g	1,3 – 1,6 ^g	E ^e	2 – 3 ^e
Lã de vidro	15 – 100 ^a 13 ^c 15 – 75 ^g	0,040 ^a ; 0,017 ^b 0,036 ^c 0,031 -0,037 ^g	0,9 – 1,0 ^g	A1 ^e	1 ^e
Lã de rocha	35 – 100 ^a 20 – 200 ^c 25 ^d 40 – 200 ^g	0,040 ^a 0,035 – 0,040 ^c 0,038 ^d 0,033 – 0,040 ^g	0,8 – 1,0 ^g 1,03 ^d	A1 ^e	1 -5 ^e
Fibra de madeira	50 – 270 ^g 55 – 140 ^e	0,038 – 0,050 ^g 0,038 – 0,058 ^e	1,9 – 2,1 ^g	E ^e	5 ^e

Fonte: Santos (2017)^a, Jorge (2013)^b, Augusto et al.(2016)^c, Georgiou (2015)^d, Duijve(2012)^e, ECIA(2018)^f, Schiavoni et al.(2016)^g.

APÊNDICE F – Determinação das propriedades térmicas e luminosas do vidro comum incolor de 4 mm de espessura

A biblioteca de propriedades térmicas de envidraçados do *EnergyPlus* define propriedades térmicas para os vidros comum incolores de 2,5 ; 3 ; 6 e 12 mm, desta forma, as propriedades térmicas do vidro comum incolor de 4 mm foram determinadas por regressão linear. A Figura F.1 apresenta as propriedades térmicas de vidros “clear” (vidro incolor sem adição de impurezas na massa vítrea) da forma como é apresentada na biblioteca de propriedades de envidraçados do *EnergyPlus*.

Figura F.1: Propriedades térmicas de vidros “clear” definidas na biblioteca de propriedades de envidraçados do *EnergyPlus*

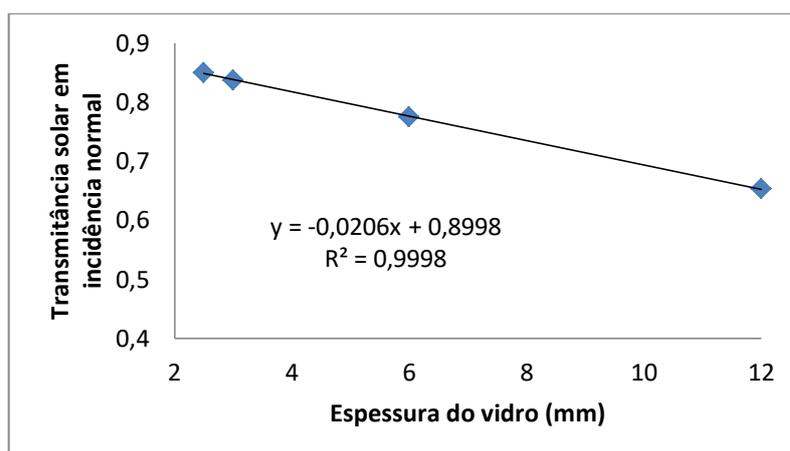


Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4
Name		CLEAR 2.5MM	CLEAR 3MM	CLEAR 6MM	CLEAR 12MM
Optical Data Type		SpectralAverage	SpectralAverage	SpectralAverage	SpectralAverage
Window Glass Spectral Data Set Name					
Thickness	m	0,0025	0,003	0,006	0,012
Solar Transmittance at Normal Incidence		0,85	0,837	0,775	0,653
Front Side Solar Reflectance at Normal Incidence		0,075	0,075	0,071	0,064
Back Side Solar Reflectance at Normal Incidence		0,075	0,075	0,071	0,064
Visible Transmittance at Normal Incidence		0,901	0,898	0,881	0,841
Front Side Visible Reflectance at Normal Incidence		0,081	0,081	0,08	0,077
Back Side Visible Reflectance at Normal Incidence		0,081	0,081	0,08	0,077
Infrared Transmittance at Normal Incidence		0	0	0	0
Front Side Infrared Hemispherical Emissivity		0,84	0,84	0,84	0,84
Back Side Infrared Hemispherical Emissivity		0,84	0,84	0,84	0,84
Conductivity	W/m-K	0,9	0,9	0,9	0,9
Dirt Correction Factor for Solar and Visible Transmittanc					

Fonte: Biblioteca de propriedades térmicas de envidraçados do *EnergyPlus* (2019).

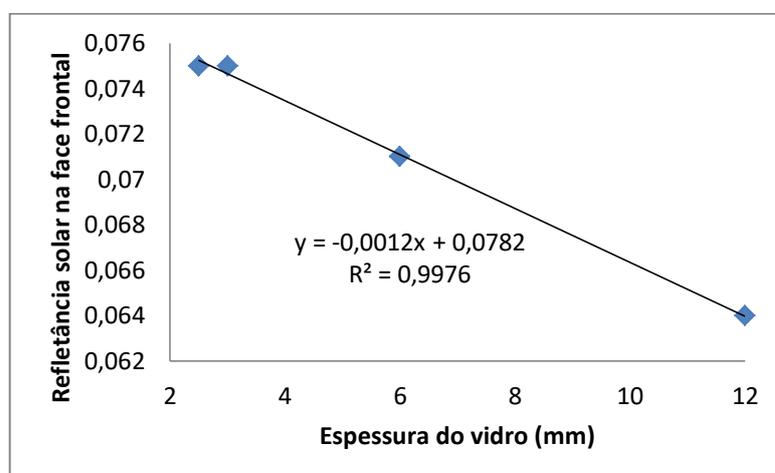
A partir de regressão linear, com o auxílio do *software* Excel, foram determinadas as linhas de tendência da transmitância solar em incidência normal, refletância solar na face frontal e transmitância visível em incidência normal, como apresentado nas Figuras F.2, F.3 e F.4.

Figura F.2: linha de tendência da transmitância solar em incidência normal



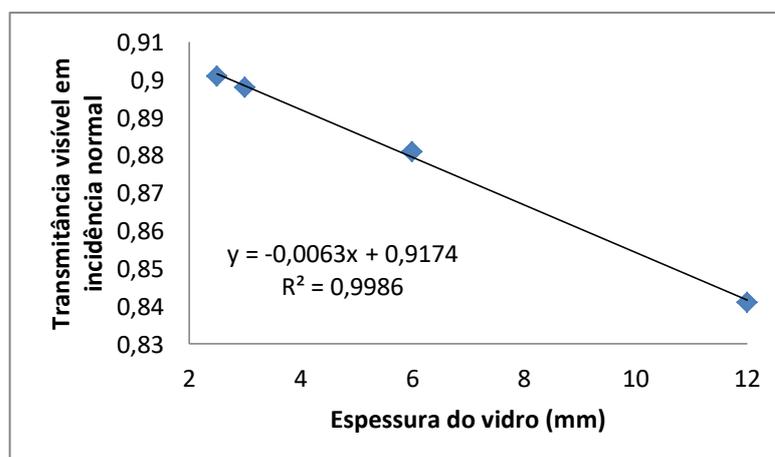
Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados da Figura F.1 (2019).

Figura F.3: Linha de tendência da refletância solar na face frontal



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados da Figura F.1 (2019).

Figura F.4: Linha de tendência da transmitância visível em incidência normal



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados da Figura F.1 (2019).

A partir da Figura F.1 é possível observar as seguintes características comuns aos vidros “clear”:

- Os valores de refletância solar em incidência normal são idênticos para as faces frontal (face de incidência da radiação) e posterior do vidro “clear”;
- Os valores de refletância visível em incidência normal nas faces frontal e posterior do vidro “clear” são idênticos e não sofrem variações significativas de 2,5 a 6 mm de espessura;
- Os valores de transmitância em incidência normal de infravermelho, emissividade hemisférica de infravermelho nas faces frontal e posterior são constantes de 2,5 a 12 mm da espessura para o vidro “clear”.

Empregando-se as equações de regressão obtidas (Figuras F.2, F.3 e F.4) e observando-se as características comuns ao vidro “clear” mencionadas anteriormente determinou-se as propriedades térmicas do vidro comum incolor de 4 mm que foram apresentadas na Tabela 8 da seção 5.4.2.2.

APÊNDICE G – Caracterização de tipos de vidros e suas propriedades

Segundo Westphal (2016), as chapas de vidro plano são produzidas nas fabricas em dimensões padronizadas nas tonalidade incolor, verde, bronze e cinza com espessuras que variam de 2 a 19 mm. É importante conhecer os diferentes tipos de aplicação de cada tipo de vidro por meio de informações dos fabricantes e distribuidoras, também, é essencial a consulta à norma NBR 7199 para realizar aplicações seguras do vidro plano em edificações.

G.1 – Vidro *float* incolor

De acordo com Westphal (2016), a norma NM 294 define o vidro *float* como: “vidro de silicato sodocálcico, plano, transparente, incolor ou colorido em sua massa, de faces paralelas e planas, que se obtém por fundição contínua e solidificação no interior de um banho de metal fundido”. O vidro float comum pode ser cortado, usinado, perfurado, curvado, afiado e polido. A partir das chapas de vidro float é possível fazer uma série de processamentos para a fabricação, dentre outros, de vidros laminados, temperados e insulados.

Em edificações o vidro float comum pode ser utilizado em locais onde não há riscos de impacto humano, como, por exemplo, em janelas de correr com o vidro totalmente encaixilhado e acima de 1,10 m do piso, abaixo da conta de 1,10 m devem ser utilizados vidros de segurança, como, por exemplo, aramado, temperado e laminado (WESTPHAL, 2016).

G.2 – Vidro aramado

O vidro aramado possui uma tela metálica incorporada ao seu interior. Essa tela é inserida à massa vítrea ainda derretida, conferindo maior resistência à chapa de vidro. É considerado um vidro de segurança e antifogo. Quando quebrado, os cacos de vidro permanecem presos à tela metálica, evitando possíveis ferimentos e mantendo o local de instalação fechado. O vidro aramado tem suas aplicações mais comuns em portas de acesso, janelas de escadas enclausuradas, divisórias, portas de móveis, guarda-corpos, coberturas e janelas projetantes para o exterior, como basculantes e maxi-ar. Todas essas aplicações são previstas pela norma NBR 7199 (WESTPHAL, 2016).

G.3 – Vidro de controle solar

Os vidros de controle solar possuem um tratamento superficial realizado por meio de um revestimento metálico, imperceptível a olho nu, que pode dar um aspecto mais refletivo ou mais escurecido ao vidro. Esse revestimento tem a função de minimizar o ganho de calor solar através do vidro, filtrando parte do espectro. Dependendo da composição do revestimento, o vidro pode proporcionar baixo ganho de calor por radiação enquanto permite a passagem de luz (WESTPHAL, 2016).

Segundo Westphal (2016), o revestimento, chamado de *coating*, pode ser aplicado durante o processo de fabricação com o vidro ainda quente (processo *on-line*, ou *hard-coating*), ou após o vidro estar pronto (processo *off-line* ou *soft-coating*). Dependendo do tipo e da resistência do revestimento o vidro de controle solar deve ser laminado ou insulado para proteger o *coating* no interior da composição. Porém, existem soluções que podem ser aplicadas na forma monolítica. A principal aplicação dos vidros de controle solar ocorre em janelas, fachadas e coberturas envidraçadas, permitindo maior área de abertura com menor ganho de calor comparado ao vidro comum incolor ou colorido.

G.4 – Vidro extra clear

O vidro extra clear é o vidro *float* (chapa plana de vidro fabricada por meio da flutuação de massa de vidro sobre piscinas de metal líquido) fabricado com baixo teor de óxido de ferro, resultando em um vidro extremamente transparente e claro. Por não possuir o tom esverdeado como os vidros comuns, ele possui uma alta transmissão luminosa. Sua aplicação é recomendada para ambientes nos quais se deseja aumentar a transmissão luminosa, como, por exemplo, em vitrines (WESTPHAL, 2016).

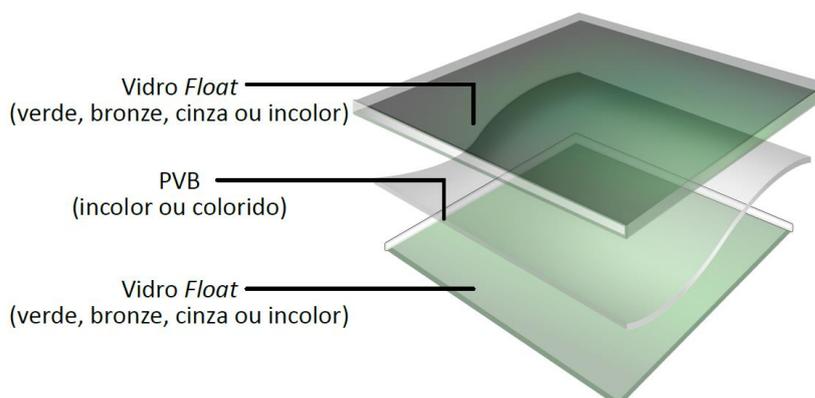
G.5 – Vidro insulado

O vidro insulado possui duas ou mais chapas de vidro unidas hermeticamente em suas bordas formando uma câmara de ar entre elas e criando um conjunto unitário chamado de “unidade insulada”. É um tipo de vidro muito eficaz para reduzir a transferência de calor por condução. Quando utilizado em conjunto com vidros de controle solar ou com vidro de baixa emissividade, os vidros insulados podem garantir elevados níveis de isolamento térmico (WESTPHAL, 2016).

G.6 – Vidro Laminado

Segundo Westphal (2016), o vidro laminado é composto por duas ou mais chapas de vidro *float* ligadas permanentemente em conjunto com uma ou mais camadas intermediárias de material plástico utilizando calor e pressão. O vidro e camadas intermediárias podem ter uma variedade de cores, revestimento de controle solar e espessura definidas para atender aos padrões de exigência de normas de segurança. Vidros temperados podem ser incorporados ao laminado para reforçar ainda mais a resistência ao impacto. São vidros normalmente utilizado em fachadas de edificios e locais com riscos de choque humano. Existem diferentes tipos de vidro laminado. O mais amplamente utilizado na construção civil é o laminado composto com uma camada de PVB (polivinil butiral) e dois vidros *float*. O PVB é um plástico composto de uma ou mais camadas, que é intercalado entre duas folhas de vidro, conforme apresentado na Figura G.1

Figura G.1: Composição do vidro laminado por camadas



Fonte: Westphal (2016).

O principal benefício desse sistema é seu desempenho em situações de impacto. Quando ocorre a quebra, os vidros laminados mantêm seus fragmentos firmemente colados na camada de PVB (Westphal, 2016).

G.7 – Vidro temperado

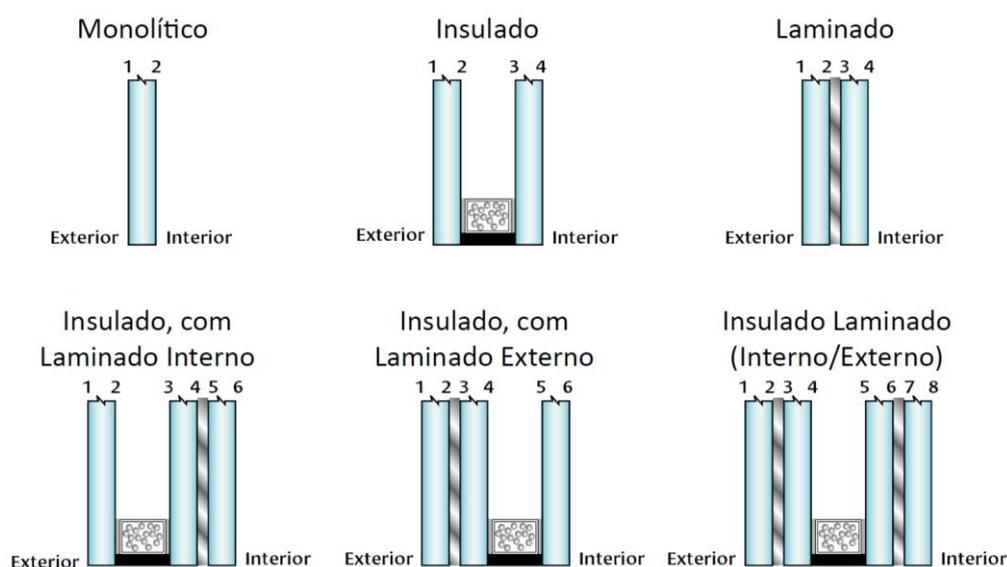
O vidro temperado é produzido por meio do aquecimento de chapas a altas temperaturas (em torno de 620°C), seguido de um resfriamento rápido, esse processo confere ao vidro resistência aproximada de 4 a 5 vezes maior que a do vidro *float* comum de mesma espessura

e configuração. Quando quebrado ele gera fragmentos relativamente pequenos, que são menos propensos a causar ferimentos graves (Westphal, 2016).

G.8 – Nomenclatura das faces do vidro

As faces devem ser numeradas em ordem crescente, da superfície externa para a superfície interna do vidro, numerando todas as faces de cada chapa de vidro isoladamente conforme apresentado na Figura G.2.

Figura G.2: Nomenclatura das faces de sistemas de vidros

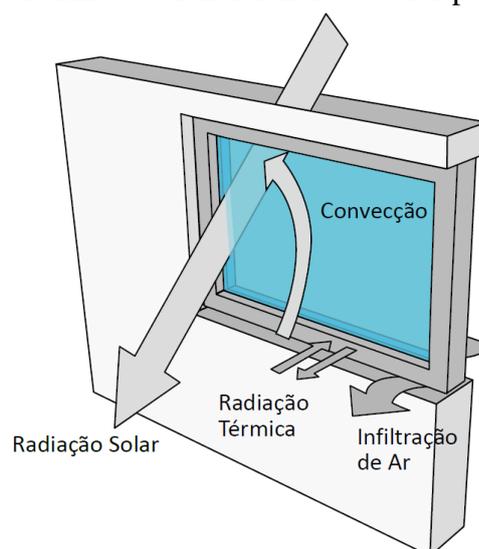


Fonte: Westphal (2016).

G.9 – Definição das propriedades térmicas do vidro

A transferência de calor por uma janela pode ocorrer por meio de quatro formas: radiação solar, convecção, radiação térmica (infravermelho) e infiltração de ar, conforme apresentado na Figura G.3.

Figura G.3: Formas de transferência de calor por uma janela



Fonte: Westphal (2016).

O tipo de vidro e suas propriedades físicas irão influenciar diretamente na quantidade de ganho ou perda de calor por radiação e convecção, enquanto as taxas de infiltração de ar dependem mais do tipo de esquadria e nível de vedação proporcionado pelos seus perfis (Westphal, 2016).

De acordo com Westphal (2016), as propriedades térmicas dos vidros de controle solar importantes para analisar o desempenho térmico são definidas na norma NBR 16023 conforme apresentado no Quadro G.1.

Quadro G.1: Propriedades térmicas de vidros

Transmissão ultravioleta (T_{uv})	Fração do componente UV da radiação solar incidente transmitido através do vidro
Absorção energética (A_{bs})	Fração da radiação solar incidente absorvida pelo vidro
Transmissão de energia (TE)	Fração da energia solar incidente transmitida diretamente pelo vidro
Reflexão de energia externa (RE_e)	Fração da radiação solar incidente refletida diretamente para o lado externo
Reflexão de energia interna (RE_i)	Fração da radiação solar incidente absorvida pelo vidro e transmitida para o lado interno
Transmissividade térmica (U)	fluxo de calor que passa por condução uma unidade de área do vidro submetida a uma diferença de temperatura de 1K entre suas faces externa e interna
Emissividade (ϵ)	Razão entre a quantidade de radiação emitida por uma superfície e a quantidade de radiação emitida pela superfície de um corpo negro a mesma temperatura (mede a capacidade do vidro emitir calor na forma de radiação infravermelha)
Fator solar (FS)	É a soma das parcelas de calor por transmissão solar direta mais a transmissão indireta do calor absorvida pelo vidro. Representa o total de calor da radiação solar que atravessa o vidro do ambiente externo para o ambiente interno (conforme apresentado na Figura G.4)

Fonte: Westphal (2016).

A Figura G.4 apresenta um esquema representativo da definição de Fator Solar de uma chapa de vidro conforme definida no Quadro G.1.

Figura G.4: Definição do fator solar de uma chapa de vidro



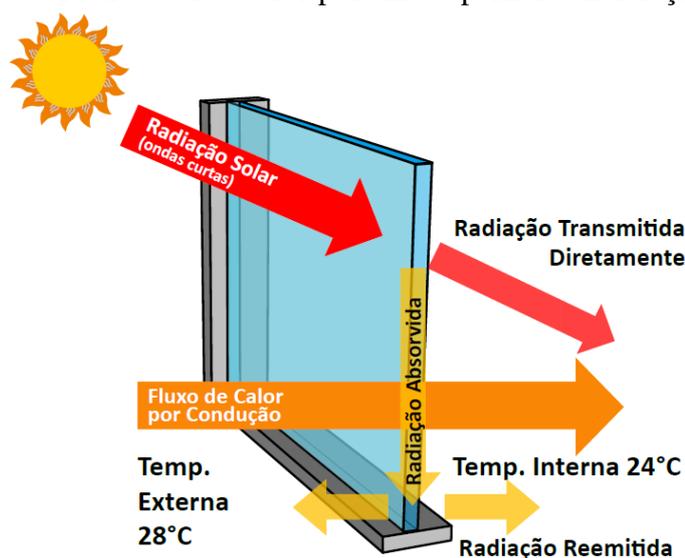
Fonte: Westphal (2016).

De acordo com Westphal (2016), os vidros de controle solar geralmente possuem fatores solares menores que 40% o que representa uma redução significativa nos ganhos de calor em relação ao vidro incolor. Em climas tropicais deve-se optar por vidros com baixo fator solar quando a área envidraçada representa mais de 30% da área da envoltória externa.

Os vidros de controle solar possuem uma de suas superfícies com revestimento metálico, o que conduz a emissividades diferentes. Dessa forma, o fluxo de calor por radiação entre o vidro e o seu entorno imediato é alterado, resultando em diferentes valores de transmitância térmica quando comparado a um vidro sem revestimento. Os vidros insulados (duas ou três lâminas de vidro com câmara de ar, argônio ou criptônio) são indicados para aplicação em climas com temperaturas mais extremas pois reduzem significativamente a transmissividade térmica.

O fluxo total de calor por uma superfície envidraçada é apresentado na Figura G.5 para uma situação na qual a temperatura do ambiente externo é maior que a do ambiente interno. Além dos componentes da radiação solar transmitida diretamente (TE) e indiretamente por reemissão (RE_i), os quais compõem o fator solar (FS), há a transmissão de calor por condução através do vidro devido as diferenças de temperatura entre o ar dos ambientes externo e interno.

Figura G.5: Fluxo total de calor por uma superfície envidraçada

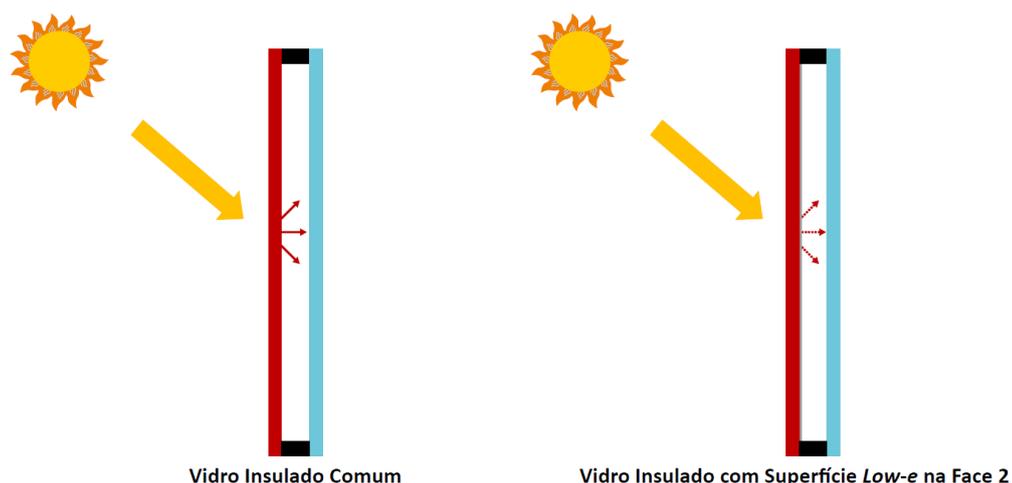


Fonte: Westphal (2016).

A emissividade é uma propriedade física relacionada ao acabamento superficial de um material. Materiais com acabamento em metal polido possuem baixa emissividade, com valores abaixo de 0,2, todos os outros tipos de acabamento resultam em emissividades variando de 0,8 a 0,9. Materiais com alta emissividade emitem mais calor por radiação e, portanto, esfriam mais rapidamente. Materiais com baixa emissividade provocam menos desconforto térmico por radiação nas suas proximidades. No caso dos vidros qualquer especificação que não tenha revestimento metálico em uma de suas faces irá apresentar emissividade entre 0,8 e 0,9. Vidros de controle solar podem ter uma das faces com revestimento metálico reduzindo o valor da emissividade. São os vidros denominados *Low-e* (*low emissivity*). Dependendo da posição da superfície *Low-e* o vidro pode contribuir para reduzir o ganho de calor solar em um clima quente, ou evitar a perda de calor do ambiente interno em um clima frio.

Um exemplo da aplicação de vidro *Low-e* em uma composição insulada é apresentado na Figura G.6.

Figura G.6: Composição insulada com vidro *Low-e* na face 2



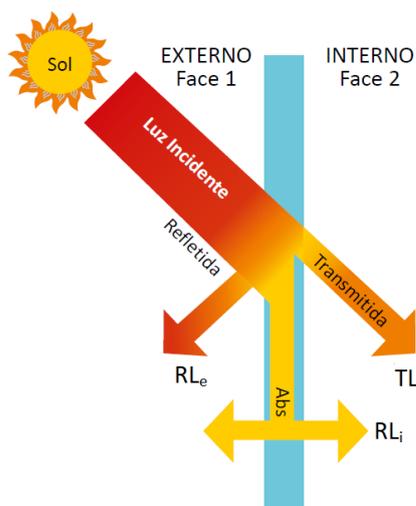
Fonte: Westphal (2016).

O vidro *Low-e* na composição insulada apresentada na Figura G.6 irá proporcionar menor ganho de calor por radiação do exterior para o interior da câmara de ar. Em um clima no qual ocorrem temperaturas elevadas em grande parte do ano esse menor ganho de calor do ambiente externo poderá proporcionar economia com energia de climatização do ambiente interno. Para climas com temperaturas muito baixas a montagem invertida da composição insulada apresentada na Figura G.6 poderá reduzir as perdas de calor do ambiente interno, essa aplicação é comumente encontrada em países europeus (Westphal, 2016).

G.10 – Definição de propriedades luminosas do vidro

De acordo com Westphal (2016), a radiação solar é composta por radiação visível (47%), radiação infravermelha (51%) e radiação ultravioleta (2%). Quando há incidência de um fluxo luminoso numa superfície de vidro haverá uma parcela de luz transmitida, uma parcela absorvida e outra refletida, conforme apresentado na Figura G.7.

Figura G.7: Parcelas transmitida, absorvida e refletida da luz visível incidente sobre uma superfície de vidro



Fonte: Westphal (2016).

A consideração das variáveis apresentadas na Figura G.7 é importante para um bom aproveitamento da iluminação natural. De acordo com Westphal (2016), a NBR 16023 define as propriedades luminosas dos vidros de controle solar conforme apresentado no Quadro G.2

Quadro F.2: Definição das propriedades luminosas do vidro

Transmissão luminosa (TL)	Fração da luz incidente transmitida pelo vidro
Reflexão luminosa externa (RL_e)	Fração da luz incidente refletida para o lado externo
Reflexão luminosa interna (RL_i)	Fração da luz incidente refletida para o lado interno

Fonte: Westphal (2016).

Dependendo do tipo de vidro e de seu revestimento de controle solar, o nível de transmissão luminosa pode ser combinado a diferentes níveis de fator solar, podendo-se chegar a composições muito transparentes e com pouca transmissão de calor.

G.11 – Índice de seletividade do vidro

Os vidros mais escuros possuem fator solar menor, uma vez que há menor transmissão de radiação solar para o ambiente interior. Porém, um vidro mais escuro tem a tendência de ficar mais quente quando exposto ao sol. Isso pode causar desconforto devido a emissão da radiação absorvida. A combinação mais difícil de ser conseguida e provavelmente a mais adequada para edificações em clima tropical, seria aquela com boa transmissão luminosa e baixo fator solar. A razão entre a transmissão luminosa e o fator solar é definida como índice de seletividade (IS), conforme apresentado na equação G.1.

$$IS = \frac{TL}{FS} \quad (G.1)$$

Em que:

IS : Índice de seletividade

TL : Transmissão luminosa

FS : Fator solar

Quanto maior o índice de seletividade mais eficiente é o vidro no aproveitamento da luz natural.

G.12 – Propriedades térmicas e luminosas de vidros fabricados no Brasil

Os Quadros G.3, G.4 e G.5 apresentam as propriedades térmicas e luminosas de vidros de proteção solar *Cool-Lite* fabricados pela Cebrace. Os vidros *Cool-Lite* são divididos em três linhas: SK, K e S. Essas linhas possuem vidros com altos valores de índice de seletividade, o que permite a passagem de luz reduzindo a transferência de calor e raios UV.

Quadro G.3: Propriedades térmicas da linha SK de vidros de proteção solar da Cebrace

Linha	Produtos		Aspecto Externo	Tipo de Vidro (Laminado ou Insulado)	Fatores Luminosos			Transmissão Energética				Transmissão Térmica Valor UW/m ² k	Seletividade
					Transmissão Luminosa %	Reflexão Luminosa Externa %	Reflexão Luminosa Interna %	Transmissão Energética %	Absorção Energética %	Fator Solar	Coefficiente de Sombreamento		
Linha SK - Proteção Solar Super Seletivo	Cool Lite SKN	154	Neutral	Dados em vidro Laminado	50	24	26	24	38	0,33	0,38	5,6	1,52
				Dados em vidro Insulado	49	18	22	23	46	0,27	0,31	1,5	1,81
		165	Neutral	Dados em vidro Laminado	56	20	21	28	39	0,38	0,43	5,6	1,47
				Dados em vidro Insulado	58	16	17	29	40	0,33	0,38	1,5	1,76
	Cool Lite SKNT (SKN Temperável)	144	Neutral	Dados em vidro Laminado	40	20	12	19	49	0,30	0,35	5,6	1,33
				Dados em vidro Insulado	39	20	12	19	52	0,23	0,27	1,6	1,70
		154	Neutral	Dados em vidro Laminado	50	24	26	24	38	0,33	0,38	5,6	1,52
				Dados em vidro Insulado	49	18	25	23	47	0,27	0,31	1,5	1,81
	165	Neutral	Dados em vidro Laminado	56	20	21	28	39	0,38	0,43	5,6	1,47	
			Dados em vidro Insulado	59	16	17	29	44	0,33	0,38	1,5	1,79	

Fonte: Cebrace (2015).

Quadro G.4: Propriedades térmicas da linha K de vidros de proteção solar da Cebrace

Linha	Produtos		Aspecto Externo	Tipo de Vidro (Laminado ou Insulado)	Fatores Luminosos			Transmissão Energética				Transmissão Térmica Valor UW/m ² k	Seletividade
					Transmissão Luminosa %	Reflexão Luminosa Externa %	Reflexão Luminosa Interna %	Transmissão Energética %	Absorção Energética %	Fator Solar	Coefficiente de Sombreamento		
Linha K - Proteção Solar Seletivo	Cool Lite KNT	140	Neutral	Dados em vidro Laminado	34	23	18	22	51	0,34	0,39	5,6	1,00
				Dados em vidro Insulado	36	23	12	22	55	0,28	0,32	1,8	1,29
		155	Neutral	Dados em vidro Laminado	46	17	11	31	48	0,42	0,49	5,6	1,10
				Dados em vidro Insulado	46	17	10	30	52	0,36	0,42	1,9	1,28
		164	Neutral	Dados em vidro Laminado	58	12	8	40	43	0,50	0,58	5,6	1,16
				Dados em vidro Insulado	56	14	10	38	47	0,45	0,52	1,9	1,24
		440	Green	Dados em vidro Laminado	30	20	18	17	68	0,33	0,38	5,6	0,91
				Dados em vidro Insulado	31	18	12	16	72	0,22	0,25	1,8	1,41
		455	Green	Dados em vidro Laminado	41	14	11	23	65	0,39	0,44	5,6	1,05
				Dados em vidro Insulado	40	14	10	20	70	0,27	0,31	1,9	1,48
		464	Neutral	Dados em vidro Laminado	53	10	8	30	60	0,44	0,51	5,6	1,20
				Dados em vidro Insulado	48	11	9	25	66	0,32	0,37	1,9	1,50
	Cool Lite KBT	140	Blue	Dados em vidro Laminado	33	27	21	24	52	0,36	0,41	5,6	0,92
				Dados em vidro Insulado	35	24	17	23	57	0,29	0,33	1,8	1,21
	Cool Lite KS	133	Super Silver	Dados em vidro Laminado	33	33	16	22	44	0,32	0,37	5,6	1,03
				Dados em vidro Insulado	34	33	12	23	46	0,27	0,31	1,4	1,26

Fonte: Cebrace (2015).

Quadro G.5: Propriedades térmicas da linha S de vidros de proteção solar da Cebrace

Linha	Produtos	Aspecto Externo	Tipo de Vidro (Laminado ou Insulado)	Fatores Luminosos			Transmissão Energética				Transmissão Térmica Valor UW/m ² k	Seletividade
				Transmissão Luminosa %	Reflexão Luminosa Externa %	Reflexão Luminosa Interna %	Transmissão Energética %	Absorção Energética %	Fator Solar	Coefficiente de Sombreamento		
Linha S - Proteção Solar	Cool Lite ST	120 Silver	Dados em vidro Laminado	21	30	22	17	57	0,30	0,35	5,6	0,70
			Dados em vidro Insulado	18	32	29	13	62	0,21	0,24	2,6	0,86
		136 Silver Grey	Dados em vidro Laminado	38	19	12	30	54	0,42	0,49	5,6	0,90
			Dados em vidro Insulado	33	23	22	25	56	0,33	0,38	2,7	1,00
		420 Green	Dados em vidro Laminado	19	25	22	12	72	0,29	0,33	5,6	0,66
			Dados em vidro Insulado	15	25	29	9	77	0,17	0,20	2,6	0,88
	436 Green	Dados em vidro Laminado	34	17	12	22	67	0,37	0,43	5,6	0,92	
		Dados em vidro Insulado	28	18	22	16	73	0,25	0,29	2,7	1,12	
	467 Light Green	Dados em vidro Laminado	63	12	11	41	51	0,53	0,61	5,6	1,19	
		Dados em vidro Insulado	50	18	23	30	59	0,39	0,44	2,8	1,28	
	Cool Lite STB	120 Blue	Dados em vidro Laminado	22	21	24	17	64	0,33	0,38	5,6	0,67
			Dados em vidro Insulado	20	21	31	15	67	0,23	0,26	2,7	0,87
		136 Blue	Dados em vidro Laminado	35	18	14	29	58	0,42	0,48	5,6	0,83
			Dados em vidro Insulado	32	18	21	24	61	0,33	0,38	2,7	0,97
		420 Blue Green	Dados em vidro Laminado	20	18	24	13	75	0,30	0,35	5,6	0,67
			Dados em vidro Insulado	17	17	31	9	79	0,18	0,21	2,7	0,94
	436 Blue Green	Dados em vidro Laminado	32	15	13	20	69	0,37	0,42	5,6	0,86	
		Dados em vidro Insulado	27	15	21	16	75	0,25	0,28	2,7	1,08	
	Cool Lite SPN	114 Silver Neutral	Dados em vidro Laminado	15	33	33	12	58	0,25	0,29	5,6	0,60

Fonte: Cebrace (2015).

Nos Quadros G.3, G.4 e G.5, os vidros laminados são compostos por duas folhas de vidro de 4 mm de espessura cada uma mais uma camada de PVB incolor de 0,38 mm e revestimento na face 2. Os vidros insulados são compostos por duas folhas de vidro de 6mm de espessura cada uma mais uma câmara de ar de 12 mm e revestimento na face 2.

As Tabelas G.1 e G.2 apresentam propriedades térmicas e luminosas de vidros produzidos pelos fabricantes Cebrace e Guardian

Tabela G.1: Propriedades térmicas e luminosas de vidros monolíticos produzidos pela

Cebpace

Fabricante	Produto	Espessura (mm)	TL	FS	U (W/m ² .K)	IS
CEBRACE	COOL-LITE ST 120 6 mm	6	0,20	0,32	5,23	0,63
CEBRACE	COOL-LITE ST 136 6 mm	6	0,37	0,46	5,57	0,80
CEBRACE	COOL-LITE ST 420 6 mm	6	0,16	0,31	5,23	0,52
CEBRACE	COOL-LITE STB 120 6 mm	6	0,22	0,36	5,30	0,61
CEBRACE	COOL-LITE STB 136 6 mm	6	0,36	0,46	5,48	0,78
CEBRACE	COOL-LITE STB 420 8 mm	8	0,17	0,32	5,25	0,53
CEBRACE	BRONZE 6 mm	6	0,49	0,63	5,79	0,78
CEBRACE	VERDE 6 mm	6	0,73	0,57	5,79	1,28
CEBRACE	CINZA 6 mm	6	0,43	0,61	5,79	0,70
CEBRACE	COOL-LITE KBT 140 6mm	6	0,4	0,36	3,52	1,11
CEBRACE	COOL-LITE KNT 140 6mm	6	0,41	0,34	3,48	1,21
CEBRACE	COOL-LITE KNT 155 6mm	6	0,53	0,43	3,64	1,23
CEBRACE	COOL-LITE SKN 144 II 6mm	6	0,45	0,27	3,22	1,67
CEBRACE	COOL-LITE SKN 154 6mm	6	0,55	0,29	3,14	1,90
CEBRACE	COOL-LITE SKN 165 6mm	6	0,67	0,35	3,22	1,91
CEBRACE	COOL-LITE SKN 174 6mm	6	0,76	0,43	3,22	1,77
CEBRACE	COOL-LITE ST 120 6mm	6	0,2	0,32	5,23	0,63
CEBRACE	COOL-LITE ST 136 6mm	6	0,37	0,46	5,57	0,80
CEBRACE	COOL-LITE ST 420 6mm	6	0,16	0,31	5,23	0,52
CEBRACE	COOL-LITE STB 120 6mm	6	0,22	0,36	5,30	0,61
CEBRACE	COOL-LITE STB 136 6mm	6	0,36	0,46	5,48	0,78
CEBRACE	COOL-LITE STB 420 8mm	8	0,17	0,32	5,25	0,53
CEBRACE	PARSOL BRONZE 6mm	6	0,49	0,63	5,79	0,78
CEBRACE	PARSOL GREEN 6mm	6	0,73	0,57	5,79	1,28
CEBRACE	PARSOL GREY 6mm	6	0,43	0,61	5,79	0,70

Fonte: Adaptado de Westphal (2016).

Tabela G.2: Propriedades térmicas e luminosas de vidros monolíticos produzidos pela

Guardian

Fabricante	Produto	Espessura (mm)	TL	FS	U (W/m ² .K)	IS
GUARDIAN	Neutral 14 green	4	0,12	0,21	4,27	0,57
GUARDIAN	Reflect Guardian clear	4	0,25	0,44	5,76	0,57
GUARDIAN	Reflect Guardian clear	6	0,25	0,43	5,70	0,58
GUARDIAN	Neutral 14 green	6	0,12	0,21	4,23	0,57
GUARDIAN	Reflect Guardian green	4	0,22	0,35	5,76	0,63
GUARDIAN	Neutral 14 clear	4	0,14	0,22	4,27	0,64
GUARDIAN	Neutral 14 clear	6	0,14	0,22	4,24	0,64
GUARDIAN	Reflect Guardian green	6	0,21	0,32	5,69	0,66
GUARDIAN	Silver 20 green	6	0,17	0,25	4,87	0,68
GUARDIAN	Silver 20 green	4	0,18	0,26	4,92	0,69
GUARDIAN	Royal Blue 20 clear	6	0,21	0,30	4,84	0,70
GUARDIAN	Silver 20 clear	4	0,20	0,29	4,92	0,69
GUARDIAN	Silver 20 clear	6	0,20	0,28	4,88	0,71
GUARDIAN	Royal Blue 20 clear	4	0,22	0,30	4,88	0,73
GUARDIAN	Silver 32 clear	4	0,32	0,40	5,28	0,80
GUARDIAN	Silver 32 clear	6	0,32	0,40	5,23	0,80
GUARDIAN	Silver 32 green	4	0,28	0,34	5,28	0,82
GUARDIAN	Silver 32 green	6	0,27	0,32	5,23	0,84
GUARDIAN	Light Blue 52 clear	4	0,52	0,58	5,61	0,90
GUARDIAN	Light Blue 52 clear	6	0,52	0,57	5,56	0,91
GUARDIAN	Light Blue 52 green	4	0,46	0,46	5,61	1,00
GUARDIAN	Light Blue 52 green	6	0,43	0,42	5,55	1,02

Fonte: Adaptado de Westphal (2016).

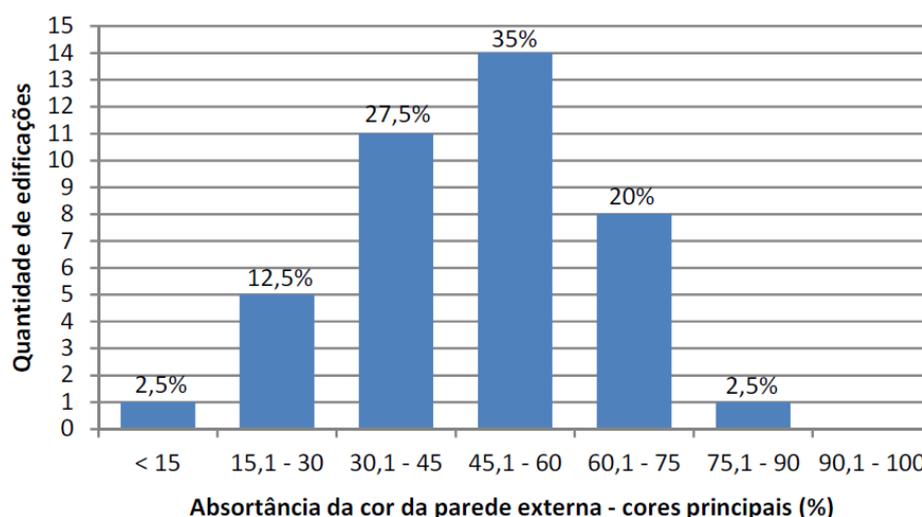
APÊNDICE H – Valores de absorvância de pinturas empregadas em paredes externas

Neste apêndice são apresentados alguns estudos realizados sobre características de pinturas de paredes externas, envelhecimento da pintura e absorvâncias solares de cores de algumas tintas fabricadas no Brasil.

H.1 – Valores típicos de absorvâncias de pinturas de paredes externas

Mendonça (2014) estudou as características de edifícios históricos da cidade de Florianópolis e demonstrou que a maior parte dos edifícios apresentam cores de paredes externas com absorvâncias entre 45% e 60%, conforme pode ser observado na Figura H.1.

Figura H.1: Frequência da ocorrência de absorvâncias de cor de paredes externas em edifícios históricos de Florianópolis



Fonte: Mendonça (2014).

Conforme pode ser observado na Figura H.1 a maior frequência de ocorrência ocorre na faixa de absorvância de 45 a 60%. A absorvância média da distribuição apresentada na Figura H.1 é de 47,4%.

H.2 – Envelhecimento da pintura e redução da refletância

Silva (2017) estudou o efeito do envelhecimento de pinturas sobre a refletância de radiação solar para amostras expostas às condições climáticas das cidades de São Paulo, Ubatuba e Pirassununga. Para efeito da presente dissertação são úteis os resultados encontrados para as cidades de São Paulo e Pirassununga, para as cores branco e cinza, os quais são apresentados nos Quadros H.1 e H.2.

Quadro E.1: Resultados de envelhecimento em pinturas brancas

Acabamento	São Paulo	0	1	2	3	Após Lavagem	Redução 3° ano	Recuperação pós lav.
Acetinado	Pintura branca	82%	69%	68%	69%	75%	13%	92%
Fosco		83%	70%	69%	68%	75%	15%	90%
Acabamento	Pirassununga	0	1	2	3	Após lavagem	Redução 3° ano	Recuperação pós lav.
Acetinado	Pintura branca	82%	74%	68%	69%	78%	13%	95%
Fosco		83%	72%	68%	68%	78%	15%	94%

Fonte: Silva (2017).

Quadro H.2: Resultados de envelhecimento em pinturas cinzas

Acabamento	Site	Tempo (anos)					Após Lavagem	Avaliação	
		0	1	2	3	Perda em 3 anos		Recuperação pós lav.	
Acetinado	São Paulo	70%	56%	54%	55%	61%	15%	87%	
Fosco	São Paulo	70%	60%	57%	58%	64%	12%	91%	
Acetinado	Pirassununga	57%	50%	48%	48%	53%	9%	93%	
Fosco	Pirassununga	56%	47%	45%	45%	49%	11%	88%	
Acabamento	Pirassununga	0	1	2	3	Após Lavagem	Perda em 3 anos	Recuperação pós lav.	
Acetinado	Pintura cinza "fria"	70%	55%	54%	58%	62%	12%	89%	
Fosco	Pintura cinza "fria"	70%	53%	57%	59%	65%	11%	92%	
Acetinado	Pintura cinza (Convencional)	57%	47%	47%	49%	53%	8%	92%	
Fosco	Pintura cinza (Convencional)	56%	41%	44%	48%	50%	8%	90%	

Fonte: Silva (2017).

Considerando os valores apresentados nos Quadros H.1 e H.2, optou-se pela escolha do maior valor de redução da refletância como referência, assim o valor a ser considerado neste trabalho será a redução de 15% na refletância da pintura. Silva (2017) destaca, também, em seu trabalho que a redução de 15% na refletância de algumas pinturas é atingida em um tempo aproximado de dois a três anos de exposição às condições climáticas.

H.3 – Valores de absorvâncias de algumas tintas fabricadas no Brasil

Os Quadros H.3 e H.4 apresentam valores de absorvância de algumas tintas fabricadas no Brasil

Quadro H.3: Valores de absorvâncias de tintas metalatex acrílica fosca

Nome comercial	Absorvância ajustada ao espectro solar padrão (%)
Amarelo antigo	51,4
Amarelo Terra	64,3
Areia	44,9
Azul	73,3
Azul imperial	66,9
Branco	15,8
Branco gelo	37,2
Camurça	57,4
Concreto	74,5
Flamingo	49,5
Jade	52,3
Marfim	33,6
Palha	36,7
Pérola	33,0
Pêssego	42,8
Tabaco	78,1
Terracota	64,6

Fonte: Adaptado de Dornelles (2008).

Quadro H.4: Valores de absorções de tintas suvinil acrílica fosca

Nome comercial	Absorção ajustada ao espectro solar padrão (%)
Alecrim	64,0
Azul bali	48,9
Branco neve	10,2
Branco gelo	29,7
Camurça	55,8
Branco	15,8
Branco gelo	37,2
Camurça	57,4
Concreto	71,5
Marfim	26,7
Marrocos	52,3
Mel	41,8
Palha	27,2
Pérola	22,1
Pêssego	35,0
Telha	70,8
Vanila	23,9

Fonte: Adaptado de Dornelles (2008).

APÊNDICE I – Cálculo das áreas equivalentes de sistema de pisos e paredes internas que devem ser declaradas como massa interna no *EnergyPlus*

Considerando as áreas dos ambientes da planta baixa do pavimento tipo (Figura 15) e dos ambientes da planta baixa de zoneamento térmico (Figura 17) pode-se calcular as grandezas apresentadas nos Quadros I.1 e I.2.

Quadro I.1: Cálculo do comprimento de paredes equivalentes internas a declarar como massa interna para cada zona térmica

Variável	Comprimento (m)
Parede interior da planta baixa do pavimento tipo	184,04
Parede interior da planta baixa do zoneamento térmico	94,88
Parede interna a inserir em cada apartamento na planta baixa do zoneamento térmico	22,29
Parede do perímetro de cada suíte dos apartamentos superiores da planta baixa do pavimento tipo	9,06
Parede interna de cada suíte dos apartamentos superiores da planta baixa do pavimento tipo	2,08
Total de paredes de cada suíte dos apartamentos superiores da planta baixa do pavimento tipo	11,14
Parede do perímetro de cada suíte da planta baixa do zoneamento térmico (Zonas 2, 4, 6 e 8)	8,28
Parede equivalente a inserir nas zonas térmicas correspondentes às suítes de cada apartamento (zonas 2, 4, 6 e 8)	2,86
Parede equivalente a inserir nas zonas térmicas ímpares a e b	19,43

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro I.2: Cálculo das áreas de sistema de pisos a serem consideradas e descontadas para os apartamentos

Variável	Área (m ²)
Área de piso em cada apartamento superior da planta baixa do pavimento tipo	97,74
Área de piso em cada apartamento inferior da planta baixa do pavimento tipo	97,60
Área de piso das escadas (consideradas como laje maciça)	14,64
Área de piso do hall	10,03
Área de piso em cada apartamento da planta de zoneamento térmico	100,70
Área da escada e hall	24,67
Área dos apartamentos inferiores, escada e hall da planta do pavimento tipo	220,40
Área dos apartamentos inferiores da planta de zoneamento térmico	201,40
Área de pisos a adicionar para cada apartamento inferior	9,50
Área de piso a desconsiderar para cada apartamento superior	2,96

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na seção 5.4.5 foi discutida a necessidade de se fazer um cálculo de equivalência, em termos de massa de armazenamento de energia térmica, entre paredes internas e sistema de pisos.

Desprezando a condução de calor pela área adicional do sistema de pisos correspondente à área do fosso do elevador e incluída na planta baixa do zoneamento térmico (Figura 17), ou seja, considerando essa área como superfície de armazenamento de calor, a equivalência, para fins de declaração como massa de armazenamento de energia térmica, é assegurada se ambas as superfícies trocam a mesma quantidade de calor para a mesma variação de temperatura (ΔT). A equação (I.1) demonstra o requisito para a equivalência em termos de massa de armazenamento de energia térmica entre as paredes internas e o sistema de pisos.

$$Q = m_{\text{par}} \cdot c_{\text{par}} \cdot \Delta T = m_{\text{pis}} \cdot c_{\text{pis}} \cdot \Delta T \quad (\text{I.1})$$

Em que:

m_{par} : Massa da parede interna

c_{par} : Calor específico da parede interna

m_{pis} : Massa do sistema de pisos

c_{pis} : Calor específico do sistema de pisos

Logo, a massa equivalente de parede que corresponde à massa do sistema de pisos para fins de armazenamento de energia térmica é dada pela equação (I.2)

$$m_{\text{par}} = \frac{c_{\text{pis}}}{c_{\text{par}}} \cdot m_{\text{pis}} \quad (\text{I.2})$$

Como o sistema de pisos é composto por várias camadas de materiais diferentes é necessário calcular seu calor específico médio (c_{pis}). O Quadro I.3 apresenta as propriedades das camadas do sistema de pisos necessárias para a determinação do calor específico médio.

Quadro I.3: Cálculo do calor específico médio do sistema de pisos

Material	Sigla utilizada na equação (I.3)	ρ (kg/m ³)	c (kJ/kg.k)	e (m)	V (m ³)	m (kg)
Placa cerâmica	pc	1950	0,76	0,007	0,021	40,4
Cimento cola	cc	1350	0,84	0,010	0,029	40,0
Argamassa comum	ac	1950	1,00	0,020	0,059	115,4
Manta asfáltica	ma	2300	0,92	0,003	0,008	20,4
Concreto armado	ca	2500	1,00	0,100	0,296	740,0
Gesso	g	875	0,84	0,010	0,029	25,9

Nota: O volume (V) foi calculado para a área de 2,96 m² (Quadro I.2) de sistema de pisos que deve ser descontada na planta baixa do zoneamento térmico.

Fonte: Elaborado pelo autor.

O calor específico médio do sistema de pisos (c_{pis}) pode ser calculado empregando-se a equação (I.3).

$$c_{\text{pis}} = \frac{m_{\text{pc}}c_{\text{pc}} + m_{\text{cc}}c_{\text{cc}} + m_{\text{ac}}c_{\text{ac}} + m_{\text{ma}}c_{\text{ma}} + m_{\text{ca}}c_{\text{ca}} + m_{\text{g}}c_{\text{g}}}{m_{\text{pc}} + m_{\text{cc}} + m_{\text{ac}} + m_{\text{ma}} + m_{\text{ca}} + m_{\text{g}}} \quad (\text{I.3})$$

Substituindo os valores apresentados no Quadro I.3 na equação (I.3) conclui-se que o calor específico médio para o sistema de pisos apresenta o valor de 0,977 kJ/kg.K. Esse valor é praticamente igual ao valor do calor específico médio encontrado para as paredes (Apêndice D). Logo, a partir da equação (I.2) se conclui que a massa de paredes internas que é equivalente à massa de 2,96 m² do sistema de pisos é numericamente idêntica à massa total de todos os componentes do sistema de pisos dado no Quadro (I.3), ou seja, aproximadamente 982,13 kg.

A área de parede interna equivalente a $2,96 \text{ m}^2$ de área do sistema de pisos pode ser calculada pela equação (I.4)

$$A_{\text{par}} = \frac{m_{\text{par}}}{\rho_{\text{par}} e_{\text{par}}} \quad (\text{I.4})$$

Em que:

m_{par} : Massa da parede equivalente à $2,96 \text{ m}^2$ de área de sistema de pisos

ρ_{par} : Massa específica média da parede

e_{par} : Espessura da parede

Substituindo $m_{\text{par}} = 982,13 \text{ kg}$, $\rho_{\text{par}} = 1196 \text{ kg/m}^3$ (Apêndice D) e $e_{\text{par}} = 0,14 \text{ m}$ (Apêndice D) na equação (I.4) se conclui que a área de parede interna equivalente à $2,96 \text{ m}^2$ de área de sistema de pisos é de, aproximadamente, $5,87 \text{ m}^2$.

A partir dos resultados apresentados no Quadro I.1, e considerando o pé direito dos apartamentos como sendo de $2,8 \text{ m}$, pode-se determinar as áreas de paredes que devem ser inseridas em cada apartamento da planta baixa de zoneamento térmico, conforme apresentado no Quadro I.4.

Quadro I.4: Áreas de paredes internas a serem declaradas para as zonas térmicas da planta baixa de zoneamento térmico (Figura 17)

Zonas	Área (m^2)
Pares	8,01
Ímpares	54,41

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para as zonas ímpares superiores (Zonas 3a, 3b, 5a e 5b) da planta baixa de zoneamento térmico (Figura 17) deve ser descontada uma área de piso igual a $2,96 \text{ m}^2$ (Quadro I.2), ou $5,87 \text{ m}^2$ de área de parede interna equivalente. Já para as zonas ímpares inferiores (Zonas 1a, 1b, 7a e 7b) da planta baixa de zoneamento térmico (Figura 17) deve ser adicionada uma área de parede interna equivalente a $9,50 \text{ m}^2$ de área de piso, conforme Quadro I.2. A declaração de áreas de paredes equivalentes internas, para efeito de massa térmica, foi realizada de modo proporcional às áreas das zonas térmicas ímpares, as quais são: $57,09 \text{ m}^2$ para as zonas

ímpares “a” (1a, 3a, 5a e 7a) e 22,88 m² para as zonas ímpares “b” (1b, 3b, 5b e 7b). O Quadro I.5 apresenta os resultados encontrados.

Quadro I.5: Áreas equivalentes de paredes internas a serem declaradas como massa térmica nas simulações

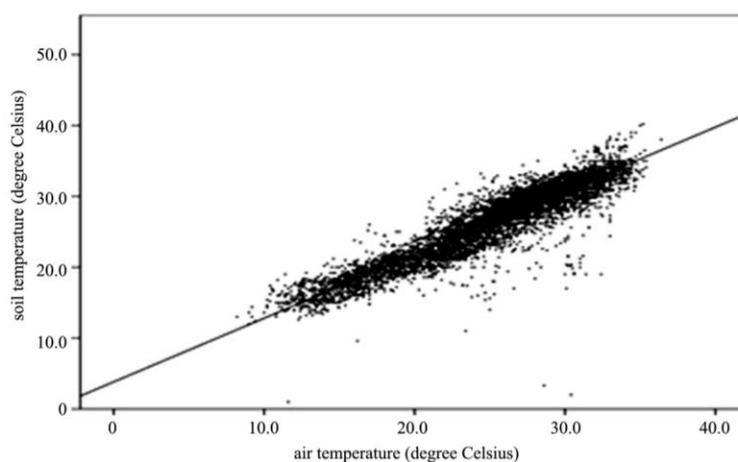
Variável	Cálculos (m ²)
Área de paredes equivalentes para as zonas ímpares superiores (3a, 3b, 5a e 5b)	$54,41 - 5,87 = 48,54$
Área de paredes equivalentes para as zonas ímpares inferiores (1a, 1b, 7a e 7b)	$(9,5/2,96).5,87 + 54,40 = 73,23$
Área de parede equivalente a ser declarada para as zonas “a” superiores (3a e 5a)	$[57,09/(22,88+57,09)].48,54 = 34,65$
Área de parede equivalente a ser declarada para as zonas “a” inferiores (1a e 7a)	$[57,09/(22,88+57,09)].73,23 = 52,28$
Área de parede equivalente a ser declarada para as zonas “b” superiores (3b e 5b)	$[22,88/(22,88+57,09)].48,54 = 13,89$
Área de parede equivalente a ser declarada para as zonas “b” inferiores (1b e 7b)	$[22,88/(22,88+57,09)].73,23 = 20,95$

Fonte: Elaborado pelo autor.

APÊNDICE J – Determinação da temperatura média do solo para um ano meteorológico típico da cidade de Taubaté

Alguns autores realizaram estudos de correlação entre a temperatura do solo e a temperatura do ar, dentre eles, Islam *et al.* (2015) encontrou correlações lineares entre a temperatura do solo e do ar na cidade de Dhaka, capital de Bangladesh, a partir da análise de 10 anos de dados. As funções de correlação linear encontradas variam de acordo com a profundidade de medição das temperaturas no solo. Para a profundidade de 5 cm o resultado encontrado pelos autores é apresentado na Figura J.1.

Figura J.1: Correlação entre a temperatura do solo e do ar a uma profundidade de 5 cm para a cidade de Dhaka



Fonte: Islam *et al.* (2015)

A função de regressão encontrada pelos autores é apresentada na equação (J.1).

$$T_s = 3,83 + 0,9.T_a \quad (J.1)$$

Em que:

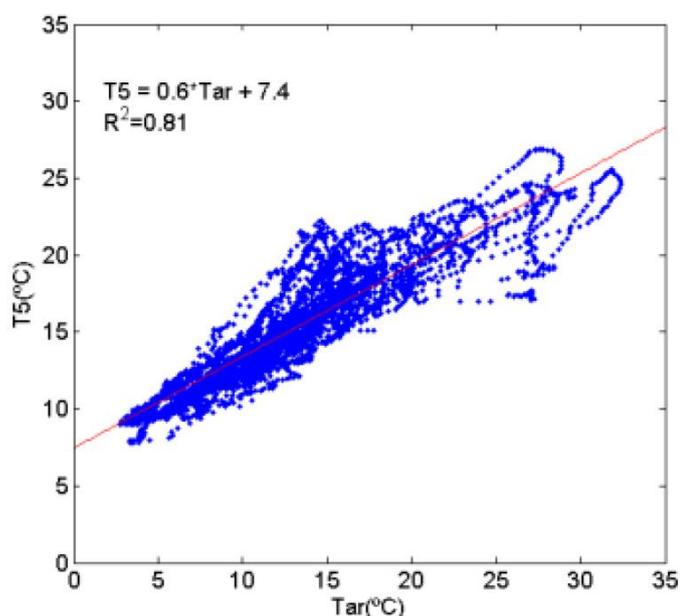
T_s : Temperatura do solo

T_a : Temperatura do ar

Sena *et al.* (2013) realizaram estudos de correlação entre a temperatura do solo e do ar em um sítio experimental de cultivo de arroz irrigado localizado na cidade de Paraíso do Sul (RS). A temperatura do solo foi medida a 5 cm de profundidade empregando um sensor

STP01 *Soil Temperature Profile* e a temperatura do ar foi medida a 10 m de altura empregando-se um sensor de temperatura e umidade HMP – 45. O ajuste linear entre a temperatura do solo e a temperatura do ar foi obtida para o período de um mês de dados. O resultado encontrado pelos autores é apresentado na Figura J.2

Figura J.2: Correlação entre a temperatura do solo e do ar a uma profundidade de 5 cm para a cidade de Paraíso do Sul



Fonte: Sena *et al.* (2013).

A função linear de regressão encontrada pelos autores é apresentada na equação (J.2)

$$T_s = 7,4 + 0,6.T_a \quad (J.2)$$

Em que:

T_s : Temperatura do solo

T_a : Temperatura do ar

Utilizando-se os valores de temperatura média do ar dadas na Figura 7 da seção 5.3.1 e aplicando-se as equações (J.1) e (J.2) se obteve estimativas das temperaturas médias do solo para um ano meteorológico típico da cidade de Taubaté. Os resultados são apresentados na Tabela J.1.

Tabela J.1: Estimativas da temperatura do solo para um ano meteorológico típico da cidade de Taubaté

mês	equação (J.1) (°C)	equação (J.2) (°C)
janeiro	25,25	21,68
fevereiro	25,34	21,74
março	24,53	21,20
abril	23,09	20,24
maio	20,12	18,26
junho	18,68	17,30
julho	18,59	17,24
agosto	19,85	18,08
setembro	21,47	19,16
outubro	23,18	20,30
novembro	23,90	20,78
dezembro	24,80	21,38

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados de INMET (2019a), Sena *et al.* (2013) e Islam *et al.* (2015).

Da Tabela J.1 pode-se observar que há uma diferença significativa entre os resultados, na fase de ajuste do modelo de base do edifício residencial foi utilizado o conjunto de valores previstos pela equação (J.1), pois estes conduziram ao melhor ajuste.

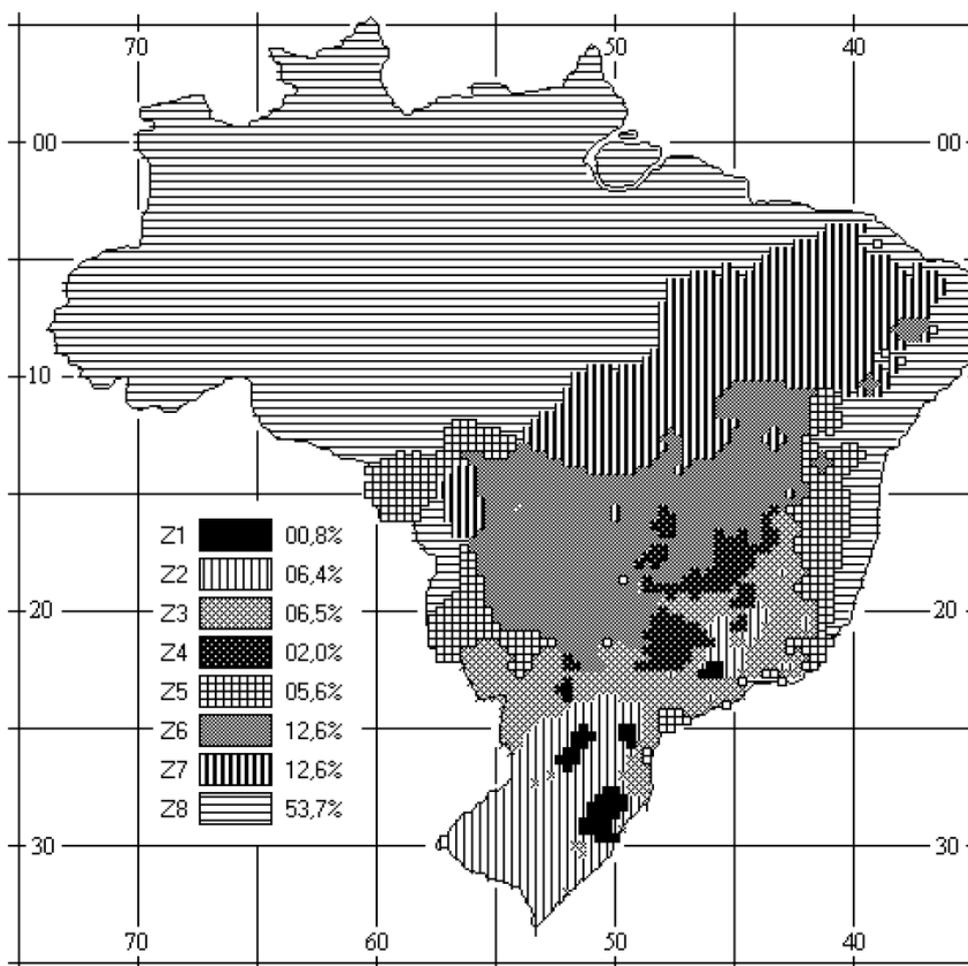
APÊNDICE K – Determinação da carta bioclimática para a cidade de Taubaté

Neste apêndice é definida a classificação bioclimática da cidade de Taubaté e, também, as recomendações da norma NBR 15220 (ABNT, 2003) para a aplicação de estratégias de projeto passivo.

K.1 – Classificação bioclimática para a cidade de Taubaté

A Figura K.1 apresenta o zoneamento bioclimático brasileiro conforme proposto na norma NBR 15220 (ABNT, 2003). Por meio da latitude e longitude da cidade de Taubaté, as quais são, respectivamente, $-23,03^\circ$ e $-45,6^\circ$ pode-se concluir que Taubaté pertence a zona bioclimática Z3 (Figura K.1).

Figura K.1: Zoneamento bioclimático brasileiro

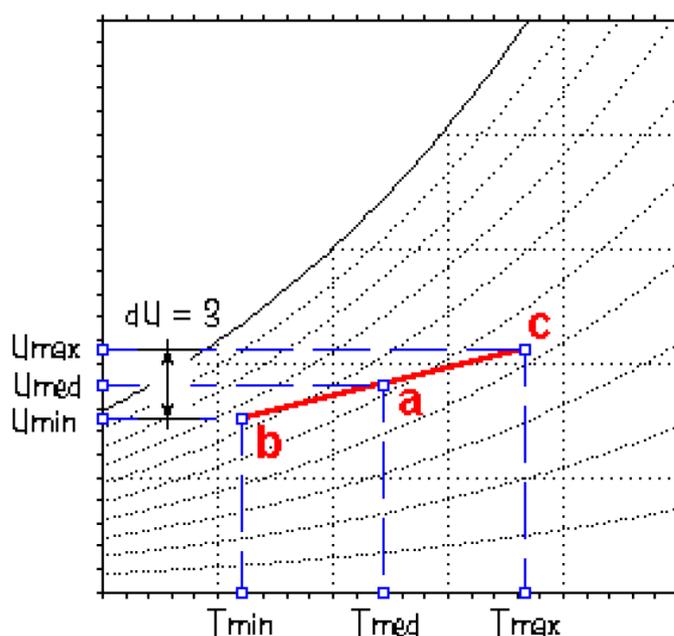


Fonte: ABNT (2003).

K.2 – Definição de estratégias bioclimáticas para a cidade de Taubaté

A norma NBR 15220 (ABNT, 2003) define um método para selecionar estratégias bioclimáticas para uma determinada região a partir da entrada de dados de temperatura de bulbo seco e umidade do ar em uma carta bioclimática. O método consiste em marcar pontos de temperaturas médias mínimas e máximas em uma carta de Givoni (adaptada às condições bioclimáticas brasileiras), juntamente com os respectivos valores de umidades médias mínimas e máximas, conforme pode ser observado na Figura K.2.

Figura K.2: Determinação da linha abc em uma carta bioclimática



Fonte: ABNT (2003).

Na Figura K.2 as variáveis são definidas da seguinte forma:

T_{\min} : Temperatura média dos valores mínimos de temperatura mensal

T_{\max} : Temperatura média dos valores máximos de temperatura mensal

$T_{\text{méd}}$: Média aritmética de T_{\min} e T_{\max}

U_{\min} : Umidade específica do ar correspondente à temperatura T_{\min}

U_{\max} : Umidade específica do ar correspondente à temperatura T_{\max}

U_{med} : Média mensal da umidade específica do ar

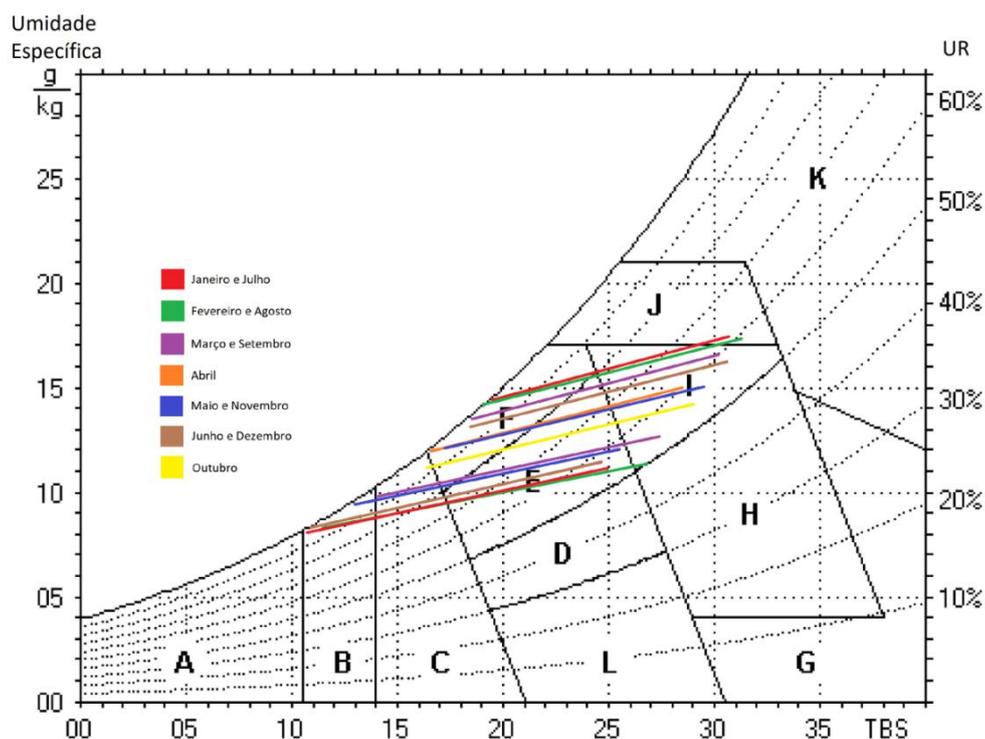
O cálculo dos valores U_{\min} e U_{\max} é realizado por meio da aplicação das equações (K.1) e (K.2).

$$U_{\min} = U_{\text{méd}} - 1,5 \text{ (g de vapor/kg de ar seco)} \quad (\text{K.1})$$

$$U_{\max} = U_{\text{méd}} + 1,5 \text{ (g de vapor/kg de ar seco)} \quad (\text{K.2})$$

A partir dos dados climáticos da cidade de Taubaté (seção 5.3.1) foi possível desenhar as linhas abc (Figura K.2) em uma carta bioclimática conforme apresentado na Figura K.3.

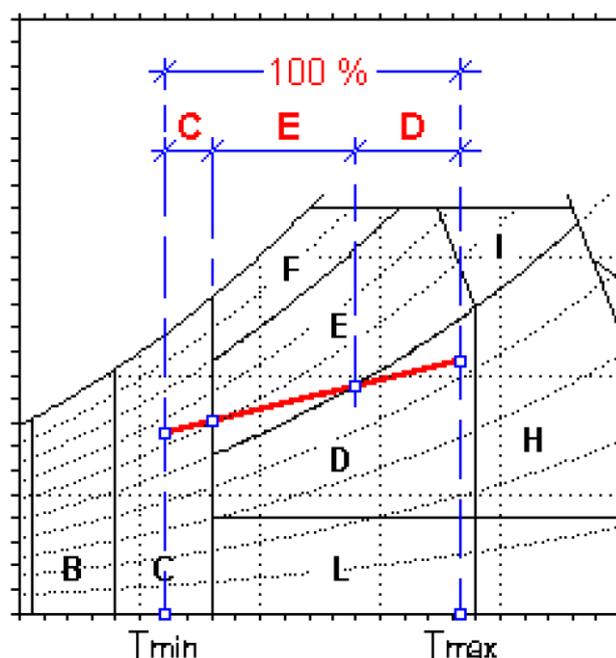
Figura K.3: Determinação das estratégias bioclimáticas para a cidade de Taubaté



Fonte: Elaborado pelo autor a partir da carta bioclimática definida em ABNT (2003).

A participação percentual de cada estratégia bioclimática pode ser determinada a partir de cálculos simples de razão e proporção, conforme apresentado na Figura K.4.

Figura K.4: Método para a determinação da participação percentual de cada estratégia bioclimática



Fonte: ABNT (2003).

Aplicando o conceito apresentado na Figura K.4 e considerando os dados apresentados na Figura K.3 é possível determinar a participação de cada estratégia bioclimática para a região de Taubaté conforme apresentado no Quadro K.1

Quadro K.1: Participação percentual de cada estratégia bioclimática para obtenção de conforto térmico na cidade de Taubaté

(continua)

Mês	Estratégia bioclimática	Participação (%)
Janeiro	F – desumidificação por meio da renovação do ar	44,6
	I – ventilação (natural e/ou mecânica)	43,8
	J – ventilação (natural e/ou mecânica)	11,6
Fevereiro	F – desumidificação por meio da renovação do ar	44,6
	I – ventilação (natural e/ou mecânica)	47,0
	J – ventilação (natural e/ou mecânica)	8,4
Março	F – desumidificação por meio da renovação do ar	41,7
	E – conforto térmico	11,3
	I – ventilação (natural e/ou mecânica)	47,0

Quadro K.1: Participação percentual de cada estratégia bioclimática para obtenção de conforto térmico na cidade de Taubaté

(conclusão)

Mês	Estratégia bioclimática	Participação (%)
Abril	F – desumidificação por meio da renovação do ar	40,3
	E – conforto térmico	31,1
	I – ventilação (natural e/ou mecânica)	28,6
Maio	B – Aquecimento solar passivo	8,1
	C – massa para armazenamento de energia térmica	25,0
	E – conforto térmico	66,9
Junho	B – Aquecimento solar passivo	22,3
	C – massa para armazenamento de energia térmica	23,0
	E – conforto térmico	54,7
Julho	B – Aquecimento solar passivo	23,2
	C – massa para armazenamento de energia térmica	23,2
	E – conforto térmico	53,6
Agosto	B – Aquecimento solar passivo	16,4
	C – massa para armazenamento de energia térmica	21,7
	E – conforto térmico	57,9
	I – ventilação (natural e/ou mecânica)	4,4
Setembro	C – massa para armazenamento de energia térmica	22,0
	F – desumidificação por meio da renovação do ar	7,6
	E – conforto térmico	59,0
	I – ventilação (natural e/ou mecânica)	11,4
Outubro	C – massa para armazenamento de energia térmica	3,1
	F – desumidificação por meio da renovação do ar	26,0
	E – conforto térmico	42,5
	I – ventilação (natural e/ou mecânica)	28,4
Novembro	F – desumidificação por meio da renovação do ar	33,6
	E – conforto térmico	30,3
	I – ventilação (natural e/ou mecânica)	36,1
Dezembro	F – desumidificação por meio da renovação do ar	35,3
	E – conforto térmico	26,0
	I – ventilação (natural e/ou mecânica)	38,7

Fonte: Elaborado pelo autor.

APÊNDICE L – Determinação das densidades de potência de iluminação dos ambientes internos dos apartamentos

Algumas definições importantes para a realização de um projeto de iluminação são (INMETRO, 2011):

- **Fluxo luminoso (lm):** Representa uma potência luminosa emitida ou observada, ou ainda, representa a energia emitida ou refletida, por segundo, em todas as direções, sob a forma de luz. O fluxo luminoso é dado em lúmens (lm);
- **Iluminância (lux):** É o fluxo luminoso incidente numa superfície por unidade de área. A unidade de iluminância é o lux. Um lux corresponde à iluminância de uma superfície plana de um metro quadrado de área, sobre a qual incide perpendicularmente um fluxo luminoso de um lúmen;
- **Eficiência Luminosa (lm/W):** É a relação entre o fluxo luminoso emitido e a energia elétrica consumida por unidade de tempo (potência) por uma fonte de luz. Quanto maior a eficiência luminosa de uma lâmpada e equipamentos, menor seu consumo de energia.

Para determinar a quantidade de luminárias adequadas a um ambiente é necessário conhecer a iluminância recomendada para a atividade que se realiza no ambiente. Os valores de iluminância recomendados pela norma NBR ISO/CIE 8995-1 (ABNT, 2013) para ambientes internos gerais de uma edificação são apresentados no Quadro L.1.

Quadro L.1: Valores de iluminância mantida recomendados pela NBR ISO/CIE 8995-1 para ambientes gerais de uma edificação

Ambiente do apartamento	Ambiente da norma	Iluminância mantida
Sala de estar	Sala de espera	200
Cozinha	Refeitórios	200
Dormitórios	Vestuários	200
Banheiros	Banheiros	200

Fonte: ABNT (2013).

Para fins de cálculo da densidade de potência de iluminação foi desprezada a contribuição de áreas de passagem rápida como corredores e escadarias. No Quadro L.1 foi considerado o valor de iluminância mantida recomendado para o ambiente especificado na norma NBR ISO/CIE 8995-1 (ABNT, 2013) em que a atividade realizada é similar à atividade dos ambientes dos apartamentos.

De acordo com INMETRO (2011), as características geométricas do ambiente são consideradas no cálculo do índice do recinto (K), o qual, para iluminação direta, é dado pela equação (L.1).

$$K = \frac{C.L}{h.(C+L)} \quad (L.1)$$

Em que: C : Comprimento do recinto

L : Largura do recinto

h : Pé-direito útil do recinto

Em seguida deve-se considerar o Fator de Utilização (FU), o qual representa a fração do fluxo luminoso inicial da lâmpada que alcança o plano de trabalho. O fator de utilização é uma função da distribuição de intensidade da luminária e do coeficiente de reflexão de superfícies do recinto. Em função do índice do recinto (K) e dos índices de reflexão de teto, parede e piso se determina o Fator de Utilização (FU) na tabela da luminária escolhida. Os índices de reflexão do teto, parede e piso são determinados conforme mostra a Tabela L.1

Tabela L.1: Índices de reflexão de teto, parede e Piso para cálculo luminotécnico

	Branco	Claro	Médio	Escuro
Teto	80%	70%	50%	30%
Parede		50%	30%	10%
Piso			30%	10%

Fonte: IAR.UNICAMP (2010).

No cálculo luminotécnico aqui realizado se considerou paredes e tetos claros e piso escuro, de modo que os índices de reflexão adotados foram, respectivamente, 70%, 50% e 10%. Em seguida deve-se considerar o fator de perdas luminosas, também chamado de Fator de Manutenção (FM), o qual considera a depreciação das luminárias e o grau de limpeza destas (INMETRO, 2011). A Tabela L.2 apresenta os fatores de manutenção considerados neste trabalho.

Tabela L.2: Fatores de manutenção considerados no cálculo luminotécnico

Ambiente	Limpo	Médio	Sujo
Fator de manutenção (FM)	0,9	0,8	0,6

Fonte: IAR.UNICAMP (2010).

Após a seleção da iluminância adequada, do tipo de luminária, do Fator de Utilização (FU), do Fator de Manutenção (FM) pode-se calcular a quantidade de luminárias (N) da forma como apresentada na equação (L.2).

$$N = \frac{E.S}{\varphi.FU.FM} \quad (L.2)$$

Em que: E : Iluminância adequada para o ambiente (lux)

S : Área do ambiente (m²)

φ : Fluxo luminoso da luminária (lm)

FU : Fator de utilização

FM : Fator de manutenção

L.1 – Determinação da densidade de potência de iluminação para lâmpadas fluorescentes

Para fins do cálculo da densidade de potência de iluminação foi considerada, neste trabalho, a utilização de luminária unitária e foi desprezado o efeito da luminária sobre o fluxo luminoso da lâmpada. O fluxo luminoso (φ) depende do tipo de lâmpada selecionada, neste trabalho se considerou que a iluminação dos ambientes dos apartamentos é feita a partir da utilização de lâmpadas fluorescentes compactas. O Quadro L.2 apresenta valores de propriedades de lâmpadas fluorescentes compactas da marca Philips utilizadas neste trabalho para especificação do fluxo luminoso e da potência unitária.

Quadro L.2: Propriedades de lâmpadas fluorescentes compactadas da marca Philips

Lâmpadas Fluorescentes Compactas Integradas											
Código Comercial	Potência (W)	Tensão (V)	Base	Fluxo luminoso (lm)	Eficiência luminosa (lm/W)	Temperatura de cor (K)	Índice de reprodução de cor (IRC)	Vida mediana (horas)	Dimensões em mm		
									Ø	Altura	
ECO HOME MINI											
	PLD14W127ECOMI	14	110 - 127	E27	810	58	Luz Clara - 6.500K	80	6.000	21,2	152
	PLD14W220ECOMI	14	220 - 240	E27	806	58	Luz Clara - 6.500K	80	6.000	21,2	152
	PLD18W127ECOMI	18	110 - 127	E27	1067	59	Luz Clara - 6.500K	80	6.000	36,0	140
	PLD18W220ECOMI	18	220 - 240	E27	1066	59	Luz Clara - 6.500K	80	6.000	36,0	140
	PLD23W127ECOMI	23	110 - 127	E27	1369	60	Luz Clara - 6.500K	80	6.000	36,0	157
	PLD23W220ECOMI	23	220 - 240	E27	1352	59	Luz Clara - 6.500K	80	6.000	36,0	157
Genie											
	PLW11W127GENLU	11	127	E14	600	59	Luz Suave - 2.700K	82	8.000	33,0	117,0
	PLW11W220GENLU	11	220	E14	600	59	Luz Suave - 2.700K	82	8.000	33,0	117,0
ECO HOME Twister											
	PLDT3ECO11W127	11	110-127	E27	719	65	Luz Clara - 6.500K	>80	6.000	47,0	116,0
	PLWT3ECO11W127	11	110-127	E27	790	72	Luz Suave - 2.700K	>80	6.000	47,0	116,0
	PLDT3ECO11W220	11	220-240	E27	629	56	Luz Clara - 6.500K	>80	6.000	47,0	116,0
	PLWT3ECO11W220	11	220-240	E27	660	60	Luz Suave - 2.700K	>80	6.000	47,0	116,0
	PLDT3ECO15W127	15	110-127	E27	928	62	Luz Clara - 6.500K	>80	6.000	47,0	128,0
	PLWT3ECO15W127	15	110-127	E27	961	64	Luz Suave - 2.700K	>80	6.000	47,0	128,0
	PLDT3ECO15W220	15	220-240	E27	846	56	Luz Clara - 6.500K	>80	6.000	47,0	128,0
	PLWT3ECO15W220	15	220-240	E27	918	61	Luz Suave - 2.700K	>80	6.000	47,0	128,0
	PLDT3ECO20W127	20	110-127	E27	1180	59	Luz Clara - 6.500K	>80	6.000	54,0	135,0
	PLWT3ECO20W127	20	110-127	E27	1328	66	Luz Suave - 2.700K	>80	6.000	54,0	135,0
	PLDT3ECO20W220	20	220-240	E27	1185	59	Luz Clara - 6.500K	>80	6.000	54,0	135,0
	PLWT3ECO20W220	20	220-240	E27	1280	64	Luz Suave - 2.700K	>80	6.000	54,0	135,0
	PLDT3ECO23W127	23	110-127	E27	1390	60	Luz Clara - 6.500K	>80	6.000	54,0	141,0
	PLWT3ECO23W127	23	110-127	E27	1442	63	Luz Suave - 2.700K	>80	6.000	54,0	141,0
	PLDT3ECO23W220	23	220-240	E27	1370	60	Luz Clara - 6.500K	>80	6.000	54,0	141,0
	PLWT3ECO23W220	23	220-240	E27	1477	64	Luz Suave - 2.700K	>80	6.000	54,0	141,0

Fonte: Philips (2014).

Devido à dificuldade em se encontrar fatores de utilização específicos para os tipos de lâmpadas apresentadas no Quadro L.2, foram considerados os fatores de utilização de sistemas luminárias/lâmpadas fluorescentes modelo TMS 500 – 1TL 20 W da marca Philips apresentados na Tabela L.3.

Tabela L.3: Fatores de utilização de conjuntos luminária-lâmpadas fluorescentes da marca Philips

TMS 500 – 1 TL 20W									
ROOM INDEX K	REFLETÂNCIAS								
	751	731	711	551	531	511	331	311	000
0,60	0,31	0,24	0,19	0,28	0,22	0,18	0,20	0,16	0,13
0,80	0,30	0,31	0,26	0,35	0,28	0,24	0,26	0,22	0,17
1,00	0,44	0,37	0,31	0,40	0,34	0,29	0,30	0,26	0,21
1,25	0,50	0,43	0,37	0,45	0,39	0,34	0,35	0,31	0,26
1,50	0,54	0,47	0,42	0,49	0,43	0,38	0,39	0,35	0,29
2,00	0,61	0,54	0,49	0,55	0,50	0,45	0,45	0,41	0,35
2,50	0,65	0,59	0,54	0,59	0,54	0,50	0,49	0,46	0,39
3,00	0,68	0,63	0,58	0,62	0,58	0,54	0,52	0,49	0,42
4,00	0,72	0,68	0,64	0,66	0,62	0,59	0,57	0,54	0,46
5,00	0,75	0,71	0,68	0,68	0,65	0,62	0,60	0,57	0,49

Fonte: Adaptado de IFSC (2009).

A Tabela L.4 apresenta os resultados obtidos para o cálculo luminotécnico empregando-se as equações (L.1) e (L.2) e os dados das Tabelas de L.1, L.2 e L.3 e Quadros L.1 e L.2.

Tabela L.4: Resultados obtidos com o cálculo luminotécnico para lâmpadas fluorescentes

Variável	Suíte	Quarto 1	Quarto 2	Sala (estar)	Cozinha	Banheiro
C (m)	3,92	3,92	3,50	2,79	3,88	1,52
L (m)	3,86	2,86	3,16	4,06	2,86	1,56
h (m)	2,00	2,00	2,00	2	2,00	2,00
K	3,89	3,31	3,32	3,3	3,29	1,54
FU	0,72	0,68	0,68	0,68	0,68	0,54
FM	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
E (lux)	200	200	200	200	200	200
S (m ²)	15,13	11,20	11,06	11,32	11,09	2,37
φ (lm)	1180	1328	1328	1390	1328	928
N	3,96	2,76	2,72	2,66	2,73	1,05
N_arred	4	3	3	3	3	1
P_lâmpada (W)	20	20	20	23	20	15
P_total (W)	80	60	60	69	60	15
d (W/m ²)	5,28	5,35	5,42	6,09	5,41	6,32
Densidade média de potência de iluminação = 5,64 W/m²						

Nota: C – comprimento do ambiente, L – largura do ambiente, h – altura da luminária até o plano de trabalho, N – número de lâmpadas, N_arred – número arredondado de lâmpadas

Fonte: Elaborado pelo autor.

As lâmpadas (Quadro L.2) utilizadas como referência para o cálculo dos valores da Tabela L.4 foram:

- Suíte: ECO HOME Twister PLDT3ECO20W127
- Quarto 1, Quarto 2 e Cozinha: ECO HOME Twister PLWT3ECO20W127
- Sala de estar: ECO HOME Twister PLDT3ECO23W127
- Banheiro: ECO HOME Twister PLDT3ECO15W127

L.2 – Determinação da densidade de potência de iluminação para lâmpadas LED

Seguindo um procedimento semelhante ao realizado para as lâmpadas fluorescentes se determinou a densidade de potência para a iluminação LED. Foram escolhidos três modelos de lâmpadas de alta eficiência luminosa conforme é apresentado no Quadro L.3 (GOLDEN, 2018; PROCEL, 2019b):

Quadro L.3: Modelos de lâmpadas LED utilizados para a determinação da densidade de potência de iluminação na simulação de medidas de eficiência energética

Modelo	Fabricante	Potência (W)	Fluxo luminoso (lm)	Eficiência luminosa (lm/W)
Ultraled bulbo A60	Golden	14	1507	107,6
Ultraled bulbo 4U	Golden	18	1836	102,0
ALP-LB-08w-B-150-009LM-840	Alper	8	940	117,5

Fonte: Golden (2018) e PROCEL (2019b).

Na Tabela L.5 é apresentado o resultado do cálculo luminotécnico para a iluminação com lâmpadas LED. Comparando a densidade de potência média da iluminação com lâmpadas fluorescentes (Tabela L.4) com a densidade de potência média da iluminação com lâmpadas LED (Tabela L.5) é possível concluir que há uma redução na densidade de potência de 43,7% com a substituição das lâmpadas fluorescentes por lâmpadas LED.

Tabela L.5: Resultados obtidos com o cálculo luminotécnico para lâmpadas LED

	Suíte	Quarto 1	Quarto 2	Sala (estar)	Cozinha	Banheiro
C(m)	3,92	3,92	3,50	2,79	3,88	1,52
L(m)	3,86	2,86	3,16	4,06	2,86	1,56
h(m)	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
K	3,89	3,31	3,32	3,3	3,29	1,54
FU	0,72	0,68	0,68	0,68	0,68	0,63
FM	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
E (lux)	200	200	200	200	200	200
S(m ²)	15,1	11,21	11,06	11,32	11,09	2,37
fi (lm)	1507	1836	1836	1836	1836	940
N	3,10	2,00	1,97	2,02	1,98	1,04
N-arred	3	2	2	2	2	1
P_Lâmpada (W)	14	18	18	18	18	8
P_total (W)	42	36	36	36	36	8
d (W/m ²)	2,77	3,21	3,25	3,18	3,24	3,37
Densidade média de potência de iluminação = 3,17 W/m²						

Nota: C – comprimento do ambiente, L – largura do ambiente, h – altura da luminária até o plano de trabalho, N – número de lâmpadas, N_arred – número arredondado de lâmpadas

Fonte: Elaborado pelo autor.

APÊNDICE M – Construção de um modelo de classe econômica para a família do modelo de base de edifício residencial

O Quadro M.1 apresenta as pontuações para a posse de aparelhos eletrodomésticos, número de empregados domésticos e quantidades de banheiros indicadas para cada item no Critério Brasil de 2019 (ABEP, 2019).

Quadro M.1: Pontuações para posse de eletrodomésticos, número de empregados domésticos e quantidade de banheiros indicados no Critério Brasil

	0	Quantidade			
		1	2	3	4 ou +
Banheiros	0	3	7	10	14
Empregados domésticos	0	3	7	10	13
Automóveis	0	3	5	8	11
Microcomputador	0	3	6	8	11
Lava louca	0	3	6	6	6
Geladeira	0	2	3	5	5
Freezer	0	2	4	6	6
Lava roupa	0	2	4	6	6
DVD	0	1	3	4	6
Micro-ondas	0	2	4	4	4
Motocicleta	0	1	3	3	3
Secadora roupa	0	2	2	2	2

Fonte: ABEP (2019).

O Critério Brasil considera, também, o grau de instrução do chefe de família e a disponibilidade de itens de infraestrutura urbana. O Quadro M.2 apresenta as pontuações recomendadas no Critério Brasil para estes itens.

Quadro M.2: Pontuações para posse de eletrodomésticos, número de empregados domésticos e quantidade de banheiros indicados no Critério Brasil

Grau de instrução do chefe da família		
Analfabeto / Fundamental I incompleto	0	
Fundamental I completo / Fundamental II incompleto	1	
Fundamental II completo / Médio incompleto	2	
Médio completo / Superior incompleto	4	
Superior completo	7	
Serviços públicos		
	Não	Sim
Água encanada	0	4
Rua pavimentada	0	2

Fonte: ABEP (2019).

As classes econômicas são divididas em: A, B1, B2, C1, C2, D – E, de acordo com a pontuação obtida nos itens dos Quadros M.1 e M.2 de acordo com a estratificação indicada no Quadro M.3.

Quadro M.3: Pontuações de corte do Critério Brasil

Classe	Pontos
1 - A	45 - 100
2 - B1	38 - 44
3 - B2	29 - 37
4 - C1	23 - 28
5 - C2	17 - 22
6- D - E	0 - 16

Fonte: ABEP (2019).

As rendas de cada classe são estimadas de acordo com resultados da Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua (PNADC) mais atualizada. Para a definição do Critério Brasil de 2019 foram utilizados dados da PNADC de 2018, conforme apresentado no Quadro M.4 (ABEP, 2019).

Quadro M.4: Renda domiciliar média dos estratos socioeconômicos em 2018

Estrato Sócio Econômico	Renda média domiciliar
A	25.554,33
B1	11.279,14
B2	5.641,64
C1	3.085,48
C2	1.748,59
DE	719,81
TOTAL	3.014,01

Fonte: ABEP (2019).

Em 2018 o salário mínimo vigente era de R\$ 954,00 (BRASIL, 2017), dividindo os valores de renda média apresentados no Quadro M.4 pelo valor do salário mínimo vigente em 2018 se obtém as faixas de salários mínimos ganhos por domicílio para cada estrato socioeconômico, os quais são apresentados no Quadro M.5, juntamente com o valor médio das pontuações para cada estrato socioeconômico apresentado no Quadro M.3.

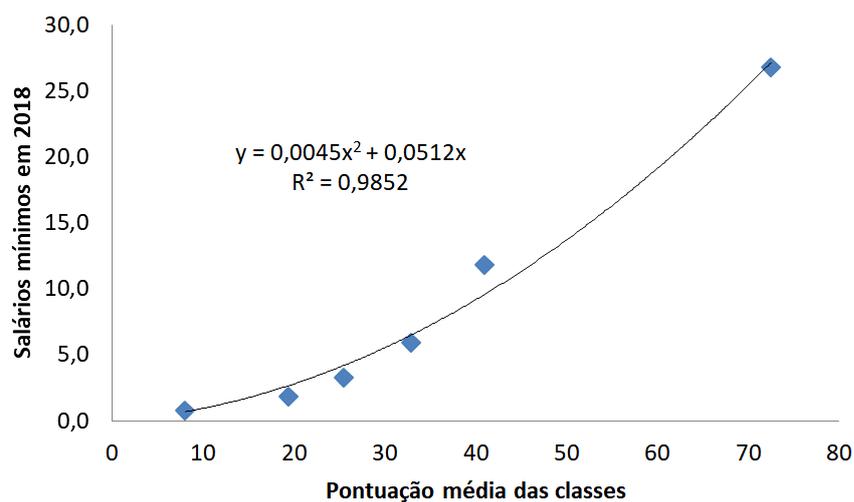
Quadro M.5: Renda domiciliar dos estratos socioeconômicos em termos de salários mínimos no ano de 2018

Classes socioeconômicas	Renda bruta familiar em 2018	Quantidade de salários mínimos em 2018	Médias das pontuações do Quadro H.3
A	25554,33	26,8	72,5
B1	11279,14	11,8	41,0
B2	5641,64	5,9	33,0
C1	3085,48	3,2	25,5
C2	1748,59	1,8	19,5
D - E	719,81	0,8	8,0

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados de ABEP (2019).

Plotando-se a quantidade de salários mínimos em 2018 em função da pontuação média atribuída para cada estrato socioeconômico e procurando-se pelo melhor ajuste em termos de correlação se obtém a Figura M.1

Figura M.1: Correlação encontrada entre a quantidade de salários mínimos em 2018 e a pontuação média atribuída para cada estrato socioeconômico do Critério Brasil



Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados do Quadro M.5 (2019).

A família considerada no modelo apresenta as pontuações apresentadas no Quadro M.6 de acordo com os Quadros M.1 e M.2.

Quadro M.6: Atribuição de pontuações para a determinação do estrato socioeconômico da família do modelo de base de edifício residencial

Posse de eletrodomésticos/ automóveis/ empregados domésticos e quantidade de banheiros		
Variável	Quantidade	Pontos
Banheiros	2	7
Empregado doméstico	1	3
Automóvel	1	3
Microcomputador	3	8
Lava louça	1	3
Geladeira	1	2
Freezer	0	0
Lava roupa	1	2
DVD	1	1
Microondas	1	2
Motocicleta	1	1
Secadora roupa	1	2
Escolaridade do chefe de família		
Superior completo		7
Disponibilidade de serviços públicos		
Variável	Sim/Não	Pontos
Água encanada	Sim	4
Rua pavimentada	Sim	2
Total		47

Fonte: Elaborado pelo autor tomando como referência os Quadros M.1 e M.2 (2019).

Substituindo a pontuação total de 47 na equação de regressão apresentada na Figura M.1 se obtém a renda mensal estimada de uma família com as características apresentadas no Quadro M.6 em termos de quantidade de salários mínimos. O valor obtido é de 12,3 salários mínimos para a renda média familiar, esse valor classifica a família na classe econômica B1.

APÊNDICE N – Construção de um modelo de consumo residencial de eletricidade

Tavares e Fritsche (2007) estudaram a existência de correlações entre o consumo de energia elétrica, área útil das unidades habitacionais, tamanho e renda das famílias na cidade de Florianópolis (SC). Ao todo foram estudadas 200 unidades residenciais, classificadas por faixas de consumo de eletricidade definidas de acordo com critérios das Centrais Elétricas de Santa Catarina (Celesc), conforme apresentado no Quadro N.1.

Quadro N.1: Classificação das residências por faixas de consumo da Celesc

Faixa (kWh)	%	Residências selecionadas	Meta cumprida
0-50	5,46	8	11
51-100	15,43	23	31
101 - 200	36,75	56	74
201-300	21,54	32	43
301-500	14,72	22	30
>500	6,1	9	12
Total	100	150	200

Fonte: Tavares e Fritsche (2007).

O Quadro N.2 apresenta alguns resultados importantes encontrados na pesquisa de Tavares e Fritsche (2007) e comparações com resultados da Pesquisa de Posse e Hábitos de consumo (PPH), realizada pelo PROCEL em 2006.

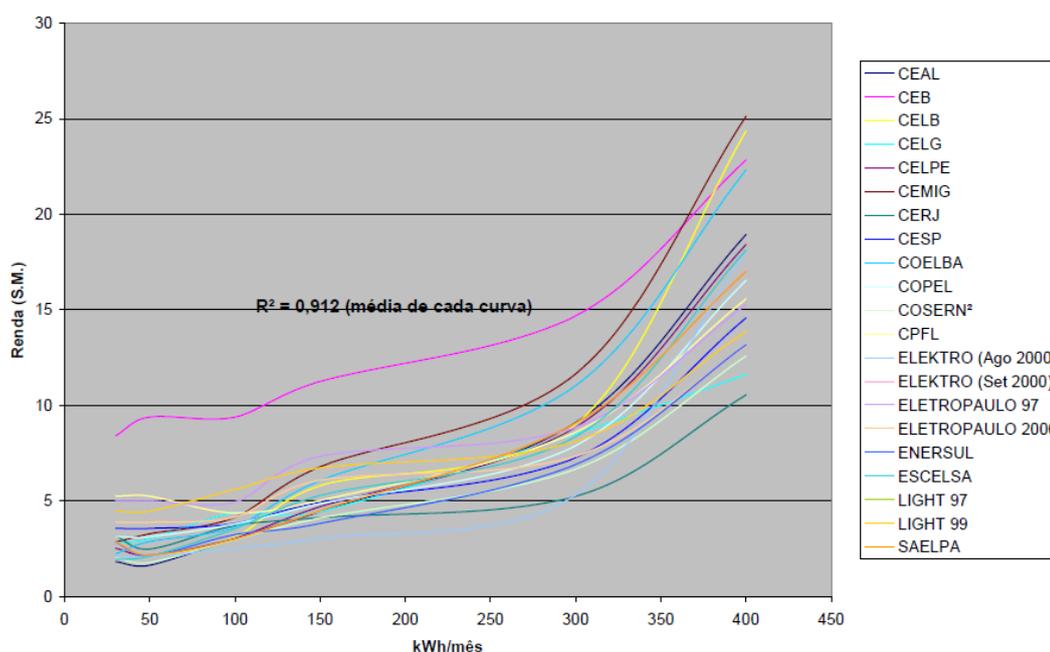
Quadro N.2: Comparativo entre resultados encontrados por Tavares e Fritsche (2007) e resultados da pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de consumo de 2006

Característica	Unidade	AET 01 (Fpólis)	CELESC (PPH 2006)	BRASIL (PPH 2006)
Universo	Unidade	200	400	4310
Área	m ²	109	74	70
Habitantes	Unidade	3,11	2,76	3,38
Renda	R\$/mês	2860,00	2573,00	1457,00
Consumo	kWh/mês	235,00	195,20	187,50
Cons. / hab	kWh/hab	75,56	70,72	55,47
Cons. / m ²	kWh/ m ²	2,16	2,64	2,68

Fonte: Tavares e Fritsche (2007).

Além da pesquisa de campo, os autores realizaram levantamentos sobre a existência de correlações entre o consumo de eletricidade e renda familiar para diversas concessionárias de energia elétrica. Os resultados encontrados apontam haver forte correlação entre estas duas variáveis, conforme apresentado na Figura N.1.

Figura N.1: Correlação entre o consumo de energia elétrica e renda domiciliar nas concessionárias pesquisadas

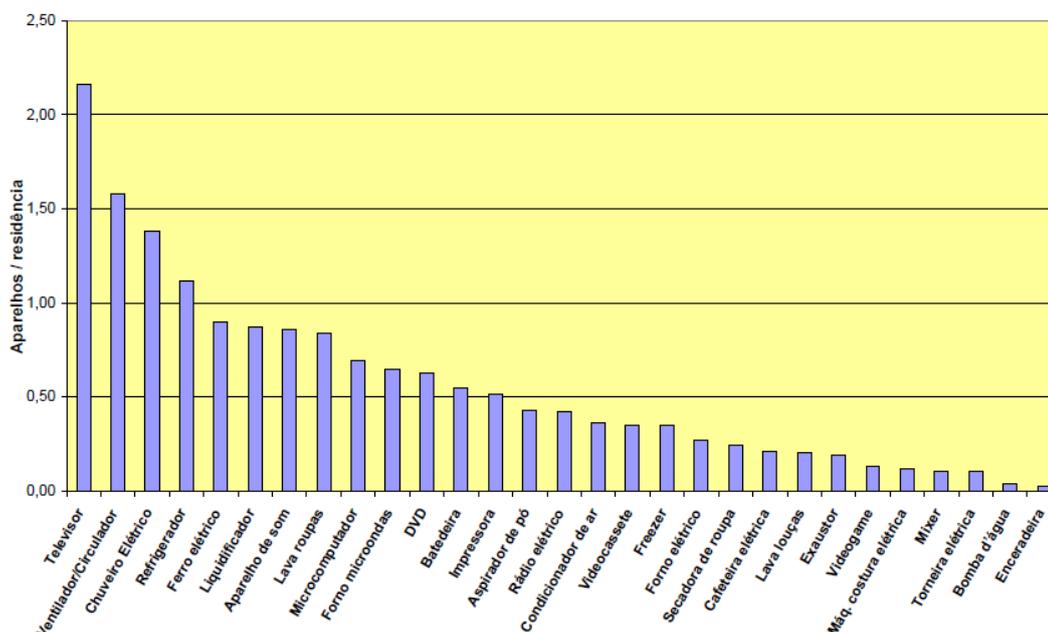


Fonte: Tavares e Fritsche (2007).

Como pode ser observado na Figura N.1 a faixa mais provável de consumo para uma família com renda média de 12,3 salários mínimos (Apêndice M) é de 300 a 400 kWh/mês para a maior parte das concessionárias de energia elétrica pesquisadas por Tavares e Fritsche (2007).

Tavares e Fritsche (2007) realizaram, também, levantamentos do índice de posse de equipamentos elétricos nas residências pesquisadas obtendo o resultado apresentado na Figura N.2.

Figura N.2: Índice de posse de equipamentos elétricos encontrados por Tavares e Fritsche (2007) para as 200 residências pesquisadas



Fonte: Tavares e Fritsche (2007).

Os dados de variação do consumo de eletricidade em função da renda domiciliar coletados por Tavares e Fritsche (2007), juntamente com análises convenientes para esta dissertação são apresentados na Tabela N.1.

Tabela N.1: Correlação entre renda domiciliar e consumo de energia elétrica

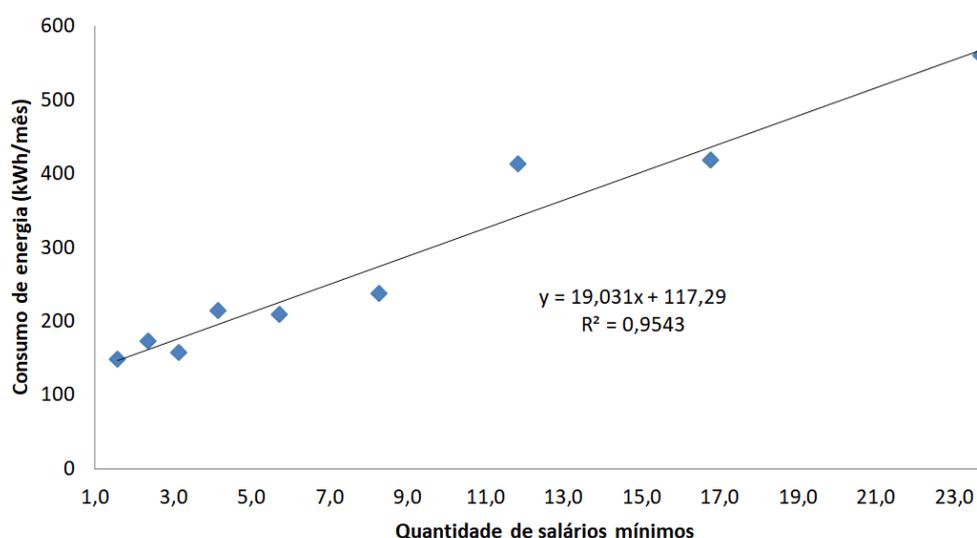
Renda Domiciliar em 2007 (R\$)	Renda média (R\$)	Quantidade de salários mínimos em 2007	Consumo de eletricidade (kWh/mês)
Até 450,00	380,00	1,0	162
451,00 a 750,00	600,50	1,6	148
751,00 a 1.050,00	900,50	2,4	173
1.051,00 a 1.350,00	1.200,50	3,2	157
1.351,00 a 1.800,00	1.575,50	4,1	214
1.801,00 a 2.550,00	2.175,50	5,7	209
2.551,00 a 3.750,00	3.150,50	8,3	238
3.751,00 a 5.250,00	4.500,50	11,8	413
5.251,00 a 7.500,00	6.375,50	16,8	419
7.501,00 a 10.500,00	9.000,50	23,7	561

Nota: Para o cálculo da quantidade de salários mínimos foi utilizado o valor de R\$ 380,00 (BRASIL, 2007)

Fonte: Adaptado de Tavares e Fritsche (2007).

Na Tabela N.1 foi utilizado o valor de R\$ 380,00 para o menor valor de rendimento domiciliar médio uma vez que tal valor representa o salário mínimo estabelecido por decreto de lei em junho de 2007 (BRASIL, 2007). A partir dos dados apresentados na Tabela N.1 foi plotado um gráfico de regressão linear entre o consumo de energia e quantidade de salários mínimos. O resultado encontrado é apresentado na Figura N.3.

Figura N.3: Correlação entre o consumo de eletricidade e a renda média familiar em termos de quantidade de salários mínimos



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados de Tavares e Fritsche (2007), conforme apresentados na Tabela N.1.

Os dados de variação do consumo de eletricidade em função da área útil dos domicílios coletados por Tavares e Fritsche (2007), juntamente com análises convenientes para esta dissertação são apresentados na Tabela N.2.

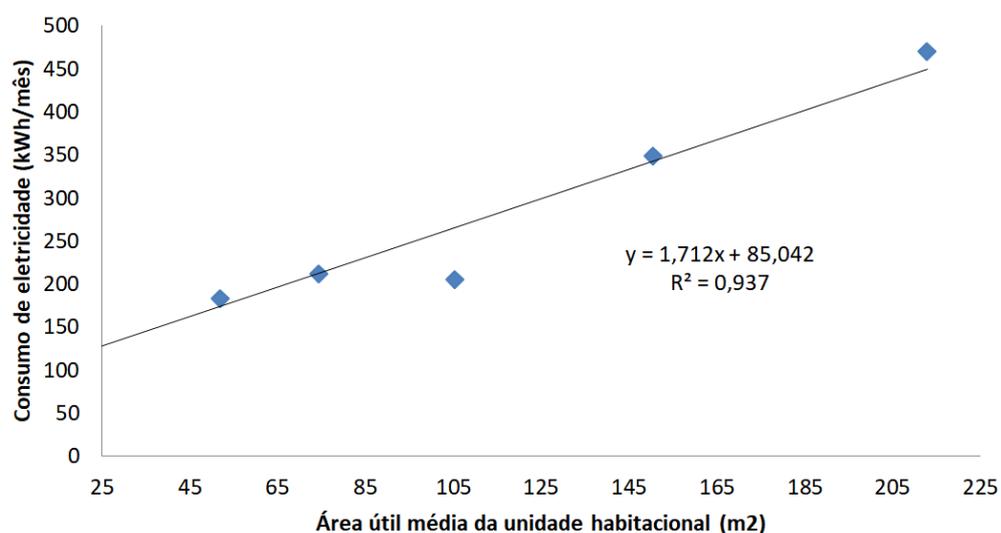
Tabela N.2: Correlação entre a área útil da unidade habitacional e o consumo de eletricidade

Área útil (m ²)	Área útil média (m ²)	Consumo de eletricidade (kWh/mês)
0 - 40	20,0	144
41 - 63	52,0	183
64 - 85	74,5	212
86 - 125	105,5	205
126 - 175	150,5	349
176 - 250	213,0	471

Fonte: Adaptado de Tavares e Fritsche (2007).

A partir dos dados apresentados na Tabela N.2 foi plotado um gráfico de regressão linear entre o consumo de energia elétrica e a área útil média da unidade habitacional. O resultado encontrado é apresentado na Figura N.4.

Figura N.4: Correlação entre o consumo de eletricidade e a área útil média da unidade habitacional



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados de Tavares e Fritsche (2007), conforme apresentados na Tabela N.2.

Os dados de variação do consumo de eletricidade em função do tamanho das famílias coletados por Tavares e Fritsche (2007), juntamente com análises relevantes para esta dissertação, são apresentados na Tabela N.3.

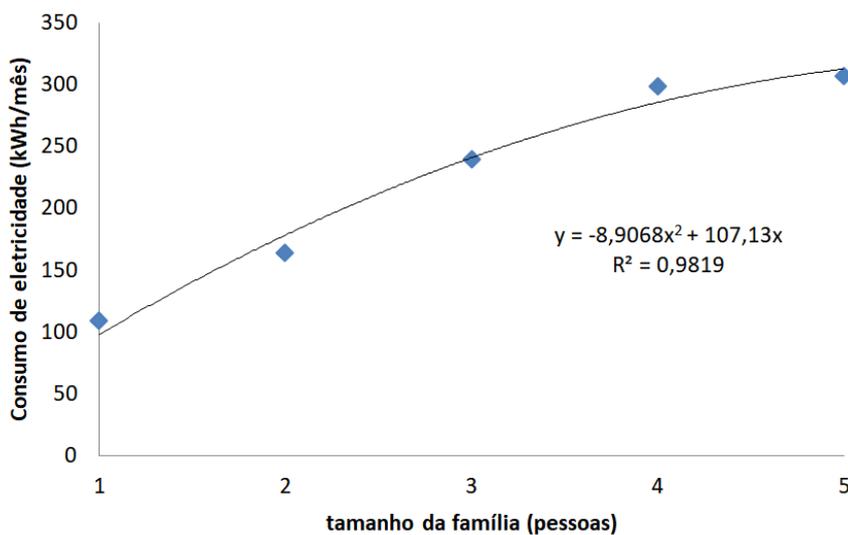
Tabela N.3: Correlação entre o tamanho da família e o consumo de eletricidade para o intervalo de interesse

Tamanho da família (pessoas)	Consumo (kWh/mês)
1	109
2	164
3	240
4	299
5	307

Fonte: Adaptado de dados de Tavares e Fritsche (2007).

A partir dos dados apresentados na Tabela N.3, foi plotado um gráfico de regressão quadrática entre o consumo de energia elétrica e o tamanho das famílias. O resultado encontrado é apresentado na Figura N.5.

Figura N.5: Correlação entre o consumo de eletricidade e o tamanho da família



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados de Tavares e Fritsche (2007), conforme apresentados na Tabela N.3.

As equações de regressão linear apresentadas nas Figuras N.3, N.4 e N.5 foram utilizadas neste trabalho para determinar o consumo médio de energia elétrica (apresentado no Capítulo 5) do modelo de base de edifício residencial.

APÊNDICE O – Construção de modelos de consumo de eletricidade de aparelhos eletrodomésticos

Para a determinação do consumo mensal de energia elétrica do modelo de base de edifício residencial, bem como a determinação da potência elétrica total instalada de aparelhos eletrodomésticos e frações de utilização horária (cronogramas de utilização) da potência total foi necessário modelar a partição do consumo de energia elétrica em relação aos aparelhos eletrodomésticos que compõem o modelo de base.

O método empregado consistiu em ajustar tempos e potências de aparelhos eletrodomésticos de modo que o consumo médio mensal de eletricidade ficasse próximo do consumo determinado segundo o perfil socioeconômico da família do modelo de base (seção 5.4.6). Para as potências médias e tempos médios de utilização diária de aparelhos eletrodomésticos foram adotados valores tabelados pela Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG, 2014), alguns valores de consumos mensais médios de energia elétrica foram adotados conforme medições do Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO). A seguir são detalhados os cálculos e modelamentos do consumo de energia dos aparelhos eletrodomésticos.

O.1 – Análise do consumo mensal de eletricidade do chuveiro elétrico

Por meio de pesquisas na internet se verificou que os dez modelos mais vendidos de chuveiro em 2018 foram todos da marca Lorenzetti (MONTEIRO, 2018). Em seguida, foram feitos levantamentos dos consumos de energia dos chuveiros da marca Lorenzetti medidos pelo Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO, 2016a). Os consumos máximos e mínimos mensais de energia elétrica de 53 modelos de chuveiro da marca Lorenzetti, com potência elétrica variando de 5500 a 7800 W, foram utilizados para a construção de um modelo do consumo do chuveiro em função da potência elétrica. A Tabela O.1 apresenta a média dos consumos máximo e mínimo de energia elétrica dos 53 modelos da marca Lorenzetti por faixa de potência elétrica nominal.

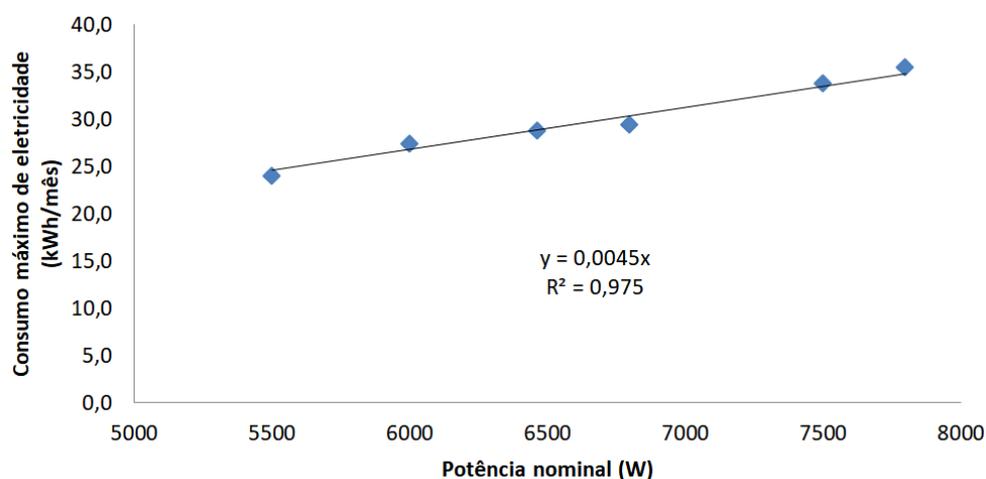
Tabela O.1: Consumo máximo e mínimo mensal de energia elétrica dos chuveiros da marca Lorenzetti em função da potência

Potência (W)	Quantidade de modelos	Média do consumo máximo dos modelos (kWh/mês)	Média do consumo mínimo dos modelos (kWh/mês)
5500	9	24,0	12,5
6000	3	27,4	10,9
6465	1	28,8	11,4
6800	11	29,4	10,5
7500	25	33,7	11,4
7800	4	35,5	10,1

Fonte: INMETRO (2016).

A partir dos dados da Tabela O.1 plotou-se um gráfico de correlação linear entre a potência e o consumo máximo, o resultado é apresentado na Figura O.1.

Figura O.1: Correlação entre a potência nominal de chuveiros Lorenzetti e o consumo máximo de energia elétrica



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados de INMETRO (2016a).

As faixas de potências nominais de chuveiros recomendadas pelo INMETRO de acordo com as regiões brasileiras são apresentadas no Quadro O.1.

Quadro O.1: Faixas de potências de chuveiros recomendados pelo INMETRO de acordo com a região brasileira

CLASSES DE POTENCIA	POTENCIA (W)	UTILIZAÇÃO
A	$P \leq 2.400$	PREFERENCIALMENTE, REGIÃO DE CLIMAS MAIS QUENTES, COMO A REGIÃO NORTE
B	$2.400 > P \leq 3.500$	
C	$3.500 > P \leq 4.600$	
D	$4.600 > P \leq 5.700$	PREFERENCIALMENTE, REGIÃO DE CLIMAS MÉDIOS A QUENTES, COMO AS REGIÕES NORDESTE E CENTRO-OESTE
E	$5.700 > P \leq 6.800$	
F	$6.800 > P \leq 7.900$	PREFERENCIALMENTE, REGIÃO DE CLIMAS MAIS FRIOS, COMO AS REGIÕES SUL E SUDESTE
G	$P > 7.900$	

Fonte: INMETRO (2016a).

Como pode ser observado no Quadro O.1, para a região sudeste brasileira é recomendada uma faixa de potência entre 6800 e 7900 W, como referência, adotou-se a potência de 7500 W para os cálculos dos consumo de energia do chuveiro elétrico. Substituindo o valor de 7500 W na equação de correlação linear apresentada na Figura O.1 e, observando que o consumo mensal mínimo dos modelos da marca Lorenzetti é em torno de 38% do consumo mensal máximo (Tabela O.1), determinou-se os valores médios dos consumos mensais máximo e mínimo de um chuveiro da marca Lorenzetti em, respectivamente, 33,8 kWh/mês e 12,8 kWh/mês. Esses valores são adotados, respectivamente, para os consumos correspondentes ao verão e inverno.

O.2 – Análise do consumo mensal de eletricidade do aparelho de ar condicionado, determinação da capacidade de refrigeração, determinação do COP e análise da degradação de desempenho do aparelho com a idade

Para determinar o consumo médio mensal de energia elétrica de um aparelho de ar condicionado primeiramente é necessário especificar o aparelho. Na fase inicial do modelamento do consumo de energia elétrica recorreu-se a simuladores *on-line* de fabricantes de ar condicionado para a determinação da capacidade frigorífica necessária para que o sistema climatize a zona térmica das suítes dos apartamentos. Nos simuladores *on-line* são inseridas informações simples, tais como: tipo de ambiente, dimensões do ambiente, tipo de cobertura, período de exposição ao sol, quantidade de lâmpadas no ambiente, quantidade de janelas, número de pessoas que ocupam o local e equipamentos elétricos no local. As capacidades de refrigeração dos sistemas de ar condicionado recomendadas por cada simulador de cinco fabricantes diferentes para os dados indicados no Quadro O.2 são apresentadas no Quadro O.3

Quadro O.2: Variáveis inseridas nos simuladores dos fabricantes de ar condicionado

Ambiente	suíte	Localização	Sudeste
Largura (m)	4	Quantidade de pessoas no local	2
Comprimento (m)	4	Quantidade de janelas	1
Quantidade de lâmpadas fluorescentes no local	3	Presença de cortinas e elementos de sombreamento na janela	Nenhum elemento
Quantidade de equipamentos eletrodomésticos	2	Período de insolação	manhã e tarde

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro O.3: Capacidades de refrigeração recomendadas pelos simuladores de carga térmica dos fabricante de ar condicionado

Fabricante	Capacidade de refrigeração recomendada pelo simulado de carga térmica (BTU/h)
Komeco ^(a)	12.000
Consul ^(b)	7.000
LG ^(c)	12.000
Frigelar ^(d)	12.000
Carrier ^(f)	12.000

Fonte: Komeco (2019)^(a); Consul (2019)^(b), LG (2019)^(c), Frigelar (2019)^(d), CarrierdoBrasil (2019)^(e).

Como pode ser observado no Quadro O.3, o valor mais frequentemente indicado pelos simuladores dos fabricantes de ar condicionado é 12.000 BTU/h, tal valor será considerado neste trabalho para a determinação do consumo de energia elétrica com ar condicionado.

Em seguida, foram selecionados alguns modelos de ar condicionado de 12.000 BTU/h de capacidade de refrigeração do tipo *split hi-wall* de rotação fixa constantes nas tabelas do Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia no ano de 2014 (INMETRO, 2014). As marcas utilizadas para a adoção de valores de referência de coeficiente de desempenho (COP) e consumo de energia elétrica mensal são apresentadas no Quadro O.4.

Quadro O.4: Valores de referência para o consumo de energia elétrica e coeficiente de desempenho de aparelhos de ar condicionado

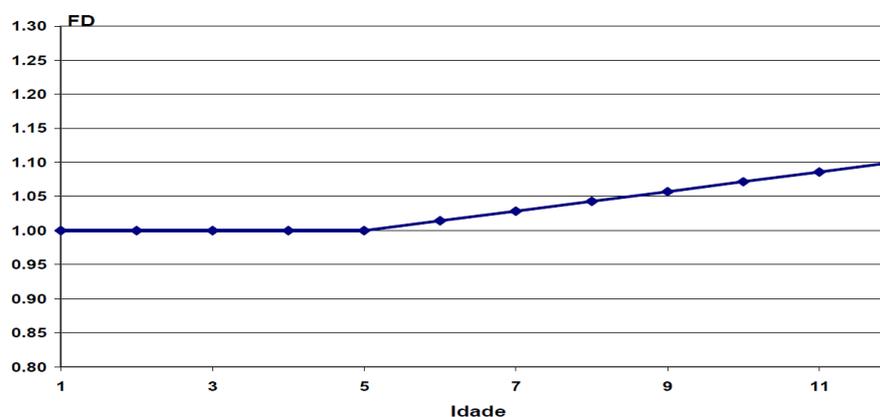
Fornecedor ou Marca	Quantidade de Modelos	COP – médio dos modelos	Consumo em 127 V (kWh/mês)
ELGIN	17	3,07	24,15
GREE	11	3,02	24,52
HITACHI	10	3,01	24,39
KOMECO	14	3,00	24,23
LG	8	3,15	23,94
SAMSUNG	7	3,12	23,82
SPRINGER CARRIER	37	2,98	23,79
Valores médios		3,05	24,12

Fonte: INMETRO (2014).

No Quadro O.4, o consumo mensal do aparelho de ar condicionado é determinado utilizando 1h de ciclo de operação diária, desta forma, para determinar o consumo mensal referente ao aparelho de ar condicionado é necessário multiplicar o valor médio de consumo apresentado no Quadro O.4 pela quantidade de horas de utilização diária.

O coeficiente de desempenho médio do sistema de ar condicionado apresentado no Quadro O.4 é válido apenas para aparelhos novos. Para aparelhos usados deve-se aplicar um fator de degradação do desempenho, conforme indicado na Figura O.2.

Figura O.2: Fator de degradação do desempenho para sistemas de ar condicionado



Fonte: Souza (2010).

No Apêndice P a idade média dos aparelhos eletrodomésticos de uma residência foi estimada em 6,5 anos baseando-se em resultados do Programa Nacional de Conservação de Energia (PROCEL, 2007). Considerando a idade média de 6,5 anos para um sistema de ar condicionado pode-se concluir, a partir da análise da Figura O.2, que o fator de degradação de

desempenho é de, aproximadamente, 1,03, ou seja, deve ser descontado 3% do coeficiente de desempenho médio (COP) apresentado no Quadro O.4 . Desta forma, o valor do COP a ser utilizado nas simulações é de **2,95**.

O.3 – Análise do consumo mensal de eletricidade do refrigerador

Por meio de pesquisas na internet se verificou que os dez modelos mais vendidos de refrigeradores no primeiro trimestre de 2019 variaram entre as marcas Electrolux, Consul e Brastemp, conforme apresentado no Quadro O.5 (MONTEIRO, 2019).

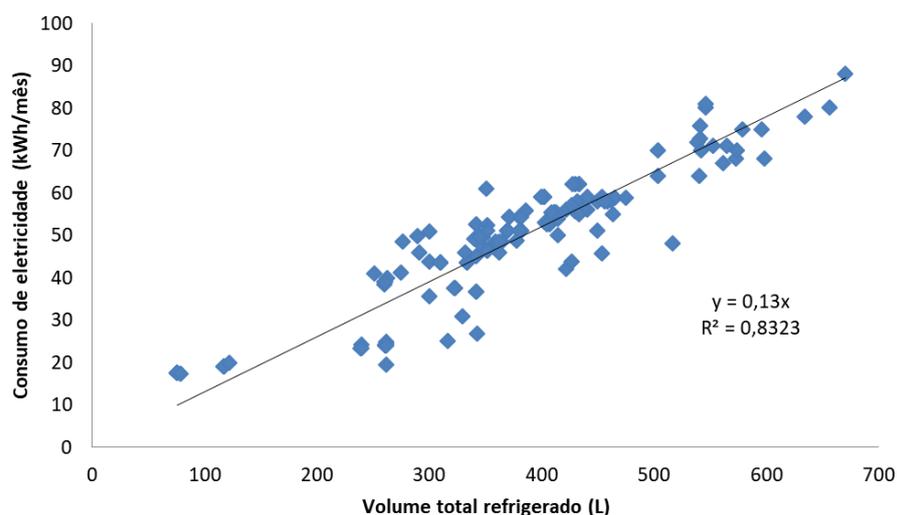
Quadro O.5: Modelos de refrigeradores mais vendidos no primeiro trimestre de 2019

Posição	Volume total (L)	Marca	Modelo
1º	260	Electrolux	Cycle Defrost Duplex 260 L DC35A
2º	433	Electrolux	Frost Free Duplex 433 L TF51
3º	240	Electrolux	simplex 240 L RE31
4º	275	Consul	frost Free Duplex 275 L CRM35NB
5º	443	Brastemp	Frost Free Inverse 443L inox BRE57AK
6º	380	Electrolux	Frost Free Duplex 380 L Inox DW42X
7º	334	Consul	Cycle Defrost Duplex 334 L CRD37
8º	462	Electrolux	Cycle Defrost Duplex 462 L DC49A
9º	437	Consul	Bem Estar Frost Free Duplex 437 L CRM55
10º	362	Electrolux	Cycle Defrost Duplex 362 L DC44

Fonte: Monteiro (2019).

Em seguida, plotou-se um gráfico de correlação linear entre o volume total do refrigerador e seu consumo de energia elétrica mensal, utilizando dados de 132 modelos de refrigeradores, das marcas Electrolux, Consul e Brastemp, do Programa Brasileiro de Etiquetagem de refrigeradores de 2016 (INMETRO, 2016b). A função de correlação obtida é apresentada na Figura O.2.

Figura O.2: Correlação entre o consumo de eletricidade mensal e o volume total refrigerado para 132 modelos de refrigeradores das marcas Electrolux, Consul e Brastemp



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados de INMETRO (2016b).

Como pode ser visto no Quadro O.5, é bastante frequente a aquisição de refrigeradores com volume total maior que 400 L, como referência de volume adotou-se o modelo *Frost Free Inverse* 443L inox BRE57AK da marca Brastemp, o qual possui um volume total refrigerado de 443 L. Substituindo este valor de volume na equação de regressão linear apresentada na Figura O.2 se obtém um consumo médio mensal de energia elétrica da ordem de **57,6 kWh/mês**.

O.4 – Análise do consumo mensal de eletricidade da máquina de lavar roupas

Para a determinação do consumo mensal de energia elétrica da máquina de lavar roupas foi considerado que a família do modelo de base de edifício residencial possui um modelo *Top Load* de 16 kg, que opera com água fria e voltagem de alimentação de 127 V. Como referência, foi feito o levantamento do consumo de eletricidade de 9 modelos (Quadro O.6) classificados no Programa Brasileiro de Etiquetagem de 2018 (INMETRO, 2019).

Quadro O.6: Consumo de energia elétrica de máquinas de lavar roupa por ciclo de utilização na tensão de 127V

Marca	Modelo	Capacidade (kg)	Consumo de eletricidade (kWh/ciclo)	Tempo do ciclo (min)
Electrolux	21161JBA106	16	0,49	330
Electrolux	21161SBA106	16	0,49	330
Electrolux	21161RBA106	16	0,49	260
Panasonic	NA-F160B3WA	16	0,47	223
Panasonic	NA-FS160G3WA	16	0,47	205
Panasonic	NA-FS160P3XA	16	0,47	211
Panasonic	NA-F160P5WA	16	0,47	232
Panasonic	NA-F160P5XA	16	0,47	232
Consul	CWL16ABANA	16	0,46	270

Fonte: INMETRO (2019).

Como pode ser observado no Quadro O.6, os consumos de energia elétrica por ciclo de operação de máquinas de lavar de 16 kg estão em torno de 0,5 kWh/ciclo, tendo um tempo médio de ciclo de 254,8 min (4,25 h). Considerando 10 ciclos mensais, chega-se a conclusão de que uma máquina de lavar roupas consome aproximadamente **5 kWh/mês** de energia elétrica. A potência média de uma máquina de lavar pode ser obtida dividindo-se o consumo de energia por ciclo de operação pelo tempo gasto em cada ciclo, seguindo esse procedimento se obtém o valor de **117,6 W** de potência média.

O.5 – Determinação da potência média de aparelhos de televisão

Por meio de pesquisas na internet se verificou que os dez modelos mais vendidos de aparelhos de *Smart TV* no primeiro semestre de 2019 variaram entre as marcas LG e Samsung, conforme apresentado no Quadro O.7 (BERGHER, 2019).

Após a determinação dos modelos mais vendidos de *Smart TVs* se procedeu a determinação de correlação entre o tamanho da *Smart TV* e sua potência elétrica. Para tal, foram utilizados, como referência, dados do Programa Brasileiro de Etiquetagem de 2017 (INMETRO, 2017) referentes às potências de 96 modelos de *Smart TVs* da Samsung, conforme apresentado na Tabela O.2. A partir dos dados da Tabela O.2 plotou-se a reta de regressão apresentada na Figura O.3

Quadro O.7: Modelos de *Smart TV* mais vendidos no primeiro semestre de 2019

Posição	Marca	Modelo	Dimensão da TV
1º	Samsung	Samsung 49NU7100	49"
2º	LG	LG 32LV300C	32"
3º	Samsung	Samsung 55NU7100	55"
4º	Samsung	Samsung 40NU7100	40"
5º	LG	LG 43LK5750PSA	43"
6º	LG	LG 32LK615BPSB	32"
7º	Samsung	Samsung 50RU7100	50"
8º	LG	LG 50UK6520PSA	50"
9º	Samsung	Samsung 43RU7100	43"
10º	LG	LG 43UK6520PSA	43"

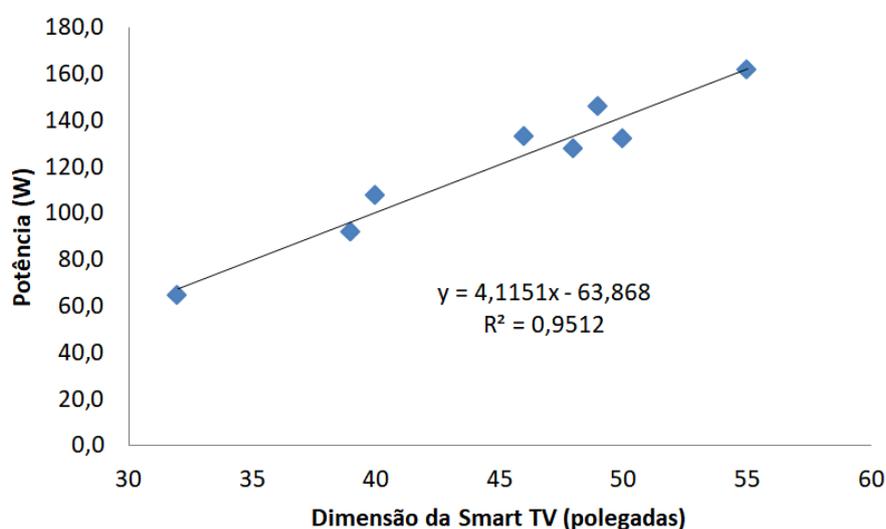
Fonte: Bergher (2019).

Tabela O.2: Correlação entre potência elétrica e dimensão da *Smart TV* para modelos da Samsung

Quantidade de modelos	Dimensão da <i>Smart TV</i>	Potência média dos modelos (W)
19	32"	64,9
2	39"	92,0
29	40"	107,9
21	46"	133,3
2	48"	128,0
5	49"	146,0
4	50"	132,5
14	55"	161,8

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados de INMETRO (2017).

Figura O.3: Correlação entre a dimensão da *Smart TV* e sua potência



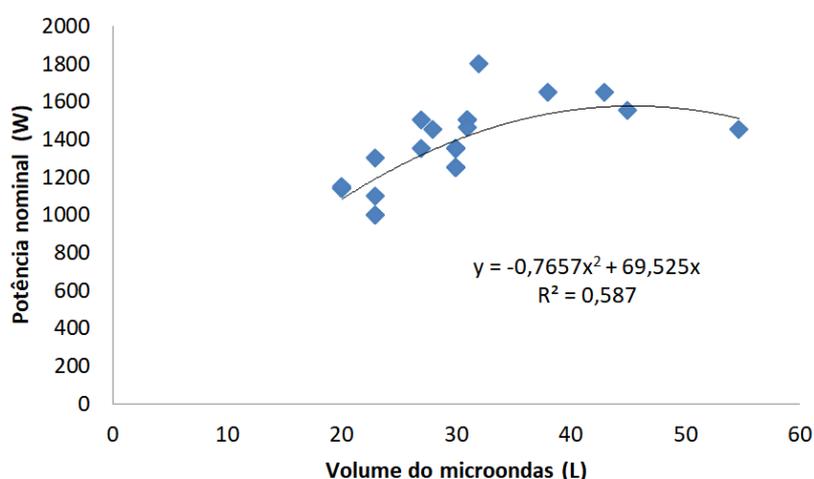
Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados de INMETRO (2017).

Considerando que a família do modelo de base de edifício residencial possui duas *Smart* TVs, sendo uma de 50" na sala e outra de 40" na suíte, e aplicando a equação de correlação linear apresentada na Figura O.3 pode-se estimar as potências das *Smart* TVs respectivamente em 142 W e 100 W.

O.6 – Determinação da potência elétrica média de aparelhos de microondas

Para a determinação da potência elétrica do aparelho de microondas foram estudados 32 modelos das marcas Electrolux e LG etiquetados pelo Programa Brasileiro de Etiquetagem em 2016 (INMETRO, 2016c). A Figura O.4 apresenta a curva de correlação obtida entre o volume dos aparelhos de microondas e sua respectiva potência elétrica nominal.

Figura O.4: Correlação entre a potência nominal e o volume de aparelhos de microondas das marcas Electrolux e LG



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados de INMETRO (2016c).

Considerando um aparelho de micro-ondas com volume de 30 L e utilizando-se a função de correlação apresentada na Figura O.4 estima-se uma potência em torno de 1400 W para o aparelho de micro-ondas da família do modelo de base de edifício residencial.

APÊNDICE P – Determinação da idade média e ganhos anuais de eficiência dos aparelhos eletrodomésticos de uma residência

Neste apêndice é realizada a estimativa da idade média dos aparelhos eletrodomésticos e ganhos anuais médios de eficiência energética baseando-se em dados do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL, 2007) e da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2016).

P.1 – Determinação da idade média dos aparelhos eletrodomésticos de uma residência

A partir de dados da pesquisa de posse e hábitos de consumo, realizada pelo programa nacional de conservação de energia elétrica em 2007 (PROCEL, 2007) sobre a idade média de aparelhos de ar condicionado, Geladeira, freezer e TV foi possível elaborar a distribuição das posses de aparelhos elétricos por faixas de idade, conforme apresentado no Quadro P.1.

Quadro P.1: Distribuição da posse de aparelhos eletrodomésticos por faixas de idade

Aparelhos/idade	0 a 5	6 a 10	11 a 15	> 16	ND
Geladeira	39,50%	37,40%	14,10%	7,90%	1,10%
Freezer	35,70%	52,80%	5,40%	1,70%	4,40%
Ar condicionado	47,20%	39,80%	3,60%	4%	5,40%
TV	44,90%	40,40%	7,20%	3,80%	3,70%
Valores médios					
Média	41,83%	42,60%	7,58%	4,35%	ND
Idade média	2,5	8,0	13,0	18,0	ND
Idade média global dos aparelhos = 6,5 anos					

Nota: ND – valor não definido (caso no qual o usuário desconhece a idade dos aparelhos eletrodomésticos de sua residência)

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados de PROCEL (2007).

No Quadro P.1 a idade média global dos aparelhos foi calculada por meio da média ponderada das idades médias de cada faixa considerando suas participações percentuais. A vida útil dos aparelhos foi considerada em 20 anos, desta forma, o valor médio para a faixa acima de 16 anos foi calculado em 18 anos.

P.2 – Determinação dos ganhos médios anuais de eficiência energética dos aparelhos eletrodomésticos de uma residência

A Empresa de Pesquisa Energética elaborou em 2016 um estudo sobre eficiência energética no qual faz previsões de ganhos de eficiência energética nos períodos de 2014 a 2019 e 2014 a 2024. Os resultados encontrados são apresentados na Tabela P.1.

Tabela P.1: Ganho de eficiência estimado em equipamentos eletrodomésticos em relação ao ano de 2014

Equipamento	2019	2024
Ar condicionado	3,4%	4,7%
Refrigerador	5,0%	6,9%
<i>Freezer</i>	7,6%	9,0%
Lâmpadas	40,4%	58,5%
Chuveiro elétrico	-1,9%	-4,6%
Máquina de lavar roupas	3,9%	5,9%
Televisão	2,9%	4,1%

Fonte: EPE (2016).

Os ganhos de eficiência apresentados na Tabela P.1 foram estimados em termos de consumo de energia, fator pelo qual o ganho de eficiência para chuveiros apresentou um resultado negativo, pois a Empresa de Pesquisa Energética supõe que os usuários tem a tendência de aumentar a aquisição de aparelhos de maior potência no intervalo de tempo estudado.

Para a determinação dos ganhos anuais médios de eficiência energética dos equipamentos eletrodomésticos no intervalo de tempo que vai de 2014 a 2019 foram excluídas as participações das lâmpadas, ar condicionado e chuveiro (por apresentar um ganho negativo) uma vez que no *EnergyPlus* as simulações dos sistemas de ar-condicionado, equipamentos eletrodomésticos e iluminação são feitas em objetos independentes. A organização dos dados relevantes e resultados que interessam à realização deste trabalho é feita no Quadro P2.

Quadro P.2: Média anual dos ganhos de eficiência energética dos equipamentos eletrodomésticos e impacto na redução da densidade de potência para o período que vai de 2014 a 2019

Ganhos médios anuais de eficiência de equipamentos eletrodomésticos	
Equipamento eletrodoméstico	Ganho médio anual de eficiência (%)
Refrigerador	1,00
Freezer	1,52
Máquina de lavar	0,78
Televisão	0,58
Valor médio dos ganhos anuais de eficiência energética = 0,86%/ano	
Cálculo do impacto dos ganhos de eficiência na densidade de potência	
Idade média dos equipamentos eletrodomésticos (anos)	6,50
Ganho de eficiência com substituição de aparelhos (%)	5,59
Densidade de potência antes da substituição (W/m^2)	50,00
Densidade de potência após a substituição (W/m^2)	47,20

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados de EPE (2016).

No Quadro P.2, o ganho de eficiência com a substituição dos equipamentos eletrodomésticos foi calculado por meio da multiplicação da idade média dos aparelhos (6,5 anos) pelo valor médio dos ganhos anuais de eficiência (0,86% /ano) no período de 2014 a 2019. A densidade de potência após a substituição de equipamentos eletrodomésticos ($47,2 W/m^2$) foi calculada descontando-se os ganhos de eficiência com substituição de aparelhos eletrodomésticos (5,6%) da densidade de potência antes da substituição ($50,0 W/m^2$).

APÊNDICE Q – Características de equipamentos de ar condicionado

Neste apêndice é apresentada a definição de alguns termos relacionados aos sistemas de ar condicionado bem como algumas características operacionais destes.

Q.1 – Sistema de ar condicionado tipo *split* convencional e *inverter*

De acordo com FRIGELAR (2019), para aplicações de pequeno porte o modelo mais comumente empregado de ar condicionado é o “*split high wall*”. O termo “*split*” se refere ao aparelho de ar condicionado que é dividido em duas unidades, sendo uma unidade interna (também chamada de evaporadora), na qual ocorre o processo de evaporação do fluido refrigerante e uma unidade externa (também chamada de condensadora), na qual ocorre a condensação do gás refrigerante.

Os dois equipamentos (unidade evaporadora e condensadora) são interligados por meio de tubulações refrigerantes. Os sistemas de ar condicionado tipo *split* apresentam as seguintes vantagens (BRASIL, 2015):

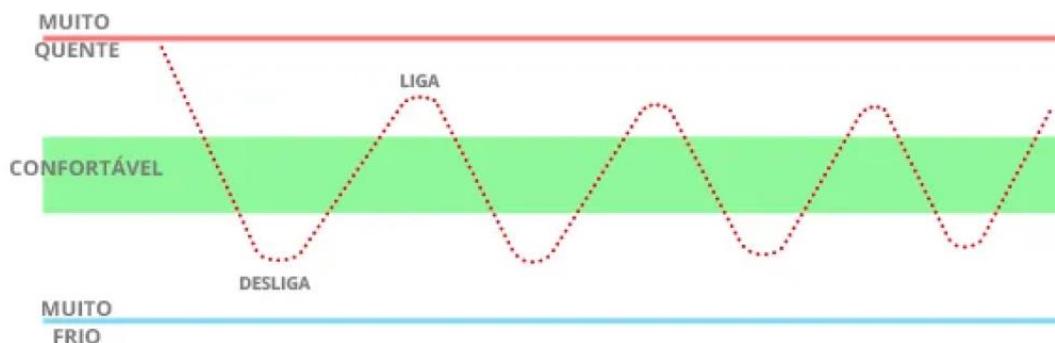
- Menor nível de ruído em virtude da distância em que se pode instalar a unidade condensadora externa;
- Instalação adaptável a ambientes em que não é possível a instalação de um ar condicionado convencional (tipo janela).

Algumas desvantagens do sistema *split* destacadas por BRASIL (2015) são:

- Maior possibilidade de vazamentos de fluido refrigerante quando comparado ao sistema de janela;
- Necessidade de cuidado com as tubulações refrigerantes e com o dreno de água.

Os aparelhos de ar-condicionado tipo *split* são fabricados em duas diferentes tecnologias, denominadas “convencional” e “*inverter*”. As diferenças entre estas duas tecnologias estão nos componentes internos da unidade condensadora. No ar-condicionado convencional o compressor opera de forma intermitente ligando e desligando conforme as configurações de temperatura do termostato, esse processo ocasiona maior oscilação de temperatura (FRIGELAR, 2019), conforme pode ser observado na Figura Q.1.

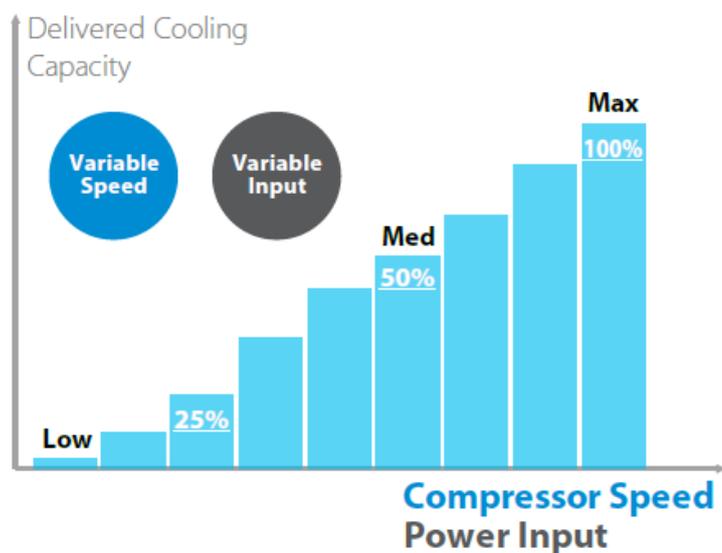
Figura Q.1: Oscilação de temperatura nos modelos convencionais de ar condicionado



Fonte: Frigelar (2019).

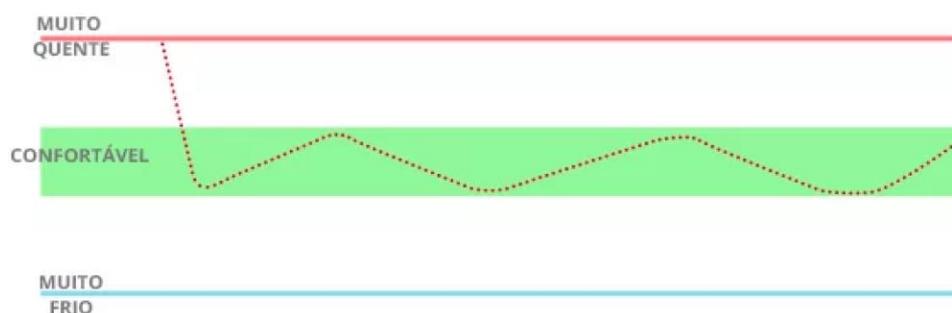
No ar condicionado com a tecnologia *inverter* há uma placa eletrônica que controla a frequência da corrente elétrica fornecida ao motor do compressor, variando, desta forma, sua velocidade de rotação (FIGURA Q.2). Esta tecnologia dispensa a necessidade de operação intermitente, levando a uma maior economia de energia elétrica e menor oscilação da temperatura em relação aos modelos convencionais, conforme por ser observado na Figura Q.3.

Figura Q.2: Variações de rotação típicas do compressor de um equipamento de ar condicionado com a tecnologia *inverter*



Fonte: Daikin (2018).

Figura Q.3: Oscilação de temperatura nos modelos de ar condicionado com a tecnologia *inverter*



Fonte: Frigelar (2019).

Segundo DAIKIN (2018), as economias de energia elétrica com a utilização de um equipamento de ar condicionado com a tecnologia *inverter* atingem valores tipicamente na faixa de 30 a 50% em relação a equipamentos convencionais de rotação fixa.

Outra vantagem dos modelos de ar condicionado com a tecnologia *inverter* é o menor tempo de atingimento da temperatura desejada, isto ocorre devido ao fato do fluido refrigerante circular com maior pressão no aparelho, o que provoca uma melhor troca de calor. A tecnologia *inverter* também apresenta vantagens ambientais pois, além da economia de energia elétrica em relação aos modelos convencionais, se utiliza o gás refrigerante R410a, o qual não agride a camada de ozônio; já nos modelos convencionais existe a possibilidade de utilização do gás refrigerante R22, o qual agride a camada de ozônio (FRIGELAR, 2019).

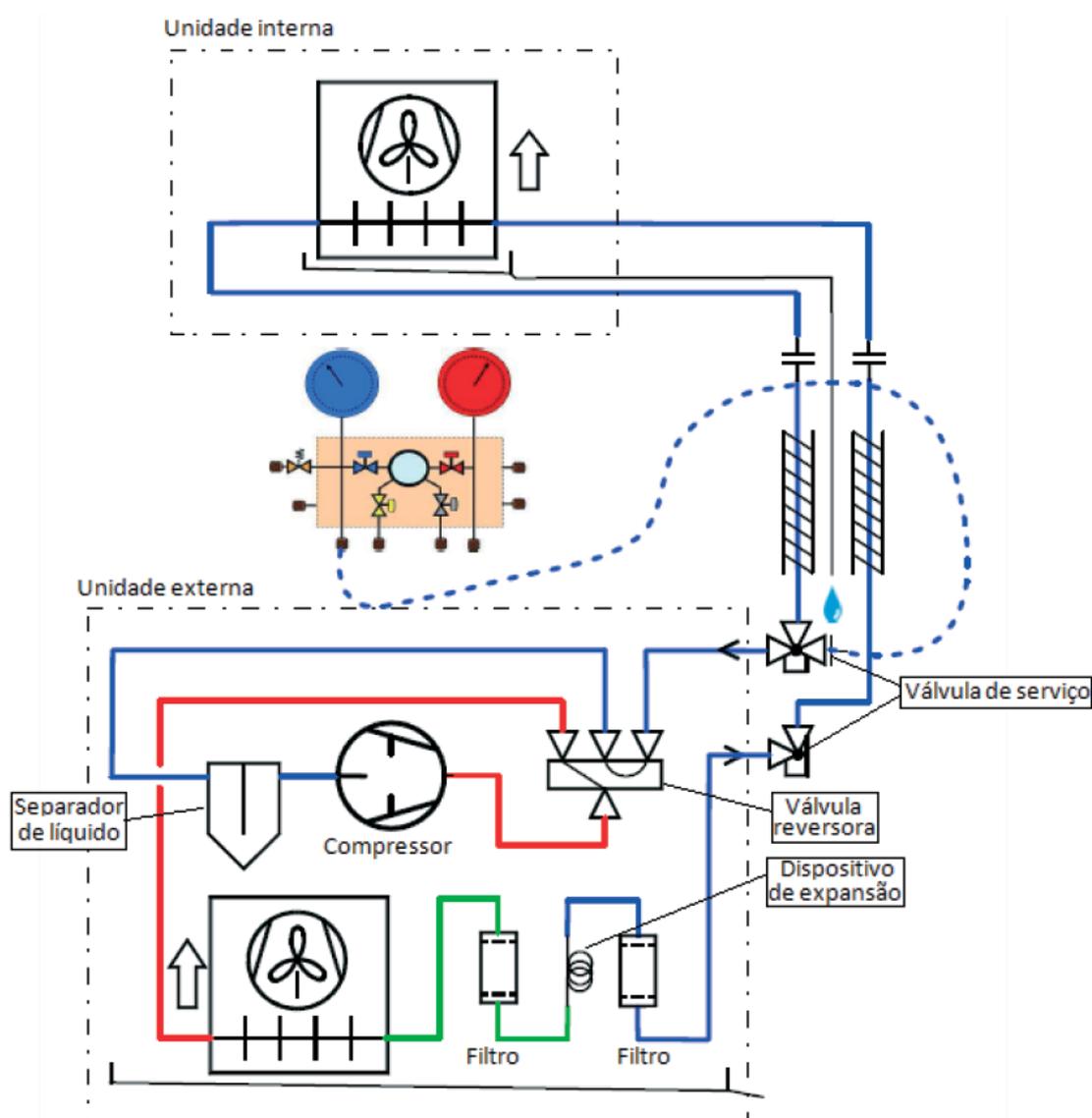
Q.2 – Sistema de ar condicionado de ciclo reverso

Atualmente no mercado podem ser encontrados aparelhos de ar condicionado nas versões de ciclo frio e ciclo quente e frio. Normalmente os consumidores de regiões quentes do Brasil como Norte, Nordeste e Centro Oeste, optam pela versão de ciclo frio; já consumidores das regiões Sul e Sudeste normalmente optam pela versão de ciclo quente e frio (FRIGELAR, 2019). O equipamento de ar condicionado que pode operar removendo calor do ambiente ou adicionando calor ao ambiente (bomba de calor) é chamado de ar condicionado de ciclo reverso.

Este tipo de aparelho contém, além dos componentes convencionais de um aparelho de ciclo frio, uma válvula reversora, cuja função é inverter o sentido do ciclo de refrigeração, fazendo com que os trocadores de calor das unidades interna e externa possam operar tanto como evaporador quanto como condensador. As Figuras Q.4 e Q.5 apresentam circuitos

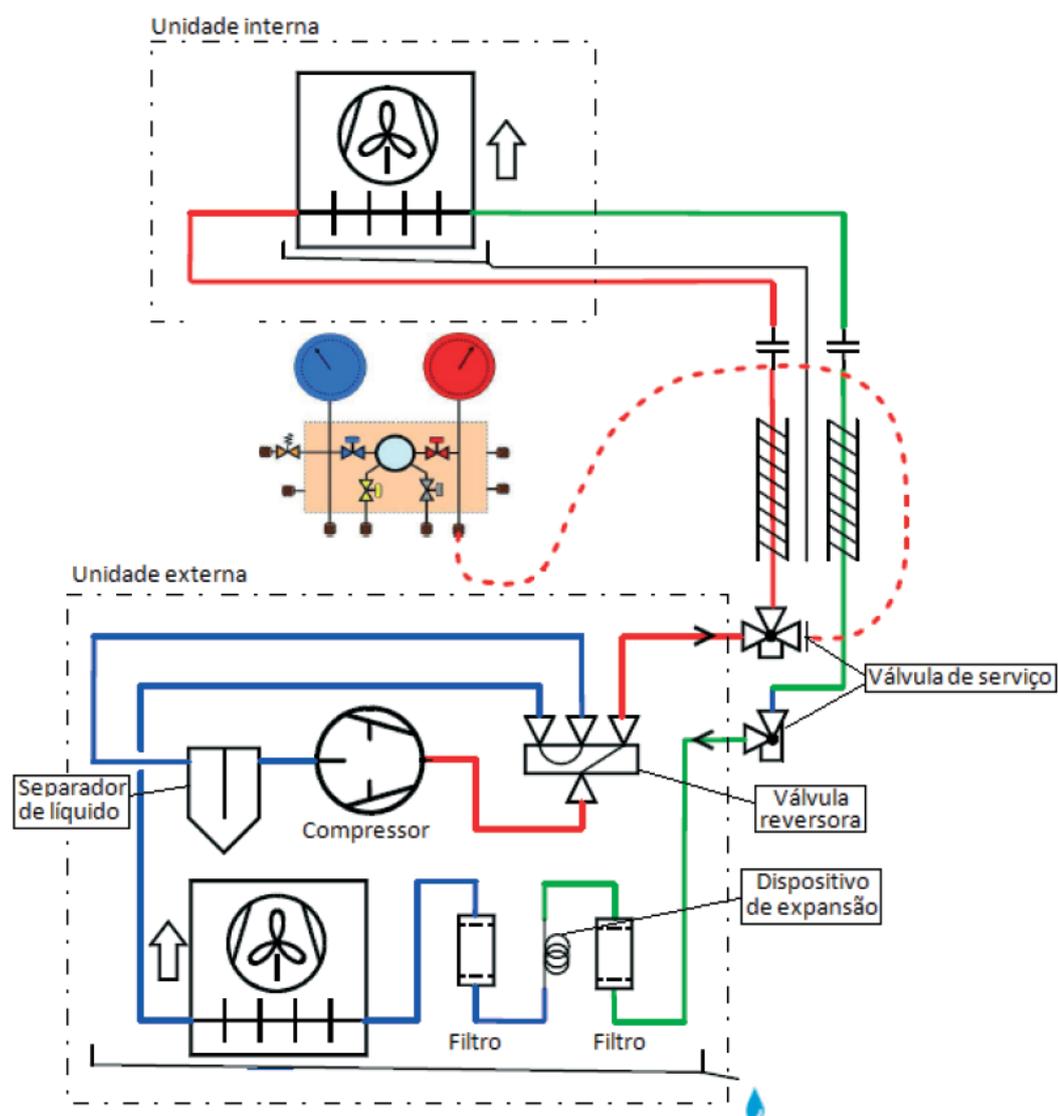
esquemáticos de um aparelho de ar condicionado operando, respectivamente, no ciclo de refrigeração e ciclo de aquecimento.

Figura Q.4: Equipamento de ar condicionado de ciclo reverso operando em ciclo de refrigeração



Fonte: BRASIL (2015).

Figura Q.5: Equipamento de ar condicionado de ciclo reverso operando em ciclo de aquecimento



Fonte: BRASIL (2015).

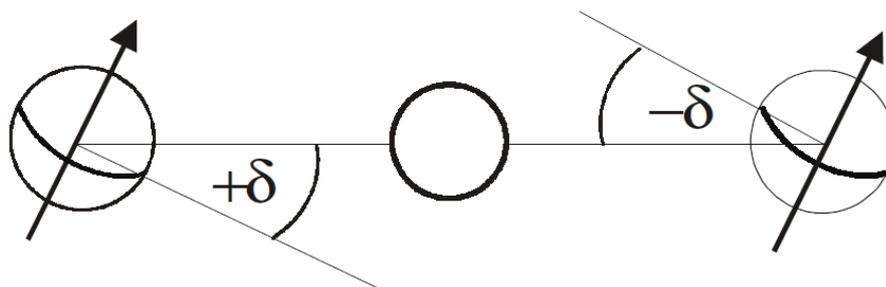
APÊNDICE R – Estudo de otimização para a instalação de painéis fotovoltaicos no telhado do modelo base de edifício residencial

Neste apêndice é feita a definição de variáveis úteis para a simulação da geração fotovoltaica no *EnergyPlus*.

R.1 – Definição de ângulos de posicionamento solar

De acordo com Eicker (2003), a declinação da Terra em sua órbita ao redor do sol é definida como sendo o ângulo (δ) entre o plano equatorial e o plano da eclíptica, conforme apresentado na Figura R.1.

Figura R.1: Definição do ângulo de declinação da Terra em sua órbita ao redor do sol



Fonte: Eicker (2003).

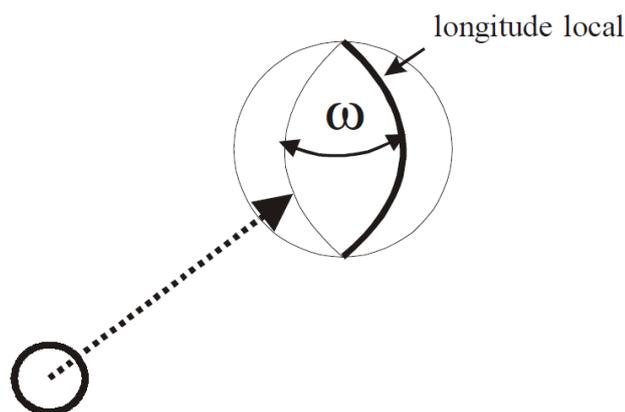
A declinação pode ser calculada pela expressão de aproximação apresentada na equação (R.1).

$$\delta = 23,45 \cdot \text{sen} \left[\frac{360}{365} (284 + n) \right] \quad (\text{R.1})$$

Em que n representa o dia do ano contado de 1 a 365.

Outro ângulo de grande importância para o estudo da instalação de placas fotovoltaicas é o ângulo horário (ω), definido como o ângulo entre a longitude local e a longitude de incidência solar normal ao plano horizontal, conforme apresentado na Figura R.2.

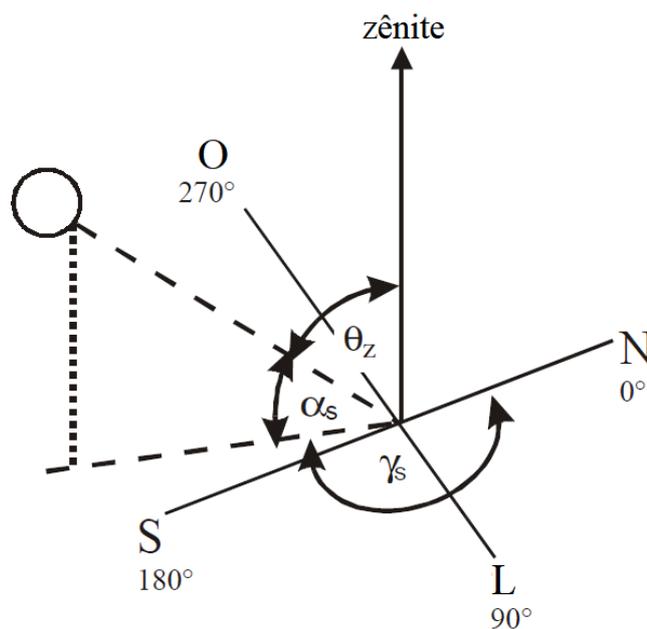
Figura R.2: Definição do ângulo horário



Fonte: Eicker (2003).

Ao meio dia local verdadeiro o sol está em sua mais alta posição no céu e o ângulo horário tem valor nulo ($\omega = 0^\circ$). O posicionamento do sol no céu diurno pode ser feito pela definição de dois outros ângulos: ângulo de elevação solar (α_s) e ângulo de azimute solar (γ_s), conforme apresentado na Figura R.3.

Figura M.3: Definição dos ângulos de posicionamento solar diurno



Fonte: Eicker (2003).

Para a determinação da altura do sol pode-se utilizar o ângulo de elevação solar (α_s), definido como o ângulo entre a direção de incidência dos raios solares e o plano horizontal, ou o ângulo de zênite (θ_z), o qual é o complementar do ângulo de elevação, conforme apresentado na Figura R.3.

A relação entre os ângulos de elevação solar (α_s), latitude local (φ), declinação (δ) e ângulo horário (ω) é apresentada na equação (R.2).

$$\text{sen}(\alpha_s) = \text{sen}(\delta) \cos(\varphi) + \cos(\delta) \cos(\varphi) \cos(\omega) \quad (\text{R.2})$$

Para o tempo solar verdadeiro igual a 12h00min o ângulo de azimute do sol (γ_s) pode ser determinado por meio da equação (R.3).

$$\gamma_s = 180^\circ - \arccos \left[\frac{\text{sen}(\alpha_s) \text{sen}(\varphi) - \text{sen}(\delta)}{\cos(\alpha_s) \cos(\varphi)} \right] \quad (\text{R.3})$$

O ângulo de incidência da radiação solar sobre uma superfície inclinada pode ser determinado por meio da equação (R.4).

$$\cos(\theta) = \cos(\theta_z) \cos(\beta) + \text{sen}(\theta_z) \text{sen}(\beta) \cos(\gamma_s - \gamma) \quad (\text{R.4})$$

Considerando os solstícios de inverno e verão no hemisfério sul, para os quais a declinação (δ) é, respectivamente, de 23,45 e -23,45°, e adotando o tempo solar verdadeiro igual a 12h00min ($\omega = 0^\circ$) para a cidade de Taubaté, na qual a latitude vale -23,03°, pode-se determinar o ângulo de incidência da radiação solar (θ) sobre uma placa fotovoltaica com quaisquer valores de ângulo de inclinação (β) e azimute (γ) empregando-se as equações R.2, R.3 e R.4.

Os valores de ângulos de posicionamento e incidência de radiação solar empregados neste trabalho como referência para a determinação da melhor inclinação das placas fotovoltaicas e determinação do efeito de sombreamento entre placas são apresentados no Quadro R.1.

Quadro R.1: Ângulos de posicionamento e incidência de radiação solar sobre as placas fotovoltaicas

Coordenadas geográficas da cidade de Taubaté	
Latitude = $-23,03^\circ$	Longitude = $-45,56^\circ$
Ângulos de posicionamento solar nos solstícios de verão e inverno ao meio dia local verdadeiro	
Verão	Inverno
$\delta = -23,45^\circ$	$\delta = 23,45^\circ$
$\omega = 0^\circ$	$\omega = 0^\circ$
$\alpha_s = 89,58^\circ$	$\alpha_s = 43,52^\circ$
$\theta_z = 0,42^\circ$	$\theta_z = 46,48^\circ$
$\gamma_s = 0^\circ$	$\gamma_s = 0^\circ$
Ângulos de posicionamento das placas fotovoltaicas	
$\beta = 23^\circ$	$\gamma = 0^\circ$
Ângulos de incidência da radiação solar sobre as placas fotovoltaicas ao meio dia local verdadeiro nos solstícios de verão e inverno	
verão	inverno
$\theta = 23,42^\circ$	$\theta = 23,48^\circ$

Fonte: Elaborado pelo autor.

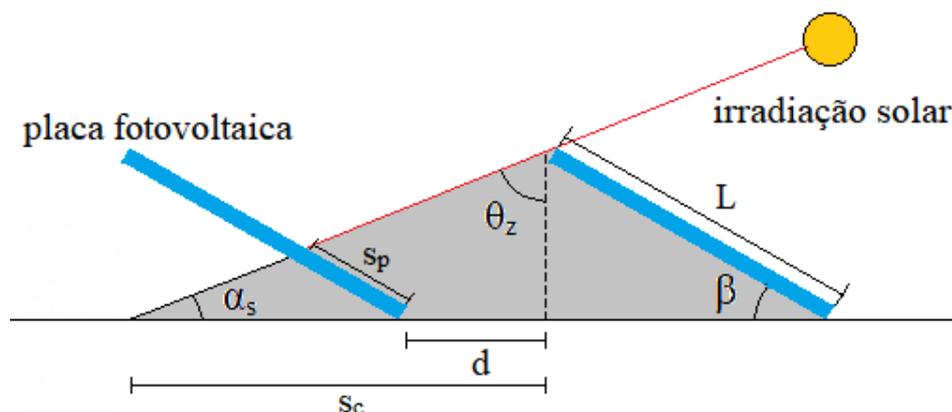
O ângulo de inclinação das placas, igual a 23° , foi escolhido de modo a dividir igualmente a região angular varrida pela radiação solar ao longo do ano em relação à direção normal das placas fotovoltaicas como indicado no Quadro R.1.

R.2 – Cálculo do efeito de sombreamento entre painéis fotovoltaicos vizinhos

O distanciamento entre painéis fotovoltaicos em um arranjo é um fator crucial para maximizar o aproveitamento da radiação solar. Painéis alocados com excessiva proximidade podem sombrear demasiadamente painéis vizinhos no período de inverno (no qual a elevação solar apresenta os menores valores do ano). Painéis fotovoltaicos alocados muito distantes entre si podem não proporcionar o melhor aproveitamento da superfície de instalação, desperdiçando espaço disponível para a geração de energia elétrica.

A Figura R.4 apresenta uma situação de sombreamento entre placas fotovoltaicas vizinhas.

Figura R.4: Sombreamento entre placas fotovoltaicas vizinhas



Fonte: Elaborado pelo autor.

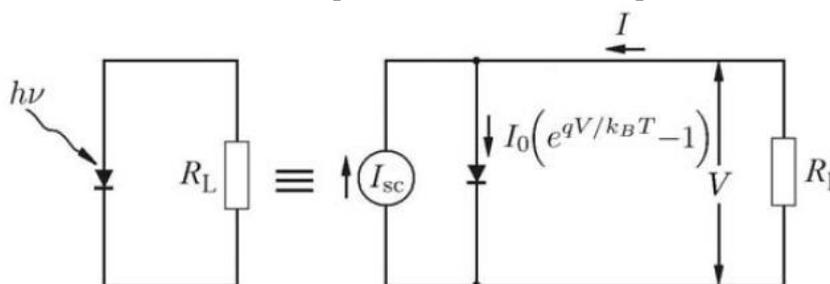
Na Figura R.4 , L é o comprimento da placa fotovoltaica, S_p é o comprimento do sombreamento sobre a placa vizinha, S_c é a projeção do sombreamento da placa no chão e d é o distanciamento entre placas. A expressão que permite calcular o sombreamento entre placas vizinhas é apresentada na equação (R.5).

$$S_p = \frac{L \cdot \sin(\beta) \cdot \tan(\theta_z) - d}{\sin(\beta) \cdot \tan(\theta_z) + \cos(\beta)} \quad (\text{R.5})$$

R.3 – Modelo equivalente de um diodo para células fotovoltaicas

De acordo com Chen (2011), uma célula fotovoltaica pode ser representada como uma fonte de corrente conectada em paralelo com um diodo de junção pn, conforme apresentado na Figura R.5.

Figura R.5: Circuito do modelo equivalente de um diodo para células fotovoltaicas



Fonte: Chen (2011).

O equacionamento para a corrente (I) é apresentado na equação (R.6).

$$I = I_{sc} - I_0 \left(e^{\frac{q \cdot V}{k_B T}} - 1 \right) \quad (\text{R.6})$$

Em que:

I_{sc} : Corrente de curto circuito

I_0 : Corrente de saturação do diodo (depende das características de difusão de elétrons e vazios na junção pn)

q : Carga elétrica do elétron ($1,602 \cdot 10^{-19}$ C)

k_B : Constante de Boltzmann ($1,381 \cdot 10^{-23}$ m² kg s⁻² K⁻¹)

T : Temperatura da célula em Kelvin

A partir da equação (R.6) é possível derivar outras equações (CHEN, 2011) importantes para a definição do modelo equivalente de um diodo, como a corrente de curto circuito (I_{sc}), a tensão de circuito aberto (V_{oc}), a tensão no ponto de máxima potência (V_{mp}), a corrente no ponto de máxima potência (I_{mp}), a potência máxima (P_{mp}) e o fator de preenchimento (F), apresentados, respectivamente nas equações (R.7), (R.8), (R.9), (R.10), (R.11) e (R.12).

$$I_{sc} = I_0 \left(e^{\frac{q \cdot V_{oc}}{k_B T}} - 1 \right) \quad (\text{R.7})$$

$$V_{oc} = \frac{k_B T}{q} \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_0} \right) \quad (\text{R.8})$$

$$V_{\text{mp}} = V_{\text{oc}} \left(1 - \frac{\ln \ln \left(\frac{I_{\text{sc}}}{I_0} \right)}{\ln \left(\frac{I_{\text{sc}}}{I_0} \right)} \right) \quad (\text{R.9})$$

$$I_{\text{mp}} = I_{\text{sc}} \left(1 - \frac{1}{\ln \left(\frac{I_{\text{sc}}}{I_0} \right)} \right) \quad (\text{R.10})$$

$$P_{\text{mp}} = I_{\text{mp}} \cdot V_{\text{mp}} \quad (\text{R.11})$$

$$F = \frac{I_{\text{mp}} V_{\text{mp}}}{V_{\text{oc}} I_{\text{sc}}} \quad (\text{R.12})$$