

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo
Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo



Dissertação

Avaliação da relação entre eficiência energética e geração própria no ciclo de vida do edifício

Leno Pôrto Dutra

Pelotas, 2020

Leno Pôrto Dutra

Avaliação da relação entre eficiência energética e geração própria no ciclo de vida do edifício

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Isabel Tourinho Salamoni

Coorientador: Prof. Dr. Eduardo Grala da Cunha

Pelotas, 2020

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

D978a Dutra, Leno Pôrto

Avaliação da relação entre eficiência energética e geração própria no ciclo de vida do edifício / Leno Pôrto Dutra ; Isabel Tourinho Salamoni, orientadora ; Eduardo Grala da Cunha, coorientador. — Pelotas, 2020.

167 f. : il.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas, 2020.

1. Ciclo de vida. 2. Eficiência energética. 3. Geração própria. 4. NZEB. I. Salamoni, Isabel Tourinho, orient. II. Cunha, Eduardo Grala da, coorient. III. Título.

CDD : 720.2

Leno Pôrto Dutra

Avaliação da relação entre eficiência energética e geração própria no ciclo de vida do edifício.

Dissertação aprovada, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Arquitetura e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas.

Data da defesa: 31 de janeiro de 2020.

Banca examinadora:

Prof^a. Dr^a. Isabel Tourinho Salamoni (orientadora)
Doutora em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Eduardo Grala da Cunha (coorientador)
Doutor em Arquitetura pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof^a. Dr^a. Celina Maria Britto Correa
Doutora em Arquitetura pela Universidade Politécnica de Madrid

Prof. Dr. Fábio Kellermann Schramm
Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof^a. Dr^a. Ísis Portolan dos Santos
Doutora em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Santa Catarina

**Para Janice, “não és sequer a razão do meu
viver, pois que tu és já toda a minha vida.”
(Fagner)**

Agradecimentos

A Deus e aos meus pais (*in memoriam*) Ariovaldo e Dúlvia, pelo dom da vida.

À minha esposa Janice, por estar sempre ao meu lado me apoiando e muitas vezes me guiando por escolhas difíceis.

Aos meus filhos Helena e Henrique, por me proporcionarem momentos felizes, de amor e de diversão em todos os dias da minha vida.

À minha sogra Geni, pelo apoio incondicional transformado principalmente em amoroso cuidado com os netos, o que incontáveis vezes me permitiu pesquisar em vez de dar-lhes atenção.

Aos meus cunhados Joice e Francisco, e sobrinha Sophie, pela amizade, carinho e por servirem de inspiração pessoal.

À professora Nirce Medvedovski, enquanto coordenadora do PROGRAU, pela confiança e auxílio no meu ingresso no programa.

Aos meus orientadores, por me converterem de engenheiro pragmático em pesquisador, abrindo minha mente para a investigação e me tornando parte desse fantástico universo que é a comunidade científica.

A todos os professores e colegas do PROGRAU, com quem adquiri muito aprendizado e compartilhei experiências acadêmicas que mudaram definitivamente minha visão profissional e criaram novas perspectivas em mim.

Aos membros da banca avaliadora, pelas relevantes contribuições para o aprimoramento e consolidação do meu trabalho.

À Sra. Cristiane Miritz, responsável pela Secretaria do PROGRAU, pelo gentil apoio administrativo, várias vezes necessário durante o curso.

Aos meus chefes e gerente na CEEE, Leonardo Palma Leitzke, José Luiz de Lima Manso e Alexandre Madruga de Ávila, pelo apoio me propiciando assistir às aulas e participar de eventos vinculados ao programa.

Aos colegas de trabalho na CEEE que supriram essas ausências, assumindo parte das minhas tarefas.

Aos autores a quem citei, àqueles a quem eles citaram e assim, sucessivamente, a todos que contribuíram com a base teórica sobre a qual edifiquei meu conhecimento a respeito do tema desta dissertação.

Não apenas a pobreza é um mal em si, mas o desenvolvimento sustentável exige o atendimento das necessidades básicas e a extensão, a todos, das oportunidades de realizar suas aspirações por uma vida melhor.

Organização das Nações Unidas

Resumo

DUTRA, Leno Pôrto. **Avaliação da relação entre eficiência energética e geração própria no ciclo de vida do edifício**. Orientadora: Isabel Tourinho Salamoni. Coorientador: Eduardo Grala da Cunha. 2020. 157 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2020.

A demanda por energia para uso nas edificações representa, em todo o mundo, uma das maiores parcelas do gasto energético total. No Brasil, mais da metade da eletricidade é usada dessa maneira. Para preservar os recursos naturais é imprescindível que o consumo de energia gerada por fontes não renováveis seja reduzido ao estritamente necessário, sem desperdícios. Isso pode ser obtido por ações de uso eficiente da energia ou por sua geração, através de fontes renováveis, preferencialmente no próprio local de consumo. O problema de pesquisa deste trabalho refere-se à busca do ponto de equilíbrio entre essas ações. Como se pode avaliar a melhor relação entre elas? A hipótese explorada nesta pesquisa foi de que uma avaliação energética ao longo de todo o ciclo de vida de um edifício é capaz de responder a esta pergunta, através do balanço entre a melhoria da capacidade de evitar perdas e de produzir energia, conjugada com o aumento da energia incorporada que essas ações acrescentam à edificação. O objetivo da pesquisa foi propor um método avaliativo que possa ser utilizado para a tomada de decisão entre elas, visando à obtenção do ponto de equilíbrio. O método adotado consiste na obtenção de modelos de prédios unifamiliares brasileiros e dos valores de energia incorporada nos materiais e sistemas que os compõem; na simulação do consumo operacional e da produção de energia no local; e na variação de parâmetros a fim de obter-se a melhor relação entre a eficiência e a geração. Para esta, somente a fonte solar fotovoltaica foi considerada. Os modelos escolhidos representam uma casa com características de ineficiência e outra que poderia ser classificada como *Passive House* (PH). Os resultados mostraram estimativa de consumo operacional de 59,7 kWh/(m².a) e de energia incorporada de 42 kWh/(m².a) para o modelo ineficiente (modelo 1) sem geração própria, totalizando 101,7 kWh/(m².a) no ciclo de vida desse modelo. Enquanto isso, o modelo PH (modelo 2) apresentou 33,6 kWh/(m².a) no consumo operacional e 55 kWh/(m².a) na energia incorporada, totalizando 88,6 kWh/(m².a) no seu ciclo de vida. Ao inserir geração fotovoltaica, ambos modelos tornaram-se edifícios com energia líquida nula, ou seja, *net zero-energy building* (NZEB), sem ocupar toda a área disponível para os módulos fotovoltaicos. Mesmo com o incremento de energia incorporada dado pelo melhor isolamento da envoltória e pelo sistema fotovoltaico, a produção de energia por este predominou e reduziu o consumo total no ciclo de vida. Destes resultados depreendeu-se que a abundância de radiação solar incidente no território brasileiro torna possível obter NZEB e até superávit energético em unidades habitacionais unifamiliares no Brasil, mesmo que os princípios bioclimáticos tenham sido negligenciados. Apesar disto, o trabalho concluiu pela necessidade de conjugar a eficiência no uso da energia com a geração própria, de forma a não desperdiçar os recursos naturais, pois outras tipologias de edificações, em outras condições de entorno, podem não ter a mesma sustentabilidade e, por isso, demandarem o uso de energia gerada a partir de fontes não renováveis.

Palavras-chave: Ciclo de vida. Eficiência energética. Geração própria. NZEB.

Abstract

DUTRA, Leno Pôrto. **Assessment of the relation between energy efficiency and consumer's generation in the building's life cycle**. Primary Supervisor: Isabel Tourinho Salamoni. 2nd Supervisor: Eduardo Grala da Cunha. 2020. 157 p. Dissertation (Master of Architecture and Urbanism) – College of Architecture and Urbanism, Federal University of Pelotas, Pelotas, 2020.

The energy demand for use in buildings has one of the largest shares of total energy expenditure worldwide. In Brazil, it represents more than half the total consumption of electricity. In order to conserve natural resources, it is essential to avoid waste thus minimise energy consumption from non-renewable sources. This can be achieved by energy efficiency actions or by its generation through renewable sources, preferably at the own local of consumption. This work's research problem refers to a search for the balance between these actions. How can one evaluate the best relation between them? The hypothesis explored in this research was that an energy evaluation over the entire life cycle of a building can answer this question by balancing the improvement of the building to avoid energy losses and to produce energy, coupled with the increase in embodied energy that these actions add to the building. The aim of the research was to propose an evaluative method that can be used for decision-making among them, targeting the equilibrium point. The adopted method consists in obtaining models of Brazilian single-family buildings and the values of embodied energy of the materials and systems that compose them; simulating operational consumption and onsite energy production; and in the variation of parameters in order to obtain the best relation between efficiency and generation. For this, only the photovoltaic solar source was considered. The models chosen represent a house with inefficient characteristics and another that could be classified as Passive House (PH). The results showed an estimated operational consumption of 59.7 kWh/(m².a) and embodied energy of 42 kWh/(m².a) for the inefficient model (model 1) without generation, totalling 101.7 kWh/(m².a) in the life cycle of this model. Meanwhile, the PH model (model 2) showed 33.6 kWh/(m².a) in operating consumption and 55 kWh/(m².a) in embodied energy, totalling 88.6 kWh/(m².a) in its life cycle. When owning photovoltaic generation, both models became net zero-energy buildings (NZEB), without occupying all the available area for the photovoltaic modules. Even with the increase in the embodied energy given by the better insulation of the envelope and the photovoltaic system, the energy produced by this system predominated and reduced the total consumption in the life cycle. These results show that the abundance of solar radiation incident in the Brazilian territory makes it possible to get NZEB status and even energy surplus in single-family houses in Brazil, even if bioclimatic principles are neglected. In spite of this, this work concluded that there is a need to combine energy efficiency with local generation, to avoid wasting natural resources, because other types of buildings, under different conditions, could not be as sustainable as the studied ones and therefore require the use of energy generated from non-renewable sources.

Keywords: Life cycle. Energy efficiency. Consumer's generation. NZEB.

Lista de Figuras

Figura 1 – Gráfico de participações estimadas de fontes primárias no consumo mundial de energia.....	19
Figura 2 – Gráfico da oferta interna de energia por fonte primária no Brasil.	20
Figura 3 – Gráfico da oferta interna de energia elétrica por fonte primária no Brasil.	21
Figura 4 – Quadro indicativo do ciclo de vida da edificação com detalhamento das fases, suas parcelas de energia e das extensões temporais que podem ser consideradas na análise.....	39
Figura 5 – Gráfico da relação entre os indicadores de energia anualizada para formar as condições de enquadramento de um LC-ZEB, que deve situar-se no quarto quadrante, de forma a atender à equação $EO + EI = 0$	42
Figura 6 – Quadro indicativo da organização do método pelos objetivos específicos.	64
Figura 7 – Fluxograma do trabalho.	65
Figura 8 – Planta do modelo 1.	67
Figura 9 – Quadro de características físicas do modelo 1.....	68
Figura 10 – Planta do modelo 2.	69
Figura 11 – Quadro de características físicas do modelo 2.....	69
Figura 12 – Quadro comparativo entre os métodos para estimar a energia operacional.....	78
Figura 13 – Desenhos dos modelos 1 (esquerda) e 2 (direita) elaborados no <i>SketchUp</i> com <i>plugin Euclid</i>	79
Figura 14 – Gráfico de temperaturas médias externas.	89
Figura 15 – Localização de Pelotas no mapa bioclimático brasileiro.	90
Figura 16 – Gráfico dos consumos de energia operacional do modelo 1 por uso final.	100
Figura 17 – Gráfico comparativo das estimativas do <i>Radiasol</i> e <i>EnergyPlus</i> com o registro do caso real adotado como base para validação.	103
Figura 18 – Gráfico comparativo dos desvios entre as estimativas do <i>Radiasol</i> e <i>EnergyPlus</i> em relação à energia gerada pelo caso real adotado como base para validação.	103
Figura 19 – Gráfico dos consumos de energia a cada incremento de módulos FV no modelo 1.....	105

Figura 20 – Gráfico dos consumos de energia operacional do modelo 2 por uso final.	106
Figura 21 – Gráfico dos consumos de energia a cada incremento de módulos FV no modelo 2.....	108
Figura 22 – Gráfico comparativo dos consumos de energia dos modelos sem geração.	109
Figura 23 – Gráfico comparativo de energia operacional dos modelos.....	110
Figura 24 – Gráfico comparativo de energia incorporada aos modelos.	111
Figura 25 – Gráfico comparativo dos consumos totais de energia no ciclo de vida dos modelos.....	112
Figura 26 – Gráfico comparativo dos resultados gerais de consumo e geração pelos dois modelos.	114

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Metas de energia primária por zona climática na Europa. Para cada zona, a primeira faixa corresponde aos escritórios e a segunda às habitações unifamiliares novas.....	36
Tabela 2 – Síntese dos resultados obtidos por trabalhos pesquisados que publicaram estimativas de consumo energético.....	48
Tabela 3 – Discriminação das fases e etapas com respectivos valores de energia incorporada e operacional para o modelo 1, com seus valores originais.	71
Tabela 4 – Energia incorporada inicial nos principais materiais utilizados no modelo 1.	72
Tabela 5 – Energia incorporada total, exceto pós-uso, nos principais materiais utilizados no modelo 1.....	72
Tabela 6 – Energia incorporada por etapas no modelo 1.....	73
Tabela 7 – Energia incorporada inicial nos principais materiais utilizados no modelo 2.	74
Tabela 8 – Energia incorporada por etapas no modelo 2.....	75
Tabela 9 – Parâmetros de ACVE de sistemas FV.....	76
Tabela 10 – Energia incorporada ao sistema de geração própria.....	77
Tabela 11 - Parâmetros construtivos do modelo 1.	81
Tabela 12 - Parâmetros construtivos do modelo 2.	82
Tabela 13 – Parâmetros óticos dos vidros ID 102 (monolítico 3 mm), ID 9803 (monolítico 5 mm) e ID 9923 (<i>Low-E</i> 5 mm) utilizados nas janelas dos modelos adotados.....	83
Tabela 14 – Parâmetros dos caixilhos utilizados nas janelas dos modelos adotados.	84
Tabela 15 – Agenda de ocupação para zonas de permanência prolongada.....	84
Tabela 16 – Agenda de uso da iluminação para zonas de permanência prolongada.	85
Tabela 17 – Parâmetros para configuração da ventilação natural.	87
Tabela 18 – Temperaturas do solo.....	88
Tabela 19 – Condições climáticas e informações geográficas de Pelotas.	88
Tabela 20 – Limites máximos de área de cobertura a ocupar com os módulos FV, por modelo.	91

Tabela 21 – Dimensões e parâmetros elétricos do módulo FV.	91
Tabela 22 – Número máximo de módulos FV e área do painel por modelo.	92
Tabela 23 – Irradiação solar média diária incidente sobre plano inclinado a 32°, sem desvio azimutal em relação ao Norte, localizado em Pelotas.	96
Tabela 24 – Radiação solar média mensal e acumulada anual, incidente sobre plano inclinado a 32°, sem desvio azimutal em relação ao Norte, localizado em Pelotas. .	96
Tabela 25 – Produção de energia elétrica em valores secundários por modelo, estimada com uso do Radiasol.	97
Tabela 26 – Consumo energético do modelo 1 original, com a energia operacional (EO) em valor secundário.	98
Tabela 27 – Consumo energético do modelo 1 original, com a energia operacional (EO) em valor primário.	99
Tabela 28 – Energia operacional do modelo 1 por uso final.	99
Tabela 29 – Tempo em desconforto térmico.	101
Tabela 30 – Produção de energia de central geradora usada para validar a escolha do método para estimar.	102
Tabela 31 – Consumo energético do modelo 1 com geração própria.	104
Tabela 32 – Consumo energético do modelo 2 original.	106
Tabela 33 – Energia operacional do modelo 2 por uso final.	106
Tabela 34 – Tempo em desconforto térmico.	107
Tabela 35 – Consumo energético do modelo 2 com geração própria.	107
Tabela 36 – Resultados gerais de consumo e geração para os dois modelos.	113

Lista de abreviaturas e siglas

ACV	Avaliação de ciclo de vida.
ACVE	Avaliação de ciclo de vida energético.
AEC	Arquitetura, Engenharia e Construção.
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers</i> , associação norte-americana de especialistas em sistemas de aquecimento, refrigeração e condicionamento de ar.
BAPV	<i>Building-applied photovoltaics</i> , sistema fotovoltaico aplicado à edificação.
BIPV	<i>Building-integrated photovoltaics</i> , sistema fotovoltaico integrado à edificação.
COP	<i>Coefficient of Performance</i> , coeficiente de eficiência energética de sistemas de ar condicionado, ou a relação entre o calor fornecido ou retirado de um ambiente e a energia consumida pelo sistema de climatização.
DOE	<i>Department of Energy</i> , órgão dos Estados Unidos da América.
E_{CVE}	Energia total consumida no ciclo de vida da edificação. Corresponde à soma de E_{ICVE} e EO .
EG	Energia gerada.
EI	Energia incorporada.
E_{ICVE}	Energia incorporada à edificação em seu ciclo de vida, considerando as etapas pré-uso (construção), uso (inclusive para manutenção) e pós-uso (desconstrução).
ENCE	Etiqueta Nacional de Conservação de Energia.
EO	Energia operacional.
EODM	<i>Equivalent One-diode Model</i> , método de estimação da energia produzida por módulos FV no programa <i>EnergyPlus</i> .
EPBD	<i>Energy Performance of Buildings Directive</i> , diretiva da União Europeia que estabelece metas de baixo consumo para edifícios.
EPS	Poliestireno expandido moldado.
FV	Fotovoltaico(a).
HVAC	<i>Heating, ventilation and air conditioning</i> , aquecimento, ventilação e condicionamento de ar.

IAQ	<i>Indoor air quality</i> , qualidade do ar interior.
IGDB	<i>International Glazing Database</i> , banco de dados óticos de produtos para envidraçamento, mantida pelo <i>Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California</i> .
LC-BER	<i>Life-cycle – building energy rating</i> , indicador de eficiência energética em perspectiva de ciclo de vida da edificação.
LC-ZEB	<i>Life cycle – zero-energy building</i> , edifício com consumo energético líquido nulo ao considerar-se todo o seu ciclo de vida.
NPEB	<i>Net positive-energy building</i> , edifício superavitário em energia, ou seja, produz além do que consome, em média.
nZEB	<i>Nearly zero-energy building</i> , edifício com consumo energético quase nulo.
NZEB	<i>Net zero-energy building</i> , edifício com consumo energético líquido nulo.
PE	<i>Primary energy</i> , energia contabilizada na fonte primária.
PH	<i>Passive house</i> , casa passiva.
RTQ-C	Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos.
RTQ-R	Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais.
SAPM	<i>Sandia Photovoltaic Array Performance Model</i> , método de estimação da energia produzida por módulos FV no programa <i>EnergyPlus</i> .
SBS	<i>Sick Building Syndrome</i> , síndrome do edifício doente.
STC	<i>Standard Test Conditions</i> , condições para designação de valores nominais de módulos FV: irradiância solar de 1000 W/m ² , distribuição espectral padrão para AM 1,5 e temperatura da célula de 25°C.
UE	União Europeia.
UH	Unidade habitacional.

Lista de símbolos

α	Absortância solar
λ	Condutividade térmica
ρ	Densidade de massa aparente
c	Calor específico
U	Transmitância térmica
C	Capacidade térmica
T_{sol}	Transmitância solar para incidência frontal normal
$R_{sol\ 1}$	Refletância solar para incidência frontal normal
$R_{sol\ 2}$	Refletância solar para incidência traseira normal
T_{vis}	Transmitância na faixa visível para incidência frontal normal
$R_{vis\ 1}$	Refletância na faixa visível para incidência frontal normal
$R_{vis\ 2}$	Refletância na faixa visível para incidência traseira normal
T_{ir}	Transmitância na faixa de infravermelho para incidência normal
$E_{mis\ 1}$	Emissividade hemisférica frontal na faixa de infravermelho
$E_{mis\ 2}$	Emissividade hemisférica traseira na faixa de infravermelho
R	Resistência térmica
R_T	Resistência térmica total
R_{se}	Resistência térmica superficial externa
R_{si}	Resistência térmica superficial interna

Sumário

1	Introdução	19
1.1	Identificação e relevância do problema de pesquisa	23
1.2	Hipóteses e fonte de evidências	25
1.3	Objetivos.....	26
1.4	Organização da dissertação	26
1.5	Contribuições da pesquisa.....	27
1.6	Limitações da pesquisa	28
2	Revisão de literatura	31
2.1	O conceito ZEB.....	31
2.1.1	A Diretiva Europeia.....	32
2.1.2	Desafios NZEB	36
2.2	Energia operacional e incorporada	37
2.3	O conceito LC-ZEB.....	40
2.4	Avaliação de ciclo de vida energético de edificação.....	43
2.4.1	ACVE de edificações no Brasil	46
2.5	Panorama da eficiência energética em edificações em alguns países.....	50
2.5.1	Dinamarca	50
2.5.2	França	50
2.5.3	Alemanha.....	51
2.5.4	Reino Unido	51
2.5.5	Estados Unidos da América.....	52
2.6	Eficiência energética no Brasil.....	52
2.7	Geração distribuída no Brasil.....	54
2.8	Geração FV e simulação de desempenho.....	55
2.9	Síntese da revisão	57
3	Método de pesquisa	61
3.1	Estratégia de pesquisa	61
3.2	Relações entre os objetivos específicos e o método	63
3.3	Estrutura geral da pesquisa	64
3.3.1	Revisão de literatura	65
3.3.2	Definição dos modelos de estudo	66
3.3.2.1	Modelo 1 – habitação energeticamente ineficiente.....	67
3.3.2.2	Modelo 2 – habitação energeticamente eficiente.....	68

3.3.3	Obtenção dos parâmetros de ACVE	69
3.3.3.1	Parâmetros originais aplicados ao modelo 1	71
3.3.3.2	Atribuição de parâmetros ao modelo 2	73
3.3.3.3	Energia incorporada aos sistemas de geração FV	75
3.3.4	Caracterização dos modelos	77
3.3.5	Configuração dos parâmetros para simulação computacional	78
3.3.5.1	Parâmetros construtivos	80
3.3.5.2	Ocupação dos ambientes internos	84
3.3.5.3	Sistema de iluminação.....	85
3.3.5.4	Carga de equipamentos	85
3.3.5.5	Sistema de climatização	85
3.3.5.6	Temperatura do solo.....	88
3.3.5.7	Arquivos climáticos	88
3.3.5.8	Sistema fotovoltaico.....	90
3.3.6	Simulação e análise energética	92
3.3.7	Análise de resultados	93
4	Resultados	95
4.1	Cálculo da energia gerada.....	95
4.2	Simulação do modelo 1 original.....	97
4.3	Inserção da geração própria no modelo 1	101
4.4	Simulação do modelo 2 original.....	105
4.5	Inserção da geração própria no modelo 2	107
4.6	Discussão dos resultados.....	108
4.6.1	Modelos sem geração própria	108
4.6.2	Modelos com geração própria	109
4.6.3	Considerações finais sobre os resultados	112
5	Conclusão	115
5.1	Atendimento aos objetivos propostos	115
5.2	Lições aprendidas.....	117
5.3	Sugestões para trabalhos futuros	118
	Referências	121
	Glossário.....	133
	Apêndice A – Cálculo de superfície homogênea equivalente, transmitâncias e capacidades térmicas da envoltória opaca.....	137

A.1	Paredes do modelo 1	137
A.2	Paredes externas do modelo 2	142
A.3	Paredes internas do modelo 2	147
A.4	Pré-laje do modelo 1	150
A.5	Portas (todas)	156
A.6	Pisos do modelo 1 – banheiro e cozinha	157
A.7	Pisos do modelo 1 – demais cômodos	158
A.8	Pisos do modelo 2	158
A.9	Cobertura do modelo 2	159
Anexo A – Energia incorporada em materiais de construção brasileiros		165
Anexo B – Quantitativo parcial de materiais do modelo 2.....		167

1 Introdução

O desenvolvimento sustentável exige que o atendimento às necessidades da geração atual permita que as futuras atendam às suas (THE WORLD..., 1987). O desmembramento desta afirmação, feita em relatório às Nações Unidas, inclui o uso dos recursos energéticos como uma das preocupações que a humanidade deve ter.

Dentre as maiores riquezas que as nações possuem estão seus recursos naturais. O Brasil, por suas dimensões continentais e sua grande biodiversidade, encontra-se em situação privilegiada a esse respeito. Considerando-se todas as formas de energia, enquanto o mundo supre apenas 18,1% de suas necessidades a partir de fontes renováveis (REN21, 2019), como representado na Figura 1, o Brasil insere-se nesse contexto de maneira bastante diversa, com 45,2% de sua oferta interna de energia a partir de fontes renováveis (EMPRESA..., 2019), conforme a Figura 2.

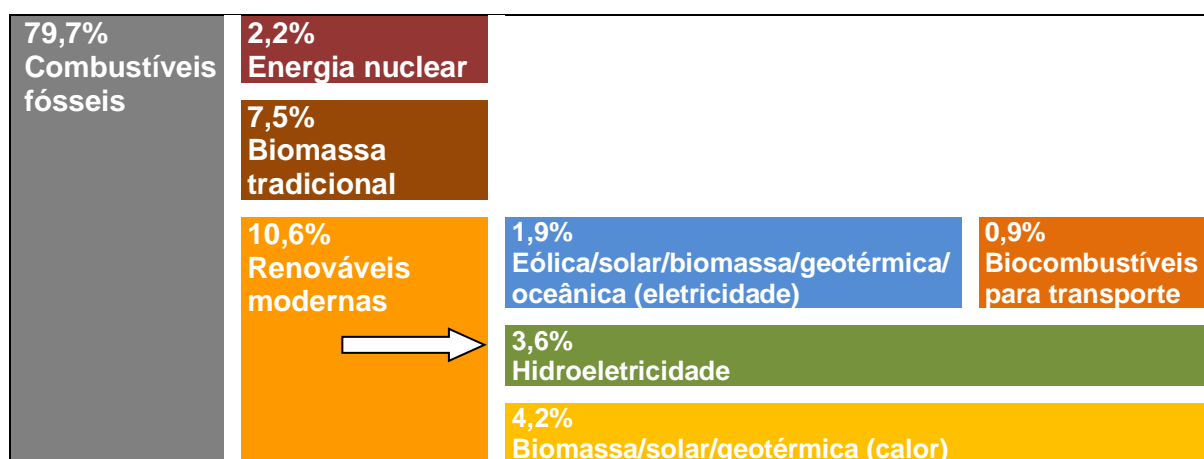


Figura 1 – Gráfico de participações estimadas de fontes primárias¹ no consumo mundial de energia. Fonte: adaptação de *Renewables 2018 Global Status Report* (REN21, 2019).

¹ Ao longo de todo este trabalho, a expressão “fonte primária” refere-se aos recursos energéticos naturais (combustíveis fósseis, biomassa, etc.) que são utilizados para obtenção de energia. “Energia primária” é a energia (térmica, eólica, etc.) disponível nessas fontes, que é convertida na forma adequada ao uso final. No escopo deste trabalho, somente a energia elétrica é considerada para esse uso final, sendo tratada como “energia secundária”.

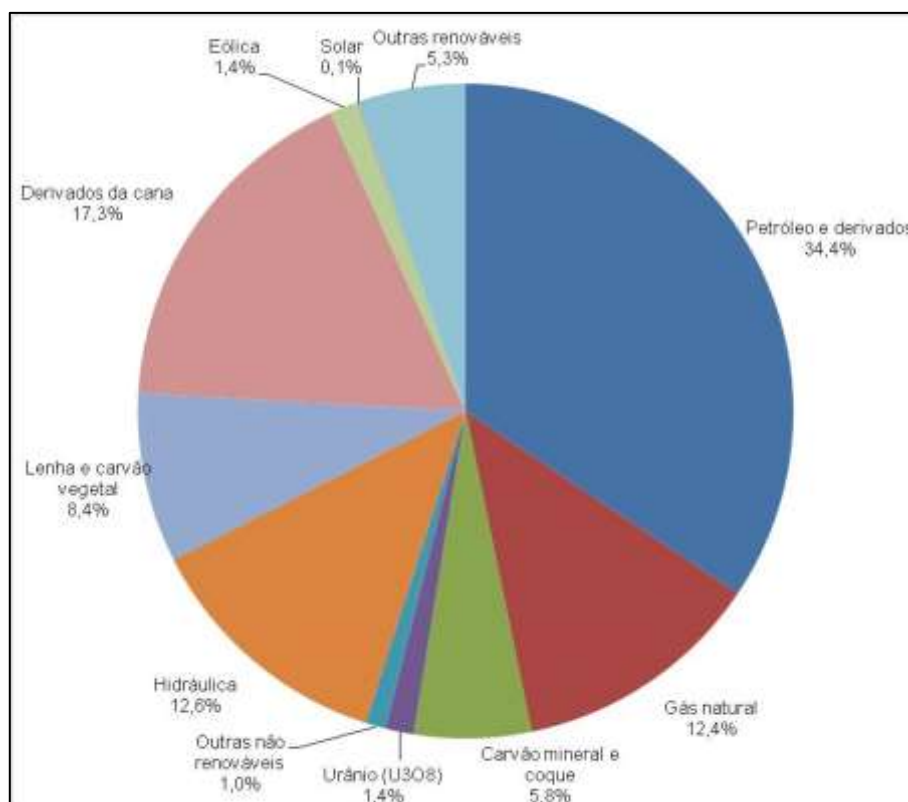


Figura 2 – Gráfico da oferta interna de energia por fonte primária no Brasil.
Fonte: adaptação do Balanço Energético Nacional 2019 (EMPRESA..., 2019).

Especificamente tratando-se de energia elétrica, é notável a importância que essa forma de energia tem no funcionamento da sociedade moderna, das mais simples atividades domésticas às mais complexas operações industriais. Ao verificar-se a distribuição das fontes para geração de eletricidade no Brasil, este também é um destaque positivo do país, pois 80,3% da oferta interna de energia elétrica em 2018 teve origem em fontes renováveis (EMPRESA..., 2019), conforme pode ser verificado na Figura 3.

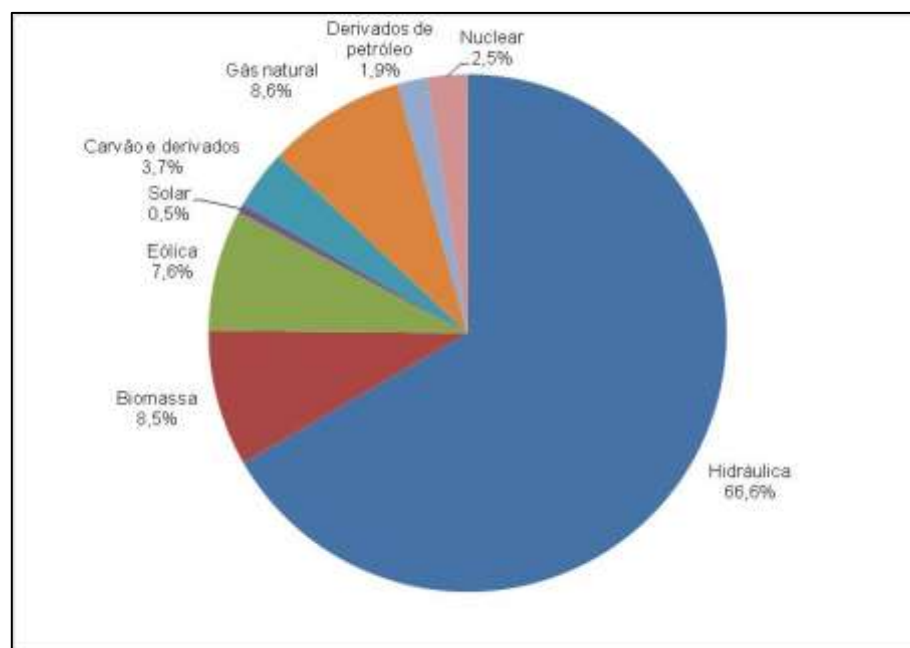


Figura 3 – Gráfico da oferta interna de energia elétrica por fonte primária no Brasil.
Fonte: adaptação do Balanço Energético Nacional 2019 (EMPRESA..., 2019).

Apesar disso, não se pode afirmar que haja estabilidade nesta condição favorável ou viés de melhoria futura, tanto pela perspectiva de crescimento da demanda quanto pela inserção recente de usinas movidas a combustíveis fósseis na matriz energética nacional.

Sobre o primeiro motivo, Pereira *et al.* (2017) estimam um aumento na demanda de eletricidade na ordem de 200% no Brasil até o ano 2050.

Sobre o segundo motivo, os mesmos autores apresentam dados sobre o crescimento da geração termoeletrica através de combustíveis fósseis e à menor participação das fontes hidráulicas devido à crise hídrica ocorrida nesta década (PEREIRA *et al.*, 2017, p. 14) para comprovar a necessidade da diversificação da matriz energética do país e do cumprimento dos seus compromissos, junto às Nações Unidas, para redução de emissão de gases de efeito estufa.

No que diz respeito à participação dos edifícios no consumo energético, o Balanço Energético Nacional indicou que o uso residencial, comercial e público de energia somou 50,5% do consumo de eletricidade e 14,8% da energia total no Brasil em 2018 (EMPRESA..., 2019, p. 18, 30), enquanto, na União Europeia (UE), as residências e os serviços consomem 39% da energia total (EUROSTAT EUROPEAN COMMISSION, 2017, p. 53). Pela expressiva representatividade deste tipo de uso, é imprescindível que estas sociedades visem à redução do consumo líquido de energia nos edifícios para diminuir a pressão por investimentos, principalmente no

caso do Brasil, a dependência energética de alguns países-membros da UE² e as emissões de gases de efeito estufa em ambos.

A norma europeia *Energy Performance of Buildings Directive* (EPBD) propõe metas para atingir objetivos de desempenho energético e reafirma a necessidade de melhorar a eficiência nas edificações, o setor que mais consome energia naquele continente (GOVERNMENT EUROPA, 2018). Junto com a utilização de fontes renováveis, as medidas tomadas para diminuir o consumo de energia permitirão à UE cumprir o Protocolo de Quioto e honrar seus compromissos de reduzir a emissão de gases de efeito estufa e o aumento da temperatura global (PARLAMENTO EUROPEU; CONSELHO DA UNIÃO EUROPEIA, 2010, p. 13).

No Brasil, o Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais – RTQ-R (INSTITUTO..., 2012) e de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos – RTQ-C (INSTITUTO..., 2013a) estabelecem critérios para conservação de energia neste setor. O RTQ-C também prevê, além dos requisitos de eficiência no consumo, um incentivo à produção de energia por fontes renováveis no local, como a fotovoltaica (FV) e a eólica. Sob esse aspecto, o Brasil tem alta disponibilidade de radiação solar, superando países com potência instalada e investimentos muito maiores, o que mostra o grande potencial de crescimento dessa fonte no país. Florianópolis, que é uma das cidades com menor intensidade de radiação solar no país, recebe 20% mais luz solar do que a região mais ensolarada da Alemanha (DIDONÉ, 2014, p. 18). A geração FV apresenta-se, portanto, como uma boa fonte alternativa a fazer parte dos projetos de edificações brasileiras. Além desse aspecto positivo nacional, esse tipo de geração é adequado às características das habitações urbanas, pois seus componentes de maior tamanho – os módulos – podem ser instalados sobre os telhados, não competindo com outras necessidades do mesmo espaço, como seria o caso da geração eólica, por exemplo. Pelas razões expostas, esta pesquisa considera, em todo o escopo relacionado à geração própria, somente a fonte solar FV.

² Na média do bloco, a dependência energética, entendida como a razão entre a quantidade líquida de energia importada e o total consumido no país – acrescido do fornecimento para navios de alto-mar, atingiu 54% em 2015 (EUROSTAT EUROPEAN COMMISSION, 2017, p. 45).

1.1 Identificação e relevância do problema de pesquisa

A EPBD (PARLAMENTO EUROPEU; CONSELHO DA UNIÃO EUROPEIA, 2010) estabelece metas de consumo de energia elétrica para as edificações na UE. Os limites variam por região climática, conforme detalhado em 2.1.1. Dutra, Salamoni e Cunha (2019) estudaram a aplicação dos limites europeus para edificação no Brasil. Tratou-se do mesmo modelo 1 desta pesquisa. O artigo concluiu pela viabilidade de atingir as metas de todas as zonas climáticas europeias mediante pequenas ações adicionais de eficiência energética. Ou seja, somente pela inserção de geração própria, mesmo uma edificação comum foi capaz de cumprir tais objetivos.

Uma causa dessa facilidade para atingir metas europeias de baixo consumo de energia primária é a diferença entre os fatores de conversão *site-to-source*, já que no Brasil as fontes de eletricidade são predominantemente renováveis (ver seção 1, Figura 3), o que reduz a perda energética na etapa de geração (RUPP; LAMBERTS, 2017, p. 12), enquanto na Europa o uso de combustíveis fósseis para geração de energia elétrica ainda se equipara ao das fontes renováveis, com valores de capacidade instalada aproximadamente iguais (EUROSTAT EUROPEAN COMMISSION, 2017, p. 61). Outra possibilidade é de que as taxas de utilização de energia nas edificações daquele continente sejam superiores, ou seja, mais consumo por área ou por ocupante.

Mesmo com a constatação de que é fácil, nas condições brasileiras, atingir as metas europeias para consumo energético em edifícios, deve-se considerar que nem todas as premissas de tal estudo são válidas para garantir a preservação dos recursos naturais. As metas estabelecidas para a UE têm relação com os parâmetros de viabilidade técnica e econômica daquela região. Embora possam servir para um teste de aderência em outros locais, cada diferente região deve ter seus indicadores próprios, adequados às suas condições. Além disso, as metas europeias não visam atingir NZEB, que tem consumo líquido nulo, mas nZEB, por permitirem valores residuais positivos. Por fim, mas sem pretensão de esgotar os argumentos possíveis, mesmo que o gasto energético líquido para uso do edifício seja nulo e, portanto, ele possa ser chamado de NZEB, as etapas anteriores ao seu uso (extração de matéria-prima, fabricação de componentes, transporte, aplicação na obra), as reformas e a manutenção ao longo da vida do prédio, sua demolição e a

destinação de seus resíduos ao fim, são consumidoras de energia. Portanto, atender metas nZEB ou mesmo NZEB não significa conservar energia no sentido mais amplo.

Apesar de não ser aplicável integralmente no Brasil, a revisão de literatura acerca da EPBD permitiu compreender as definições relacionadas aos edifícios de alto desempenho energético e consolidar o tema da pesquisa. Foi identificada uma lacuna nos objetivos nZEB europeus, pois eles não garantem a preservação do estoque de energia “não renovável” do planeta. Por não adotar o escopo do ciclo de vida completo da edificação, mas somente a fase de uso, a norma da UE permite que os recursos naturais finitos sejam consumidos, desde que isso ocorra fora dessa fase. Este trabalho adentra o espaço deixado por tal regulamento, conforme descrito a seguir.

No nível mais abrangente, a solução para as necessidades de redução no consumo líquido de energia para preservação dos recursos naturais divide-se em:

- a) diminuir o uso da energia;
- b) gerar a energia necessária no próprio local de consumo, através de fontes renováveis.

Qual é a relação entre as duas soluções? Ou, de outra forma, até que ponto deve-se aplicar uma e outra, considerando-se a tecnologia disponível e os recursos construtivos de que se dispõe? Há uma série de implicações a partir da tomada de decisão por uma ou outra, em maior ou menor grau de aplicação, e a busca do ponto de equilíbrio apresenta-se como problema de pesquisa tratado nesta dissertação. Assim, a principal questão que este trabalho pretende responder é: por que se devem adotar estratégias para a eficiência energética no edifício se, para considerá-lo como de baixo consumo líquido de energia, pode-se gerar mais eletricidade nele, a partir de fontes renováveis?

Se o objetivo é simplesmente consumir – durante o período de uso do edifício – menos energia a partir de fontes externas e/ou não renováveis, ambas as soluções (eficiência e geração própria) servem, e o grau de aplicação de cada uma poderia ser avaliado somente pela viabilidade física de implementação e pelo investimento necessário.

Mas se os objetivos são mais abrangentes, outras variáveis devem ser investigadas. Um edifício não consome energia somente durante a fase de operação (ocupação e uso). Para ser construído, assim como para sua demolição ao fim da

vida útil, demanda o uso de recursos energéticos. Considerando-se que a sociedade deve visar à sustentabilidade e preservação dos recursos naturais no longo prazo, torna-se indispensável essa análise integral de ciclo de vida, chamada na literatura de avaliação “do berço ao túmulo”³.

1.2 Hipóteses e fonte de evidências

A principal hipótese investigada neste trabalho é de que um método que avalie o consumo líquido de energia, levando em consideração todo o ciclo de vida da edificação, seja adequado para responder à pergunta de pesquisa, de forma ampla e completa, através do balanço energético que ele impõe. As evidências que justificam essa hipótese foram obtidas através de estudo desenvolvido por Dutra, Salamoni e Cunha (2018) para verificar o grau de dificuldade para atingir, no Brasil, metas de consumo bruto e líquido de energia tão baixas quanto as estabelecidas para a UE. Em se tratando de energia primária, o referido trabalho demonstrou facilidade para cumprimento de tais metas, indicando que um esforço de projeto pode, ao melhorar o desempenho do edifício, reduzir ainda mais o consumo em relação às metas já alcançadas; e que uma expansão do sistema gerador próprio, além do que foi testado no estudo referido, tem possibilidade de reverter o balanço para que a energia excedente à necessidade de uso possa ser aplicada ao abatimento da energia incorporada (EI).

Hernandez e Kenny (2010) propuseram um método que avalia esse balanço energético, porém com escopo limitado na ACVE “do berço ao portão”⁴, conforme descrito em 2.3. Esta dissertação adota princípios de Hernandez e Kenny (2010) mas realiza uma avaliação mais abrangente.

Há dúvidas a serem dirimidas através da pesquisa, e a principal delas refere-se ao acréscimo de EI que é causado pela própria melhoria no isolamento do prédio e pela adição de módulos FV e outros componentes do sistema gerador. É possível que essa energia incorporada adicional impeça que a curva do consumo líquido atinja o ponto zero.

³ *From cradle to grave*, nas referências em língua inglesa.

⁴ *From cradle to gate*, nas referências em língua inglesa.

1.3 Objetivos

É objetivo geral da pesquisa: avaliar a relação entre a eficiência energética e a geração própria no ciclo de vida de uma residência brasileira.

São objetivos específicos, a partir da obtenção de dois modelos de unidades residenciais e dos valores de energia incorporada aos materiais que compõem esses modelos:

- a) analisar o desempenho térmico e o consumo de energia elétrica na fase de uso de modelos de edificações unifamiliares;
- b) estimar a geração de energia no próprio local, por fonte solar FV, em quantidade suficiente para suprir a necessidade operacional e compensar a energia incorporada;
- c) estabelecer relações entre a qualidade de projeto – em termos de eficiência energética – dos modelos e incrementos de produção de energia elétrica a partir da geração própria, com a finalidade de obter o menor gasto energético no ciclo de vida da edificação;
- d) verificar as possibilidades de utilização dos dados existentes de energia incorporada aos materiais e sistemas construtivos no Brasil, e caso necessário, propor ajustes.

1.4 Organização da dissertação

Para atingir os objetivos propostos, este trabalho foi organizado da seguinte forma:

- a) a **seção 1** contextualiza o tema e introduz os fundamentos, objetivos, justificativas e limitações da pesquisa a partir dos cenários brasileiro e internacional sobre consumo de energia em edificações;
- b) a **seção 2** apresenta a revisão de literatura, iniciando pelos edifícios com consumo energético nulo ou próximo de zero. A seguir, esse conceito é estendido para todo o ciclo de vida. Para um melhor entendimento sobre a teoria envolvida, a Avaliação de Ciclo de Vida Energético (ACVE) de edificações é abordada. Um panorama do assunto em alguns países é apresentado, e uma revisão mais aprofundada do que já foi publicado no Brasil é realizada. Por fim, são revisados os critérios e regulamentos da eficiência energética e da geração distribuída no Brasil, fechando a

revisão com algumas especificidades da geração FV e da simulação para estimativa de sua produção;

- c) a **seção 3** detalha os métodos e procedimentos empregados na busca dos objetivos estabelecidos. De forma geral, são descritas as etapas do trabalho e o desenvolvimento do experimento a partir dos modelos escolhidos. Todos os critérios, parâmetros e escolhas de configuração são detalhados nesta parte do trabalho;
- d) a **seção 4** apresenta e discute os resultados obtidos nas simulações e cálculos;
- e) na **seção 5** apresentam-se as conclusões da pesquisa e de que forma foram atingidos os objetivos propostos. São feitas sugestões para trabalhos futuros que possam avançar no tema, complementando-o, ou explorar temas correlatos e outros problemas identificados a partir da revisão de literatura e do desenvolvimento da pesquisa.

1.5 Contribuições da pesquisa

O tema é relevante para a linha de pesquisa Conforto e Sustentabilidade do Ambiente Construído do PROGRAU, pois vem complementar outros trabalhos, já elaborados ou em elaboração, que versam sobre a eficiência energética na Arquitetura e a geração de energia integrada ou aplicada à edificação. O que se propõe nesta pesquisa é relacionar estes dois grandes temas e desenvolver ciência a respeito dos limites de cada um, para que se obtenham soluções visando ao desempenho das edificações brasileiras. A partir do método proposto e da análise dos resultados de sua aplicação ao experimento realizado, pretende-se obter a necessária generalização por meio de um detalhamento minucioso que permita a outros interessados realizar as adaptações que o caso requer, mantendo a estrutura do método.

Na revisão de literatura realizada pôde-se constatar que a exigência de alto desempenho energético nos edifícios está em evidência no mundo, configurando temas variados na pesquisa científica e consolidando regulamentos internacionais. No Brasil não foi encontrado número significativo de trabalhos relacionados, o que denota necessidade de aprofundamento de estudos neste campo. Também ficou evidente a importância da Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) e a aplicação das

normas ISO 14040 e ISO 14044 (INTERNATIONAL ORGANISATION..., 2006a, 2006b) para a sustentabilidade no uso dos recursos naturais.

Através desta dissertação, o autor pretende contribuir com a comunidade acadêmica e com os demais interessados na área de Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC) para que possam dispor de instrumentos de apoio à formação das estratégias construtivas que visam à economia de energia com escopo no ciclo de vida dos edifícios.

1.6 Limitações da pesquisa

O autor identificou os seguintes fatores limitadores dos resultados da pesquisa relatada nesta dissertação:

- a) para atingir os objetivos estabelecidos em 1.3, esta pesquisa limitou-se à ACVE de alguns materiais que representam 80% do total de energia incorporada à edificação (TAVARES, 2006, p. 88). Os demais 20% foram, então, adicionados proporcionalmente nos cálculos (ver 3.3.3);
- b) assim como no trabalho que originou os parâmetros de ACVE utilizados nesta dissertação, foi adotada a mesma distância fixa para transporte dos materiais usados na construção e nos resíduos da demolição:

Os itens relacionados aos transportes de materiais tiveram como referência uma **distância média de 80 km**, a qual aplicada ao índice de consumo energético de 1,62 MJ/t/km resulta em um índice simplificado de 0,13 MJ/kg de produto transportado. Apesar de prevista na metodologia adotou-se uma distância fixa em função da impossibilidade, nas condições da pesquisa, de se definir a distância que todos os materiais especificamente teriam de ser transportados dos centros de transformação até o sítio da obra. O mesmo critério foi adotado para os materiais oriundos de demolição. Os materiais desperdiçados têm por definição da metodologia o dobro da distância transportada; portanto o índice neste caso é de 0,26 MJ/kg (TAVARES, 2006, p. 133, 134, grifo nosso);

- c) apesar de ACVE ser, intrinsecamente, uma análise de energia primária, o autor utilizou valores secundários da energia necessária à produção e transporte dos materiais componentes dos modelos que desenvolveu, justificando pela complexidade e por estimativa de precisão em torno de 90%, em relação aos respectivos valores primários (TAVARES, 2006, p. 55). Ainda hoje se pode considerar válida essa afirmativa se levar-se em conta a predominância de combustíveis fósseis nos insumos energéticos da construção e os fatores de conversão entre energia primária e secundária para esse tipo de fonte quase unitários, como 1,1 para o gás

(RUPP; LAMBERTS, 2017, p. 2). Isso significa que, para obter-se 1 kWh a partir do gás, são necessários 1,1 kWh da fonte primária. Como esta pesquisa não tem objetivo de realizar ACVE, mas utilizar dados validados, aqui também são adotados os valores secundários do trabalho referência e utilizados nos cálculos como valores primários. Por sua vez, a parcela de energia operacional – consumida durante o uso da edificação – é convertida em energia primária através do fator de conversão 1,6 (RUPP; LAMBERTS, 2017, p. 2), porque o método empregado para sua estimativa resulta inequivocamente em valores secundários. O mesmo ocorre com a energia gerada no próprio edifício;

- d) os casos estudados foram localizados em Pelotas. Para que os resultados obtidos e o método desenvolvido possam ser aplicados em outros locais do país, particularidades regionais devem ser levadas em consideração, como o clima, os parâmetros de ocupação e uso dos edifícios e, preferencialmente, ser realizada ACVE dos materiais empregados, considerando seus processos construtivos e as distâncias de transporte envolvidas;
- e) o experimento foi realizado com apenas dois modelos de residências unifamiliares;
- f) as simulações utilizaram somente o arquivo climático atual da cidade estudada. Futuras mudanças no clima foram desconsideradas, o que reduz a confiabilidade dos parâmetros de conforto térmico utilizados como premissas e a assertividade dos resultados de consumo;
- g) também foram desconsideradas alterações futuras nos hábitos de consumo e na tecnologia dos aparelhos. Tanto pode ser experimentada uma redução na quantidade de energia consumida – pela melhoria da eficiência dos equipamentos, por exemplo – como também pode haver crescimento, com a automação de processos domiciliares e o aumento do poder aquisitivo da população;
- h) o potencial de reuso dos resíduos de demolição não foi contabilizado, o que poderia reduzir o valor da energia incorporada à edificação.

2 Revisão de literatura

Esta seção apresenta o referencial teórico que fundamenta a pesquisa relatada nesta dissertação. A revisão de literatura contempla temas relativos à eficiência energética na Arquitetura, à geração de energia na própria edificação, à ACVE de forma mais abrangente e aos conceitos e objetivos nZEB/NZEB/NPEB/LC-ZEB⁵, de forma mais específica.

2.1 O conceito ZEB

As diversas siglas e objetivos para *zero-energy buildings* (edifícios com consumo energético nulo) carregam, intrinsecamente, metas referentes ao consumo líquido de energia. A expressão “energia líquida” no contexto do ambiente construído representa um balanço entre a energia utilizada pelas instalações e ocupantes do edifício (consumo do edifício) e aquela gerada por fontes renováveis próprias. Em seu conceito – econômico e ecológico – original, expande-se para todo o ciclo de vida da edificação, mas em geral é utilizada em termos do uso anual da energia, desconsiderando a parcela gasta na construção e desconstrução (HERNANDEZ; KENNY, 2010, p. 815).

Atualmente, portanto, o conceito de edifício com consumo líquido de energia nulo é associado ao uso da rede pública de eletricidade como fonte e carga, servindo como elemento de armazenagem da energia produzida e evitando que a própria edificação necessite de baterias internas para armazenamento e uso da energia gerada. Assim, o balanço se faz entre a energia consumida da rede e injetada nela, sendo (*net*) ZEB o edifício que possui esse balanço nulo ao longo do período avaliativo de um ano (HERNANDEZ; KENNY, 2010; MARSZAL *et al.*, 2011; TORCELLINI *et al.*, 2006). Se, no mesmo período avaliativo, produzir além da

⁵ As siglas utilizadas ao longo de todo este trabalho são, prioritariamente, as utilizadas nas obras citadas.

própria necessidade, tornando-se superavitário em energia, o edifício é considerado um *plus-energy* ou *net positive-energy building* (NPEB). Neste caso, além de suprir sua demanda, ele compensa o consumo de outros (DÁVI *et al.*, 2016; HARKOUSS; FARDOUN; BIWOLE, 2018).

Essas definições têm implicação direta no tema da pesquisa aqui relatada, pois dada a característica intermitente da fonte energética a ser utilizada – a luz solar – e à variabilidade da carga, não se deve esperar que o consumo de eletricidade tenha baixo valor em todos os momentos do dia ou de qualquer período que seja considerado. Haverá instantes de alta demanda e baixa produção de energia, como por exemplo, à noite, quando a ocupação da residência tende a ser plena enquanto o sistema de geração FV está inativo. Ao longo do ano há variações climáticas, como no inverno, em que os dias são curtos e a luz natural é mais escassa, portanto a geração FV se reduz a um mínimo sazonal, enquanto o frio da estação faz com que as cargas de aquecimento sejam acionadas. Se a geração própria é dimensionada para atender à média anual, neste período haverá déficit, enquanto no verão, necessariamente, haverá excedentes de energia produzida para equalizar. Esse balanço entre horários do dia, períodos do ano e qualquer outra intermitência (uma nuvem repentina encobrindo o sol, por exemplo) que altere a relação entre geração e consumo precisa ser equilibrada com o uso da rede pública de distribuição. Ela é a fonte para os momentos de pouca ou nenhuma geração e o sorvedouro para despacho dos excedentes produzidos, os quais formarão créditos para uso posterior. No Brasil, essa troca de energia entre a unidade consumidora-geradora e a empresa distribuidora de energia ocorre sob as regras do Sistema de Compensação de Energia Elétrica (ver 2.7).

Em relação a metas de consumo líquido não há regulamento nacional, por isso este trabalho busca fundamentação em norma estrangeira para auxílio na compreensão dos conceitos e indicadores que se relacionam aos objetivos ZEB.

2.1.1 A Diretiva Europeia

A EPBD (PARLAMENTO EUROPEU; CONSELHO DA UNIÃO EUROPEIA, 2010) estabelece conceito de (*nearly*) ZEB como um edifício com desempenho energético muito elevado, cujas necessidades de energia quase nulas ou muito pequenas devem ser cobertas em grande medida por energia proveniente de fontes renováveis, incluindo a produzida no local ou nas proximidades. Segundo o Anexo I

da referida norma, o desempenho energético de um edifício determina-se pela energia anual – calculada ou consumida – necessária à sua utilização típica, como condicionamento dos ambientes e, no caso de prédio residencial, o aquecimento de água. A revisão de 2018 da diretiva incluiu, de forma mais explícita, a instalação fixa para iluminação e “outros sistemas técnicos do edifício”. Também estabeleceu, no Anexo I, que as “necessidades de energia [...] são calculadas de modo a **otimizar os níveis de saúde, de qualidade do ar interior e de conforto [...]**” (PARLAMENTO EUROPEU; CONSELHO DA UNIÃO EUROPEIA, 2018, p. 90, grifo nosso). Apesar desses requisitos humanos já estarem presentes nas considerações da versão original, tornaram-se comandos regulatórios a partir desta revisão.

Sobre as características técnicas específicas, a norma determina:

A metodologia é estabelecida tendo em conta pelo menos os seguintes aspectos:

a) As seguintes características térmicas reais do edifício, incluindo as suas divisórias internas:

- i) capacidade térmica,
- ii) isolamento,
- iii) aquecimento passivo,
- iv) arrefecimento passivo, e
- v) pontes térmicas;

b) Instalação de aquecimento e fornecimento de água quente, incluindo as respectivas características de isolamento;

c) Instalações de ar condicionado;

d) Ventilação natural e mecânica, que pode incluir a estanquidade ao ar da envolvente;

e) Instalação fixa de iluminação (em especial no setor não residencial);

f) Concepção, posicionamento e orientação dos edifícios, incluindo as condições climáticas exteriores;

g) Sistemas solares passivos e proteções solares;

h) Condições climáticas interiores, incluindo as de projeto;

i) Cargas internas.

Neste cálculo deve ser levada em conta, quando for caso disso, a influência positiva dos seguintes aspectos:

a) Condições locais de exposição solar, sistemas solares ativos e outros sistemas de aquecimento e produção de eletricidade baseados em energia proveniente de fontes renováveis;

b) Eletricidade produzida por cogeração;

c) Redes urbanas ou coletivas de aquecimento e arrefecimento;

d) Iluminação natural. (PARLAMENTO EUROPEU; CONSELHO DA UNIÃO EUROPEIA, 2010, p. 29)

A energia utilizada em aparelhos não está incluída, embora os estados-membros possam incluí-la ao procederem à aplicação nacional do Regulamento (COMISSÃO EUROPEIA, 2012, p. 3).

Em limites ampliados, mesmo a aquisição de energia a partir de centrais geradoras de grande porte, desde que sejam fontes renováveis, permite considerar o edifício como ZEB (DENG; WANG; DAI, 2014, p. 2).

Nos debates de um *workshop* realizado na Finlândia, como parte de um programa de pesquisa em edifícios de baixo consumo e qualidade do ar interior, os especialistas participantes levantaram oito termos que devem ser incluídos em contratos de construção de nZEB (KANTOLA; SAARI, 2014):

- a) a quantidade de energia consumida deve ser inferior a 100 kWh/(m².a);
- b) a infiltração de ar no edifício deve ser igual ou inferior a 0,4 m³/(h.m²) a 50 Pa;
- c) a taxa anual de recuperação de calor do sistema de condicionamento de ar deve ser, no mínimo, de 70%;
- d) fontes renováveis locais devem prover, no mínimo, 30% da eletricidade e 80% do aquecimento;
- e) a eficiência energética do edifício deve ser incrementada pelo uso de soluções passivas, como sombreamento e uso da luz natural;
- f) a recuperação de calor proveniente do processo de refrigeração deve ser usada para o suprimento de água quente;
- g) o sistema de iluminação deve ser equipado com tecnologia LED e detectores de movimento;
- h) quando o edifício não está ocupado, o consumo de energia para aquecimento, ventilação e iluminação deve ser reduzido por sistema de automação.

São requisitos elaborados para climas predominantemente frios, portanto devem ser cuidadosamente analisados para uma eventual comparação com outros tipos de clima. De qualquer forma, alguns desses princípios podem ser aplicados universalmente, com as necessárias adequações de metas.

Torcellini *et al.* (2006) classificaram as edificações ZEB em quatro tipos, pelos objetivos pretendidos:

- a) *Net Zero Site Energy* (NZEB-site): produz toda a energia que necessita, em base anual, totalizada no local do consumo;
- b) *Net Zero Source Energy* (NZEB-source ou NZEB-PE⁶): produz toda a energia que necessita, em base anual, totalizada na fonte, o que implica o uso de fatores de conversão “site-to-source” para obtenção dos valores

⁶ Primary energy.

equivalentes em energia primária utilizada para gerar e entregar a energia que o edifício necessita e também a que ele injeta na rede pública;

- c) *Net Zero Energy Costs* (NZEB-cost): produz resultado financeiro anual positivo entre a energia gerada no edifício e injetada na rede pública e a energia suprida por esta, considerados todos os custos associados, como tarifas de demanda, impostos, taxas, etc.;
- d) *Net Zero Energy Emissions* (NZEB-emission): produz energia renovável considerada não emissora de poluentes em quantidade igual ou superior à consumida de fontes consideradas emissoras, em base anual.

Comparando-se os objetivos NZEB-site e NZEB-source, pode-se dizer que o primeiro expressa o desempenho do edifício, enquanto o segundo avalia também o contexto ao qual ele está inserido, pois leva em conta as perdas dos processos de extração dos recursos, sua transformação e distribuição. Isso faz com que edifícios idênticos construídos em diferentes países com climas semelhantes tenham números similares quanto ao uso final de energia, mas podem ter desempenho muito diverso em termos de energia primária utilizada (SARTORI; HESTNES, 2007, p. 251). A energia primária tem relação com as emissões de poluentes e o consumo dos recursos naturais. Se uma usina termoeletrica tem rendimento de 33%, a cada kWh produzido são gastos três em combustíveis. O transporte acrescenta mais uma parcela nessas perdas e emissões associadas (ATTIA, 2018, p. 61-62).

Em se tratando da UE, a maioria dos estados-membros já possui um indicador de utilização de energia primária – em kWh/(m².ano) – em conformidade com o Anexo I da EPBD.

Os padrões de referência para o desempenho energético de nZEB situam-se em faixas de acordo com a zona climática, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 – Metas de energia primária por zona climática na Europa. Para cada zona, a primeira faixa corresponde aos escritórios e a segunda às habitações unifamiliares novas.

Zona	Cidades	Consumo total kWh/(m ² .ano)	Fontes renováveis locais kWh/(m ² .ano)	Consumo líquido kWh/(m ² .ano)
Mediterrâneo	Catânia, Atenas, Larnaca, Luga, Sevilha, Palermo	80-90	60	20-30
		50-65	50	0-15
Oceânica	Paris, Amsterdam, Berlim, Bruxelas, Copenhague, Dublin, Londres, Macon, Nancy, Praga, Varsóvia	85-100	45	40-55
		50-65	35	15-30
Continental	Budapeste, Bratislava, Liubliana, Milão, Viena	85-100	45	40-55
		50-70	30	20-40
Nórdica	Estocolmo, Helsinque, Riga, Gdansk, Tovarene	85-100	30	55-70
		65-90	25	40-65

Fonte: adaptação da Recomendação (UE) 2016/1318 da Comissão (COMISSÃO EUROPEIA, 2016, p. 54, 55).

A conversão entre energia secundária e primária é feita com fator *site-to-source* igual a 2,5, tanto para a energia consumida quanto para a exportada para a rede (COMISSÃO EUROPEIA, 2016, p. 49). Esse valor tem viés de redução, à medida que a matriz energética do continente europeu vem se tornando cada vez mais renovável. Em 2016 estava em 2,26, com previsão de chegar a 1,93 em 2030. Por essa razão, há necessidade de revisões periódicas do valor a ser aplicado na formação das metas (ESSER; SENSFUSS, 2016).

Não há uma zona climática europeia semelhante à região brasileira estudada nesta pesquisa. Das cidades referenciais listadas na Tabela 1, Milão possui classificação *Köppen* igual à de Pelotas – subtropical úmido (Cfa), mas não é possível afirmar que sua zona – Continental – é comparável à região Sul do Brasil. A classificação Cfa é típica da faixa entre 20° e 35° de latitude, na costa Leste dos continentes (BRITANNICA GROUP INC, 2019), inexistente na Europa.

2.1.2 Desafios NZEB

A obtenção do *status* NZEB depende fortemente do sucesso dos envolvidos em lidar com três grandes desafios (ATTIA, 2018):

- diferença de desempenho energético;
- síndrome do edifício doente (SBS, na sigla em língua inglesa);
- estresse da decisão de projeto.

O primeiro desafio refere-se à diferença entre o desempenho estimado e o real, ou seja, o consumo calculado para o edifício e o consumo efetivo durante sua fase de operação. Ocorre por dificuldades no estabelecimento de indicadores mensuráveis durante o planejamento, por baixa qualidade de execução e por incertezas relativas ao uso.

O segundo faz parte de um conjunto de fatores mais importantes do que o próprio desempenho energético do edifício. Tratam-se da qualidade do ar interior (IAQ, na sigla em língua inglesa), do acesso à luz natural, da produtividade e satisfação dos ocupantes e do conforto térmico. Sem atendimento a essas necessidades, o edifício pode ser considerado “doente”, por proporcionar a seus habitantes problemas de saúde, absenteísmo e desconforto. Os objetivos referentes ao desempenho energético devem ser perseguidos sem descuido com essas necessidades.

Por fim, a complexidade de um projeto de NZEB, combinando sistemas passivos e ativos, faz com que as principais decisões devam ser tomadas muito cedo na fase de planejamento, e a multiplicidade de escolhas causam estresse na equipe de projeto.

A principal forma de abordagem de projeto para NZEB é baseada na busca de metas de desempenho. Também há possibilidade de projetar com enfoque prescritivo, mas esta forma deve resultar da experiência em estabelecer metas e aferi-las, ou seja, desenvolver normas prescritivas com base na abordagem por desempenho. O objetivo deve ser, mais do que reduzir a demanda de energia, encontrar o balanço entre o desempenho energético, a geração de energia, a satisfação das necessidades dos ocupantes e a qualidade do ambiente. Um NZEB deve consumir pouca energia e emitir pouco CO₂ por projeto e não compensar alto consumo com geração renovável (ATTIA, 2018). Esta característica vem ao encontro do tema deste trabalho e configura-se como o problema de pesquisa aqui tratado (ver 1.1).

2.2 Energia operacional e incorporada

Um edifício consome energia durante toda a sua vida. Para análise do ciclo completo, são consideradas diferentes fases, para as quais as seguintes definições referentes à energia são utilizadas:

- a) energia incorporada inicial: consiste na energia requerida para o processo construtivo, desde a extração da matéria-prima, industrialização dos materiais, transporte e construção.
- b) energia operacional: utilizada para aquecimento, refrigeração, iluminação e serviços auxiliares durante a fase de uso do edifício.
- c) energia incorporada recorrente: requerida para manutenção, reforma e substituição de materiais e instalações.
- d) energia incorporada de desconstrução⁷: utilizada no processo de demolição do edifício, transporte, processamento e destinação final dos resíduos.

Estas parcelas são consideradas para uma análise “do berço ao túmulo” (*cradle-to-grave*). Caso a extensão temporal da análise varie, algumas parcelas de energia são desprezadas, como por exemplo, em uma análise “do berço ao fim de uso” (*cradle-to-end-of-use*), na qual a energia incorporada de desconstrução não é contabilizada. Há outras intermediárias, e também uma que vai além do “túmulo” (*cradle-to-cradle*), incluindo o processo de reciclagem dos resíduos da demolição (GIORDANO *et al.*, 2017; INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2016).

A Figura 4 mostra essas variações e as fases envolvidas, assim como as parcelas de energia incorporada e operacional.

⁷ Alguns autores tratam a energia da desconstrução como uma parcela separada e não identificada como energia incorporada, mesmo em uma análise *cradle-to-grave* ou *cradle-to-cradle*. Porém vários outros somam todas as parcelas não consideradas como operacional para contabilizar como incorporada (CELLURA *et al.*, 2014; CHASTAS *et al.*, 2017; DIDONÉ, 2014; INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2016; MARSZAL *et al.*, 2011). Este é o princípio adotado no presente trabalho.

PRODUTO fase			PROCESSO CONSTRUTIVO fase		USO fase (manutenção)					FIM DE VIDA fase			Benefícios e consumo pós- uso	
Suprimento de insumos	Transporte	Manufatura	Transporte	Instalação	Uso	Manutenção	Reparo	Substituição	Reforma	Demolição	Transporte	Processamento de resíduos	Destinação de resíduos	Potencial de reuso, recuperação e reciclagem
Berço ao portão														
Berço ao canteiro														
Berço à entrega														
Berço ao fim de uso														
Berço ao túmulo														
Berço ao túmulo, incluindo benefícios e consumo líquido pós-uso como informação adicional ⁸														

Figura 4 – Quadro indicativo do ciclo de vida da edificação com detalhamento das fases, suas parcelas de energia e das extensões temporais que podem ser consideradas na análise.

Fonte: adaptação de International Energy Agency (2016, p. 78).

A energia operacional é a necessária para as funções requeridas para o uso do edifício, como condicionamento do ar ambiente, ventilação, iluminação, suprimento de água quente ou gelada, bombeamento, transporte interno (elevadores), segurança e comunicações. Deve ser contabilizada a partir da entrega do edifício para ocupação pelos usuários (BRE GLOBAL, 2018).

A contabilização de benefícios e custos energéticos adicionais causados pelo reuso, recuperação ou reciclagem dos componentes após a demolição deve considerar o potencial de cada um deles para essas ações, descontando-se as perdas e a energia gasta nesses processos, e também a energia poupada pelo reuso dos mesmos materiais na construção do próprio edifício analisado, a fim de evitar a contagem duplicada (BRE GLOBAL, 2018).

Os sistemas de geração FV – como todo produto resultante de um processo fabril – também possuem EI. Essa energia é utilizada nas fases de produção dos insumos – mineração de areia de quartzo para células de silício, por exemplo; seu processamento e purificação; manufatura dos módulos e de seus componentes; instalação e uso do sistema e, por fim, a desmontagem e descarte ou reciclagem

⁸ Ou “berço ao berço” (*cradle-to-cradle*), como mencionado em 2.2.

(FTHENAKIS; KIM, 2011). A EI aos sistemas FV, incluindo módulos e demais componentes, é geralmente expressa em unidades de energia por área dos módulos. Isso ocorre porque a demanda energética para produção dos principais itens desses sistemas – os módulos FV – depende mais da área do que da potência nominal (ALSEMA, 2012).

As formas de contabilizar o gasto energético apresentadas nesta subseção formam a base para entendimento das avaliações de ciclo de vida, que são descritas a seguir, e que sustentam a hipótese (ver 1.2) formulada para responder à pergunta de pesquisa deste trabalho (ver 1.1).

2.3 O conceito LC-ZEB

Muitas nações têm criado estratégias para atingir metas de baixo consumo de energia nos edifícios, ou de consumo líquido nulo. Porém consideram somente o uso de energia durante a fase de operação, desprezando o gasto energético em outras etapas do ciclo de vida da edificação (HERNANDEZ; KENNY, 2010; SESANA; SALVALAI, 2013). À medida que o consumo operacional é reduzido, a energia utilizada nestas outras etapas torna-se mais significativa, até atingir 100% para NZEB, já que neste caso a energia operacional líquida é nula. Se a estratégia para atingir metas de baixo consumo na fase de uso é aumentar a geração própria para cobrir ineficiências construtivas, esse sistema gerador ampliado carrega junto uma maior parcela de EI (HERNANDEZ; KENNY, 2011).

Da mesma forma, as estratégias para tornar o edifício mais eficiente modificam a relação entre as parcelas energéticas. Tecnologias passivas, como maior isolamento, vidros de melhor desempenho, redução de perdas por infiltração de ar ou recuperação de calor; ou ativas, como trocadores de calor, coletores solares, geração FV e aquecedores a biomassa têm em comum a característica de reduzir a energia operacional enquanto aumentam a energia incorporada (SARTORI; HESTNES, 2007, p. 250). Uma *Passive House*, por exemplo, pode consumir tanta energia quanto uma casa convencional de mesmo tamanho e ocupação, principalmente devido à energia incorporada nos materiais utilizados para seu isolamento (STEPHAN; CRAWFORD; DE MYTTENAERE, 2013).

Ao incluir a energia incorporada ao edifício e seus componentes no balanço anual junto com a energia utilizada na operação, tem-se uma perspectiva de ciclo de vida para a análise de consumo energético da edificação. Hernandez e Kenny

(2010) propuseram a denominação *life cycle zero energy building* (LC-ZEB) para os edifícios que, sob esse escopo, têm o balanço energético nulo, o que significa que a energia produzida por seus sistemas renováveis é igual ou superior à soma da energia incorporada com a utilizada na fase de operação.

O método proposto pelos autores consiste em calcular a energia em kWh/(m².ano), com todas as componentes convertidas em energia primária para uniformização de fontes⁹. A energia incorporada anualizada é determinada através da soma de todos os valores de energia empregada na extração de matéria-prima e fabricação dos materiais e sistemas utilizados na construção (AEE¹⁰, no trabalho referência), convertidos em energia primária e anualizados pela expectativa de vida de cada item. A energia operacional (AEU¹¹, no trabalho referência) é devida à ocupação e uso do edifício durante sua operação, principalmente para condicionamento de ar, iluminação e equipamentos, líquida em conjunto com a geração própria, com valores também convertidos para energia primária. A soma das duas parcelas resulta na energia anualizada do ciclo de vida do prédio (E_{CVE})¹². Segundo Hernandez e Kenny (2010), um edifício LC-ZEB tem E_{CVE} igual a zero, ou seja, trata-se de um prédio gerador da própria energia em quantidade superior à necessidade de uso – com tanto a energia gerada quanto a consumida convertidas para energia primária e em base anual – de tal forma que anule a energia empregada em sua construção e desconstrução. A Figura 5 mostra essa relação na forma de um gráfico, no qual o eixo das abscissas representa a energia incorporada enquanto o eixo das ordenadas representa a energia operacional. Um LC-ZEB deve possuir tais indicadores de forma a sua curva situar-se no quarto quadrante, sobre uma linha reta a 45° com os eixos.

⁹ As grandezas do trabalho referência foram renomeadas de acordo com suas equivalentes utilizadas nesta dissertação, a fim de facilitar a compreensão.

¹⁰ *Annualised Embodied Energy*.

¹¹ *Annualised Energy Use*.

¹² O trabalho referência chama de *Annualised Life Cycle Energy* (ALCE), porém não considera todas as parcelas de E_{CVE} como nesta dissertação.

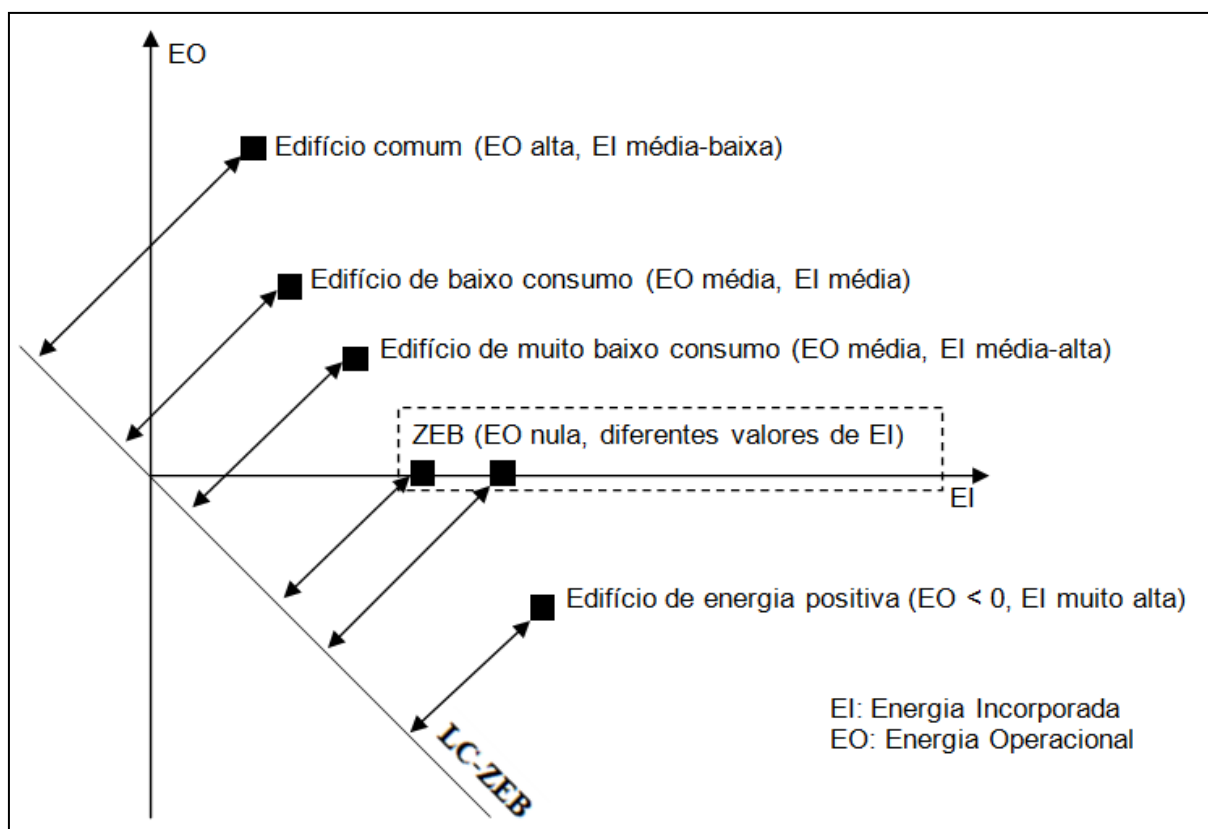


Figura 5 – Gráfico da relação entre os indicadores de energia anualizada para formar as condições de enquadramento de um LC-ZEB, que deve situar-se no quarto quadrante, de forma a atender à equação $EO + EI = 0$.

Fonte: adaptação de Hernandez e Kenny (2010, p. 818).

É interessante notar que o esforço para tornar a operação do edifício superavitária em energia demanda a instalação de sistemas geradores que aumentam a energia incorporada a ele, impondo dessa forma a necessidade de um rigoroso estudo de compromisso entre a solução para a energia operacional e seu efeito colateral na energia incorporada. Torna-se, portanto, imperioso que as estratégias arquitetônicas para busca da eficiência energética sejam valorizadas, reduzindo-se a necessidade de prover geração interna e seu impacto nos “custos energéticos” da construção. Mesmo essa busca de eficiência pode afetar o desempenho no ciclo de vida, pois um melhor isolamento da envoltória, por exemplo, também pode implicar maior energia incorporada.

Como exemplo de aplicação, Hernandez e Kenny (2010) estudaram o desempenho do isolamento térmico de uma casa projetada para atender os requisitos da norma alemã *Passive House* (PH). A casa possui camadas de poliestireno com espessura de 115 mm nas paredes, 85 mm no piso e 235 mm na cobertura. A simulação consistiu em aumentar essas medidas em 50 mm por vez e verificar o resultado obtido no consumo energético. Os valores partiram de $EO \approx$

10450 kWh/(m².ano) e EI \approx 1100 kWh/(m².ano) no caso base (PH) e chegaram a EO \approx 9700 kWh/(m².ano) e EI \approx 1400 kWh/(m².ano) no caso mais isolado (PH + 200 mm de poliestireno). Ao iniciar a trajetória de aumento no isolamento, a redução em EO superou o aumento em EI. À medida que avançou, esse ganho foi sendo reduzido até inverter, ou seja, o prédio muito isolado não reduziu EO em níveis suficientes para compensar o aumento em EI, deixando de ser atrativo tal investimento adicional. Comparando essa melhoria no isolamento com a instalação de geração FV, os autores concluíram que o primeiro *upgrade* de isolamento proporcionou ganho maior, mas a partir daí a geração foi mais benéfica.

Uma limitação do método LC-ZEB é o período – do berço ao portão – adotado pelos autores para contabilização de EI. A energia consumida no transporte dos materiais até o canteiro, sua instalação durante a obra, substituição ao longo da fase de uso e também a energia da fase de fim de vida são desprezadas. Por este motivo, o método avaliativo desenvolvido neste trabalho não utiliza as mesmas denominações e siglas apresentadas por Hernandez e Kenny (2010), apesar de constituir-se dos mesmos princípios gerais de análise energética no escopo do ciclo de vida da edificação.

2.4 Avaliação de ciclo de vida energético de edificação

Segundo as normas ISO 14040 e 14044, ACV é definida como:

[...] compilação e avaliação do fluxo de entrada e saída de produtos, materiais ou energia, e dos potenciais impactos ambientais de um sistema produtivo através de seu ciclo de vida completo. (INTERNATIONAL ORGANISATION..., 2006a, p. 2, 2006b, p. 2, tradução nossa).

ACVE é um tipo particular de ACV, em que a energia é a única medida para avaliação dos impactos ambientais. ACVE não substitui o método mais amplo, porém torna-se útil para a tomada de medidas para a eficiência energética (FAY; TRELOAR; IYER-RANIGA, 2000, p. 32).

As fases de uma ACV ou ACVE são:

- a) definição das metas e escopo;
- b) análise de inventário;
- c) avaliação de impacto;
- d) interpretação dos resultados do inventário.

Um dado importante para a formação dos indicadores resultantes da ACVE é a expectativa de vida da edificação. Para a conversão dos valores de EI – cujo consumo ocorre uma única vez para a energia incorporada inicial e a de demolição

ou algumas vezes para a recorrente – em consumo anual, é fundamental que se estabeleça um intervalo de tempo no qual são divididos esses valores. Em sua revisão de literatura, Berggren, Hall e Wall (2013) chegaram a uma expectativa média de 53 anos e mediana de 50 anos, com 154 casos de estudo, a maioria em países europeus.

No mesmo trabalho, os resultados mostraram que os edifícios que atenderam aos requisitos de PH e foram, portanto, considerados como de baixo consumo, ao receberem melhoria no desempenho operacional para torna-los NZEB, incrementaram o valor de energia incorporada em 25%. Enquanto isso, a energia total consumida no ciclo de vida foi reduzida em 60%, tornando um NZEB preferível, segundo os autores, a um edifício de baixo consumo operacional (BERGGREN; HALL; WALL, 2013).

Chastas *et al.* (2017) conduziram uma revisão de estudos de casos envolvendo ACVE em edificações residenciais. Foram analisados 90 casos selecionados por critérios de similaridade de métodos e de vida útil estimada. Nesta primeira seleção, o rateio entre energia incorporada e operacional resultou em uma faixa de 5% a 100% do total sendo atribuído à energia incorporada, sendo os menores valores (até 36%) pertencentes aos edifícios convencionais e os maiores (a partir de 69%), aos nZEBs. A existência do percentil 100 significa que foi considerada a energia operacional líquida, ou seja, a energia produzida no local foi descontada da energia consumida durante a fase de uso do prédio. Após uma segunda etapa de seleção, em que foram excluídos casos que não consideraram etapas de transporte, processamento de resíduos e destinação final, assim como aqueles que não incluíram a energia consumida para iluminação e serviços auxiliares, restaram 39 casos com faixas mais estreitas, de forma que os edifícios convencionais mostraram energia incorporada entre 6% e 20% da energia total, e os nZEBs de 74% a 100%.

Thormark (2006) estudou o efeito da escolha de materiais em um edifício multifamiliar na Suécia e obteve resultados que mostram, para uma expectativa de vida de 50 anos, a energia incorporada com participação de 40% do consumo total. Essa estimativa foi reduzida em até 17% e aumentada em até 6% com as simulações de mudança nos materiais construtivos.

Hernandez e Kenny (2011) apresentaram um método para avaliar o desempenho energético de um edifício sob a perspectiva de ciclo de vida, através do

indicador *Life-cycle – building energy rating* (LC-BER). Em estudo de caso no mesmo artigo, utilizando padrões representativos de construção entre 1997 e 2010, chegaram a resultados que indicam desde uma contribuição da energia incorporada inferior a 7% da total nas construções mais antigas até 38% nas mais recentes para a época da pesquisa, sem geração própria. Com geração prevista, essa contribuição passou a um patamar mínimo de 53%.

Hong, Shen e Feng (2013) simularam cinco diferentes cenários para ACVE de um edifício comercial na China, alterando os valores de energia incorporada aos materiais entre valores mínimos, máximos, médios e valores típicos publicados por dois diferentes autores. Os resultados indicaram que a energia incorporada ao edifício variou entre 2,52 e 9,76 GJ/m², e a energia operacional foi estimada em 0,21 GJ/(m².a). Considerando a vida útil de 50 anos conforme o artigo, a contribuição da energia incorporada foi de 19% a 48% do consumo energético total.

Na pesquisa de Himpe *et al.* (2013), os modelos estudados resultaram, para uma casa convencional, entre 10% e 19% de energia incorporada em relação à energia total consumida durante o ciclo de vida da edificação. Para o modelo “zero-energia”, este valor foi de 100%, como esperado, já que foi utilizado o conceito de NZEB naquele estudo. Os autores destacaram o impacto dos sistemas próprios de geração nos valores absolutos da energia incorporada. Nos casos analisados, a parcela de energia incorporada devido aos sistemas auxiliares do edifício, de 5% nos modelos convencionais, aumentou para até 48% nos NZEBs.

Em avaliação pós-ocupação de uma residência suburbana na Austrália, Crawford (2014) encontrou valores equivalentes a 21,76 GJ/m² para a energia incorporada inicial, recorrente e de desconstrução e de 14,7 GJ/m² para a energia operacional, o que significa uma contribuição da energia incorporada de 60% do total.

Cellura *et al.* (2014) estudaram o caso de uma residência localizada na Itália, projetada para ser NZEB, mas classificada pelos autores como nZEB por não ter conseguido atingir a meta de energia líquida nula. Em termos de energia primária, ela ficou longe desse objetivo. Os autores efetuaram cálculos considerando somente a área condicionada, toda a área fechada e uma terceira opção contendo também áreas cobertas não fechadas. A energia incorporada total resultou em 58,35 kWh/(m².a) e a energia operacional em 27 kWh/(m².a), quando considerada toda a área construída. A energia incorporada representou, portanto, 68% do total.

Em um estudo de caso com uma residência unifamiliar na Lituânia, Motuziene *et al.* (2016) simularam três tipos construtivos diferentes e chegaram a resultados que indicam a mesma contribuição de 16% da energia incorporada em relação à energia total. O tempo de vida da edificação foi considerado em 100 anos, o que contribuiu para reduzir esse percentual.

Em outro estudo de caso, Giordano, Demaria e Duzel (2017) realizaram a análise de um edifício comercial de 25 andares e obtiveram resultados que variam, conforme o tipo de material utilizado, entre 25% e 39% para o modelo convencional, e entre 57% e 71% para nZEB. Neste caso não há proximidade aos 100% porque o sistema FV local foi projetado para cobrir apenas parcialmente as necessidades energéticas.

2.4.1 ACVE de edificações no Brasil

Não foram encontrados muitos trabalhos relatando os resultados de ACVE no Brasil. Há falta de bases de dados nacionais, e são raras as pesquisas que incluem medidas de eficiência energética (INVIDIATA, 2017; MONTES, 2016). As seguintes dissertações e teses, embora apresentem importantes contribuições aos campos de pesquisa aos quais pertencem, não foram consideradas nesta revisão, pois:

- a) não mostram os valores numéricos dos resultados obtidos, limitando-se a apresentá-los em forma de gráficos, tornando imprecisa eventual coleta de dados (MUNARIM, 2014; SILVA, 2013);
- b) limitam o escopo da análise à energia incorporada inicial e não estimam o consumo da fase de uso (CARMINATTI JUNIOR, 2012; NABUT NETO, 2011);
- c) tratam especificamente de determinados materiais e não realizam ACVE do edifício (MANFREDINI, 2003).

Tavares (2006) elaborou ACVE para cinco modelos de residências, obtendo resultados entre 49% e 68% para a contribuição da energia incorporada¹³ em relação ao total, excluía a parcela de energia para cocção.

Bessa (2010) realizou ACVE de três tipos diferentes de fachadas para edifícios de escritórios em São Paulo e simulou o desempenho térmico delas,

¹³ Tavares (2006) contabilizou, como energia incorporada, as parcelas inicial e recorrente, e a parcela pós-operacional separadamente. Nesta dissertação, seus resultados foram transcritos de forma que a soma dessas três parcelas foi chamada de energia incorporada.

estimando o consumo de energia para climatização dos ambientes. Concluiu que a energia incorporada às fachadas representou entre 3% e 13% do consumo total estudado.

Silva (2012) dissertou sobre ACVE em habitações de interesse social e analisou sete casos, obtendo resultados que variaram de 23,2 a 27,7 kWh/(m².a) de energia incorporada¹⁴, e de 37,4 a 57 kWh/(m².a) de energia operacional, excluída a energia para cocção.

Em estudo dirigido a programa de habitação popular, Paulsen e Sposto (2013) elaboraram ACVE de uma residência unifamiliar de 48 m² construída pelo programa Minha Casa Minha Vida. Em 50 anos de vida útil, estimaram 367 GJ de energia incorporada inicial e 13 GJ de desconstrução, ou 44 kWh/(m².a). A energia operacional, excluindo a parcela utilizada para cocção, totalizou 64,5 kWh/(m².a). A contribuição da energia incorporada ficou, então, em 40% do consumo total.

Invidiata (2017) sintetizou dados de 12 pesquisas internacionais e concluiu que a energia incorporada resultou, em média, 40,5% da energia total consumida pelas edificações pesquisadas, em seus respectivos ciclos de vida.

A Tabela 2 apresenta um resumo dos dados coletados nos trabalhos pesquisados para esta subseção, exceto os que apresentam dados coletivos obtidos de revisões de literatura ou com ACVE parcial (somente de alguns componentes da edificação). A classificação de cada edificação quanto ao desempenho energético foi transcrita diretamente da fonte e não será objeto de análise neste trabalho. Serve apenas para prover uma vaga noção de que os casos referem-se a construções com maior ou menor compromisso quanto à eficiência energética. Esta síntese permitirá fazer comparações com os resultados obtidos nesta dissertação.

¹⁴ O trabalho referência apresenta a energia incorporada inicial, a de desconstrução e a operacional, sendo a recorrente de manutenção incluída nesta última. Para compatibilizar com a forma adotada nesta dissertação, foram somadas as três parcelas (inicial, recorrente e de desconstrução) e o resultado, com unidades convertidas, informado como energia incorporada.

Tabela 2 – Síntese dos resultados obtidos por trabalhos pesquisados que publicaram estimativas de consumo energético.

País	Tipo de edificação	Ano de construção	Classificação quanto ao desempenho energético	Área m ²	Vida útil estimada anos	E _{ICVE} kWh/(m ² .a)	EO kWh/(m ² .a)	E _{CCVE} kWh/(m ² .a)	Tipo de energia	Referência
Suécia	Quatro prédios de dois andares com 20 apartamentos no total	2001	<i>Low-energy</i>	2400	50	40	61	101	Não consta	Thormark (2006)
Irlanda	Casa geminada	1997 ¹⁵	Convencional	96	50	18,4	239	257,4	Primária	Hernandez e Kenny (2011)
Irlanda	Casa geminada	2010 ¹⁶	NZEB	96	50	43,7	-8	35,7	Primária	Hernandez e Kenny (2011)
China	Edifício comercial de cinco andares	Não consta	<i>Green building</i>	20105	50	14 a 54	58	72 a 112	Não consta	Hong, Shen e Feng (2013)
Bélgica	Casa unifamiliar	Não consta	Convencional	143	60	21 a 41	180	201 a 221	Primária	Himpe <i>et al.</i> (2013)
Bélgica	Casa unifamiliar	Não consta	PH	143	60	27 a 45	112	139 a 157	Primária	Himpe <i>et al.</i> (2013)
Bélgica	Casa unifamiliar	Não consta	NZEB	143	60	37 a 78	0	37 a 78	Primária	Himpe <i>et al.</i> (2013)
Austrália	Casa unifamiliar	Não consta	Não consta	291,3	50	121	82	203	Primária	Crawford (2014)
Itália	<i>Leaf house</i>	Não consta	<i>Low-energy</i>	1138	50	58,35	27	85,35	Primária	Cellura <i>et al.</i> (2014)
Lituânia	Modelo fictício de casa unifamiliar	Não consta	<i>Energy-efficient</i>	81	100	28 a 32	150 a 168	178 a 200	Primária	Motuziene <i>et al.</i> (2016)
Itália	Prédio comercial de 25 andares	Não consta	Convencional	22160	50	24,61 a 45,35	18,24 a 18,3	42,85 a 63,61	Primária	Giordano, Demaria e Duzel (2017)
Itália	Prédio comercial de 25 andares	Não consta	nZEB	22160	50	24,61 a 45,35	71,04 a 72,29	95,65 a 117,46	Primária	Giordano, Demaria e Duzel (2017)

¹⁵ Variações hipotéticas considerando padrões construtivos dos respectivos anos do estudo.¹⁶ Idem.

Tabela 2 (continuação)

País	Tipo de edificação	Ano de construção	Classificação quanto ao desempenho energético	Área m ²	Vida útil estimada anos	El _{CVE} kWh/(m ² .a)	EO kWh/(m ² .a)	E _{CVE} kWh/(m ² .a)	Tipo de energia	Fonte
Brasil	Cinco edificações residenciais	Não consta	Não consta	63 a 4340	50	33,78 a 42,94	20,2 a 37,9	53,98 a 80,84	Primária e secundária	Tavares (2006) ¹⁷
Brasil	Sete residências de interesse social	Não consta	Convencional	30 a 46,14	50	23,2 a 27,7	37,4 a 57	60,6 a 84,7	Não consta	Silva (2012)
Brasil	Residência unifamiliar de interesse social	Não consta	Convencional	48	50	44	64,5	108,5	Primária	Paulsen e Spoto (2013)

Fonte: várias – ver coluna “Referência”.

¹⁷ Excluída a energia para cocção (gás).

A elaboração de ACVE está fora do escopo deste trabalho. Apesar disto, o conhecimento de seus princípios e regulamentos, mesmo que de forma superficial, auxilia na compreensão dos parâmetros de energia incorporada obtidos diretamente de outras fontes, o que faz parte dos objetivos deste estudo.

As faixas percentuais compiladas dos trabalhos pesquisados para esta subseção formam um resumido banco de dados para validação dos resultados desta dissertação. Com finalidade similar, faz-se necessário conhecer um pouco dos indicadores e metas de consumo energético existentes em outros países, já que a legislação brasileira ainda omite esse assunto.

2.5 Panorama da eficiência energética em edificações em alguns países

O desempenho energético de edificações recebe diferentes graus de atenção dependendo do local que se examina. Segue-se um breve relato da situação corrente desse tema em alguns países.

2.5.1 Dinamarca

A Dinamarca tem padrões para eficiência energética em edificações desde 1960. O primeiro regulamento tratava do isolamento térmico da envoltória. Atualmente, o código para edificações¹⁸ estabelece metas para 2020, aplicáveis a novos prédios residenciais e comerciais. No nível mais abrangente, objetiva reduzir em 75% o consumo de energia em relação aos parâmetros de 2006, e em 40% as emissões de gás de efeito estufa, na comparação com 1990. Especificamente, a meta para consumo não residencial, incluindo a iluminação, é de 25 kWh/(m².ano), considerando somente a área de piso dos espaços condicionados. Além disso, há limites para perdas através da envoltória opaca do edifício e especificações para aberturas transparentes. Tais compromissos visam evitar a construção de novos prédios com muita geração própria, mas pouco isolados (THOMAS *et al.*, 2016; THOMSEN, 2014).

2.5.2 França

A França está mudando sua abordagem em relação ao uso de energia para uma avaliação ambiental que inclui ACV. As etiquetas de energia positiva para

¹⁸ *Danish Building Code.*

edificações BEPOS¹⁹ *effienergie* 2017 e BEPOS+ *effienergie* 2017 preveem, além de indicadores de projeto bioclimático, de parâmetros de infiltração e de controle de sistemas de ventilação, limites para consumo de energia primária. Tais limites são especificados por tipo de uso do edifício e são aplicados coeficientes de modulação por localização geográfica (região climática), altitude, área construída e emissão de gases de efeito estufa (EFFINERGIE, 2017; FRANCE, 2010). Os novos edifícios residenciais são projetados e construídos para consumir menos de 50 kWh/(m².a) de energia primária, enquanto os comerciais têm duas metas, conforme o uso de ar condicionado: 70 kWh/(m².a) para os que não utilizam e 110 kWh/(m².a) para os que utilizam esse recurso. Para serem consideradas de baixo consumo, casas devem ainda utilizar fontes de energia renovável, como aquecedores solares (EUROPEAN COMMISSION, 2013).

2.5.3 Alemanha

A regulação alemã prevê atingir metas nZEB em 2020 e NZEB em 2030. Os padrões nZEB são atinentes às etiquetas KfW *Efficiency House* 40, 55 e 70, cujos números representam o percentual máximo de consumo em relação a edifícios referenciais, em energia primária. Novos edifícios devem utilizar fontes renováveis. A renovação dos existentes também está prevista, com redução dos requisitos de 2010 em 80%, referentes ao uso de energia para aquecimento e também do consumo total de energia primária (ATTIA, 2018). A referência para edifícios residenciais de baixo consumo é de 100 kWh/(m².a), sendo portanto classificado como KfW 40 aquele que consome até 40 kWh/(m².a), e assim por diante (GLOBAL BUILDINGS PERFORMANCE NETWORK, 2009).

2.5.4 Reino Unido

O Reino Unido tem metas relacionadas à emissão de carbono. Através do *Climate Change Act*, o país compromete-se a reduzir essas emissões em 80% até 2050, tomando-se como referência os níveis de 1990 (UNITED KINGDOM, 2008). Para isto, o governo estabeleceu metas antecipadas em relação à EPBD. As novas construções residenciais devem ser do tipo “zero carbono” desde 2016 e as não residenciais deverão sê-lo a partir de 2019. As principais ações para atingir essas metas dizem respeito à redução no consumo de energia – através da melhoria no

¹⁹ *Bâtiment à énergie positive.*

isolamento térmico, automação dos sistemas de aquecimento e aumento na eficiência da iluminação e aparelhos em geral – e à “descarbonização” do suprimento de energia para aquecimento e refrigeração, ou seja, a substituição de combustíveis fósseis por alternativas de baixo carbono, como as bombas de calor (EUROPEAN COMMISSION, 2012).

Os limites de consumo de energia são de 39 kWh/(m².a) para apartamentos e de 46 kWh/(m².a) para casas (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2019).

2.5.5 Estados Unidos da América

O Departamento de Energia (DOE, na sigla em língua inglesa) americano, juntamente com o Instituto Nacional de Ciências da Construção (NIBS, na sigla em língua inglesa), desenvolveu métricas e manuais para uma definição nacional de ZEB. Além disso, premia construtoras que atendem aos padrões de alto desempenho energético no programa DOE *Builders Challenge*. A Ordem Executiva 13693 estabeleceu, para todo prédio federal planejado a partir de 2020 e com área maior do que 465 m² (5000 pés quadrados, na norma), a meta NZEB a partir de 2030, além de compromissos pela renovação de edifícios existentes. Estados como a Califórnia têm metas para construções residenciais novas serem NZEB a partir de 2020, e comerciais a partir de 2030. Os objetivos referem-se a energia primária, obtida a partir de fatores de conversão médios nacionais do padrão ASHRAE *Standard 105* (AMERICAN..., 2014; ATTIA, 2018; THE NATIONAL INSTITUTE OF BUILDING SCIENCES, 2015; UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2018).

2.6 Eficiência energética no Brasil

Em se tratando de eficiência energética nas edificações, o programa brasileiro de etiquetagem PBE Edifica é o que mais se aproxima da busca de objetivos de baixo consumo energético neste segmento. Dele fazem parte o RTQ-C e o RTQ-R, os quais contêm os requisitos necessários para classificação do nível de eficiência energética das edificações. Também há os Requisitos de Avaliação da Conformidade para Eficiência Energética de Edificações (RAC), a fim de obter-se a Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) do Inmetro para o edifício (INSTITUTO..., 2018).

O RTQ-R aplica-se a unidades habitacionais (UHs) autônomas, edificações unifamiliares, edificações multifamiliares e áreas de uso comum. São avaliadas as características da envoltória e do sistema de aquecimento de água, que devem atender a prescrições mínimas visando à eficiência energética. Além disso, há bonificações que visam incentivar o uso de estratégias mais eficientes (INSTITUTO..., 2012).

Essas bonificações referem-se ao uso racional de água e ao aproveitamento da iluminação e ventilação naturais, mas não incluem, na versão atual do RTQ-R, a geração de energia elétrica no local (geração distribuída), como o RTQ-C. Mesmo assim, para que a edificação residencial possa ter desempenho energético além da eficiência no uso e torne-se um NZEB, é necessário que também seja dotada desse recurso.

Dalbem (2018) dissertou sobre o assunto e realizou uma análise paramétrica a fim de verificar a viabilidade técnica e econômica de evoluir, a partir de casos-bases de UHs ineficientes, para o atendimento ao RTQ-R e PH. Obteve resultados de até 59% de redução no consumo de energia ao realizar as melhorias prescritas no RTQ-R para obtenção de ENCE nível A e de até 61% ao atender ao PH, ambas em relação ao cumprimento de requisitos mínimos previstos na NBR 15575:2013 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013).

Os parâmetros de ocupação e uso das UHs previstos no RTQ-R, somados aos limites estabelecidos por normas da ABNT, formam as principais fontes de dados de entrada para as simulações realizadas nesta pesquisa. Essa premissa deve-se ao caráter normativo ou regulatório de tais documentos, portanto seu atendimento é prioritário. Porém não são as únicas referências e, para alguns parâmetros, não se configuram nas melhores ou mais atualizadas fontes. Dados sobre infiltração de ar nos ambientes são tratados de forma genérica no RTQ-R, com valores únicos de parâmetros para esquadrias retangulares. O coeficiente do fluxo de ar por frestas é de 0,001 kg/(s.m), o expoente do fluxo de ar é de 0,65 e o coeficiente de descarga é de 0,60 (INSTITUTO..., 2012, p. 68).

Já o Manual de Simulação Computacional de Edifícios Naturalmente Ventilados no programa *EnergyPlus*, do Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações – CB3E/UFSC (PEREIRA *et al.*, 2013) e o artigo de Cruz e Viegas (2016), além de mais recentes, apresentam valores específicos por tipo de pivotagem e vedação. Pereira *et al.* (2013) republicaram os parâmetros originais de

Liddament (1986), porém com unidades convertidas para aplicação direta no *EnergyPlus*. Cruz e Viegas (2016) levantaram os dados a partir de ensaios, chegando ao valor médio de 0,78 para o coeficiente de descarga de janelas com eixo vertical lateral. Os autores salientam que seus ensaios observam efeitos presentes em edifícios reais, como a influência dos móveis no interior do compartimento e a rugosidade da superfície à qual a esquadria se insere (CRUZ; VIEGAS, 2016).

Outra variação na estratégia adotada neste trabalho refere-se à ventilação híbrida. O RTQ-R preconiza que a ventilação natural seja simulada em período complementar ao condicionamento artificial, ou seja, ventilação natural das 9h às 20h e condicionamento artificial das 21h às 8h. Debiasi (2016) avaliou o potencial de economia de energia elétrica com uso da ventilação híbrida em relação ao condicionamento artificial de edificações comerciais e utilizou o recurso *AvailabilityManager:HybridVentilation* do *EnergyPlus*, que permite controlar variáveis como temperatura, entalpia, entre outras, abrindo portas e janelas ou ligando o ar condicionado, conforme os parâmetros escolhidos na estratégia adotada. Para fazer o estudo, a autora utilizou a agenda de ocupação dos ambientes como referência para a disponibilidade tanto da ventilação natural como do condicionador de ar. Dessa forma, foram os fatores climáticos que definiram quando um ou outro recurso foi utilizado.

Além das ações de eficiência energética supramencionadas, há no Brasil o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica - Procel e o Prêmio Nacional de Conservação e Uso Racional da Energia, que objetivam promover ações de eficiência energética nas edificações, além de outras categorias de usuários (BRASIL, 2019). Criado em 1985, o PROCEL promoveu, até 2017, uma economia de energia de 128,6 bilhões de kWh (PROCEL INFO, 2019).

2.7 Geração distribuída no Brasil

Em relação à geração distribuída, o que viabilizou sua implementação em larga escala no Brasil foi a emissão da Resolução Normativa n.º 482, pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), em abril de 2012. Essa norma instituiu a microgeração distribuída e a minigeração distribuída no Brasil e criou o sistema de compensação de energia elétrica, nos moldes do *net metering* utilizado em alguns países. Por ele, o consumidor pode gerar energia elétrica na própria unidade

consumidora e injetar o excedente na rede pública de distribuição, obtendo créditos para uso em horários de geração insuficiente (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2012).

Em 2018, essas modalidades de geração distribuída atingiram potência instalada de 500 MW. A fonte solar FV predominou, com 99,5% de participação (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA, 2019). Esse dado corrobora a decisão, tomada no âmbito desta pesquisa, de explorar somente a geração FV entre as opções possíveis para geração própria, conforme exposição de motivos feita no fim da contextualização na seção 1.

2.8 Geração FV e simulação de desempenho

Das formas possíveis para produção de energia elétrica no local de consumo, a mais comum é a conversão FV, ou seja, a transformação direta de energia solar em elétrica através dos fótons que incidem sobre células FV (PINHO; GALDINO, 2014).

O componente FV pode ser aplicado em coberturas, fechamentos verticais, superfícies opacas e semitransparentes, como função estrutural, proteção solar e revestimento. Quando faz parte da composição da edificação, ele é considerado um sistema *building-integrated photovoltaic* (BIPV). Quando não faz, é considerado *building-applied photovoltaic* (BAPV). Jelle (2016) descreve a geração BIPV como um sistema que substitui o fechamento da envoltória externa do edifício, servindo simultaneamente de interface climática e fonte de eletricidade, proporcionando economia de material e mão de obra da construção e reduzindo custos com energia. Embora o sistema BIPV apresente-se como promissora fonte de temas para pesquisa, esta utiliza o BAPV por representar melhor a realidade da geração FV no Brasil, em que predomina a instalação dos módulos sobre telhados.

A opção por BAPV simplifica a simulação computacional, necessária à obtenção dos valores estimados de energia gerada. Como o escopo deste trabalho não contempla a verificação de diferentes tecnologias de geração, esta simplificação atende aos objetivos da pesquisa.

A avaliação da estimativa de geração FV pode ser feita por meio de cálculos manuais utilizando dados de radiação solar de mapas solarimétricos ou através de programas de simulação computacional, como PVsyst®, TRNSYS® e PV*SOL®, dentre outros. No entanto, a maioria destes programas limita-se apenas a realizar

uma projeção de geração de energia, sem estimar o consumo energético da edificação simulada. Lamberts *et al.* (2010, p. 15) afirmam que o *software EnergyPlus™* (US DEPARTMENT OF ENERGY, 2019a) é um dos mais utilizados como ferramenta para análise termoenergética de edificações. Ele também pode avaliar geração de energia por meio de superfícies que convertem radiação solar em energia elétrica, simulando uma geração FV.

Para estimar a produção de energia pelos módulos FV, o *EnergyPlus* apresenta três diferentes métodos de configuração. O método *Simple* requer, como dados de entrada, apenas um valor fixo para eficiência do módulo, ou uma matriz (*schedule*) de valores discretos. O método *Equivalent One-diode Model* (EODM), também conhecido como modelo TRNSYS de 4 ou 5 parâmetros, necessita da corrente e da tensão do módulo FV, e como resultado obtém o desempenho operacional de um painel FV dado pela insolação e temperatura operacional da célula. O terceiro e último método é o *Sandia Photovoltaic Array Performance Model* (SAPM), elaborado pelo *Sandia National Laboratory*, que usa equações de coeficientes baseados em medições reais e ensaios experimentais. Este método apresenta uma maior complexidade na configuração, pois solicita diversos dados de entrada referentes à curva característica do modelo do módulo FV em estudo (US DEPARTMENT OF ENERGY, 2019b).

Saber *et al.* (2014) realizaram medições durante um ano em um NZEB em Singapura. O edifício é destinado à pesquisa, e possui 1540 m² de módulos FV de diversas tecnologias, instalados em diferentes orientações. As medições envolveram temperatura ambiente e nos módulos FV, radiação solar, velocidade do vento e potência dos sistemas FV. Após, compararam os dados de temperatura e geração coletados com resultados de simulações pelos três métodos do *EnergyPlus*. Para células policristalinas, o método *Simple* mostrou o maior desvio das medições, entre 37% e 69% acima dos valores medidos de potência, conforme a hora do dia. SAPM forneceu estimativas quase tão distantes, com desvios de 37% a 59%. EODM foi o método que mais se aproximou das medições, com desvios de 21% a 53%. Em relação à temperatura das células, os desvios foram de 0,9% a 5,5% e de 3,4% a 7,2%, a menor, em comparação com as medições, respectivamente para EODM e SAPM. *Simple* não estima temperatura das células FV (SABER *et al.*, 2014, p. 5-6).

Peng *et al.* (2016) também realizaram experimento e compararam os resultados com simulações no *EnergyPlus*, mas apenas utilizando SAPM. A

estimativa resultou 2,13% superior à energia gerada no período de um ano, considerando o erro médio absoluto²⁰ dos valores comparados.

O método *Simple* é, portanto, de menor aplicabilidade. SAPM requer experimento para levantar os dados necessários, já que a biblioteca de dados atualmente disponível é de 2014 (NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY, 2014), e portanto já não representa o conjunto de módulos comercializados no mercado atual. Por essas razões, EODM foi o método escolhido para as simulações deste trabalho.

Outra ferramenta disponível para estimar a produção de energia elétrica através da conversão FV é o *software* Radiasol (LABSOL UFRGS, 2019), que calcula a intensidade da radiação solar direta e difusa em superfícies inclinadas, considerando a disponibilidade do recurso solar através do arquivo climático local. De posse dos valores acumulados da radiação incidente e utilizando fatores de eficiência na conversão, é possível estimar a quantidade de energia elétrica produzida em determinado tempo, no local, com a inclinação e o desvio azimutal específicos.

2.9 Síntese da revisão

Nesta seção foram apresentados os principais conceitos referentes ao tema da pesquisa, dentre os quais destacam-se:

- a) a eficiência energética na arquitetura deve contemplar, além dos requisitos de baixo consumo, medidas para garantir a saúde e o conforto dos ocupantes, e também a qualidade do ar interior;
- b) há diversos conceitos de edifício com alto desempenho energético, e eles variam conforme os objetivos a perseguir, como nZEB para baixo consumo líquido, NZEB para consumo líquido nulo, os sufixos *site* para contabilização da energia no local e *source* para contabilização na fonte primária;
- c) em todos esses conceitos, as metas de consumo são determinadas na forma líquida, ou seja, no balanço entre o que é consumido e o que é produzido no próprio edifício. Isso impõe a necessidade do uso da rede elétrica pública como sistema de armazenagem, recebendo a energia excedente produzida em horários de consumo inferior à geração e

²⁰ Média das diferenças entre os valores estimados e medidos.

fornecendo a energia necessária nos horários em que a demanda supera a capacidade geradora própria;

- d) normas estrangeiras, como a EPBD, são úteis para auxiliar na formação de bases da pesquisa e até mesmo no estabelecimento de metas, mas cada região deve ter seus indicadores, metas e métodos para a busca da eficiência e da sustentabilidade;
- e) os principais desafios para obter NZEB são a diferença entre o desempenho real e o que é planejado, a SBS e o estresse da equipe ao lidar com as múltiplas opções de projeto e a necessidade de tomar as principais decisões muito cedo;
- f) um NZEB deve consumir pouca energia e emitir pouco CO₂ pela qualidade do seu projeto, ao invés de compensar alto consumo com geração renovável;
- g) o consumo de energia pelo edifício ocorre ao longo de todo o seu ciclo de vida e divide-se em energia incorporada inicial, energia operacional, energia incorporada recorrente e energia incorporada de desconstrução;
- h) o objetivo da ACV é avaliar os possíveis impactos ambientais de um processo ao longo de seu ciclo de vida. A ACVE é um tipo particular, na qual somente a energia utilizada no processo é considerada;
- i) nas fontes consultadas, verifica-se predominância do uso de 50 anos como média de expectativa de vida para os edifícios estudados, e valores de energia incorporada de até 39% para prédios convencionais e a partir de 49% para nZEB, em relação ao total gasto no ciclo de vida. Os resultados mostram que, à medida que o desempenho energético do edifício aumenta, a energia incorporada ganha peso no balanço. Para NZEB, 100% da energia líquida é incorporada, já que a operacional é nula neste caso.

Foi feita também uma revisão sobre o “estado da arte” em alguns países desenvolvidos. De uma forma geral, todos têm normas que visam reduzir o consumo de edificações e dotá-las de geração própria. A maioria estabelece metas nZEB, subdividindo-as por sistema, como iluminação e condicionamento de ar. Outros, como os EUA, possuem planos para obtenção de NZEB. Em quase todos os casos, o escopo das normas restringe-se ao período de uso, sem estabelecimento de metas de consumo para todo o ciclo de vida. Por isso, esta pesquisa não segue

especificamente nenhum deles, mas propõe ACVE como método para equilibrar as ações de eficiência no uso da energia com a geração própria.

A revisão tratou também dos regulamentos atinentes ao tema no Brasil, como o RTQ-R para o desempenho de edificações residenciais e as regras da ANEEL para a microgeração distribuída, que permitem que os consumidores de energia elétrica usem a rede pública para armazenar seus excedentes de produção, utilizando-os quando necessário. Essa prerrogativa, o atendimento ao RTQ-R como requisito inicial de eficiência e a ACVE são as bases sobre as quais se apoiam os estudos de casos realizados nesta pesquisa.

Por fim, a seção descreve brevemente a condição atual da geração distribuída no Brasil e os sistemas de geração FV, consolidando a opção pelo uso dessa fonte na pesquisa aqui tratada; e os programas de simulação utilizados para obtenção das estimativas de consumo da fase de uso da edificação na ACVE.

3 Método de pesquisa

Esta seção apresenta uma descrição do método empregado para resolução do problema de pesquisa. Inicia com a identificação da estratégia de pesquisa adotada, suas características e a justificativa para sua escolha. A seguir, apresenta-se o delineamento do processo de pesquisa. Por fim, de forma bem detalhada, discriminam-se as etapas e técnicas envolvidas nos procedimentos aplicados.

3.1 Estratégia de pesquisa

Para uma correta escolha do método de pesquisa, é necessário caracterizar o problema de acordo com o estado evolutivo do conhecimento sobre o tema. Conforme Santos (2018), um problema de pesquisa pode ser enquadrado em uma das seguintes categorias:

- a) exploratória, para temas com pouco conhecimento disponível e, portanto, escassa compreensão sobre suas causas, efeitos, dinâmica e variáveis envolvidas;
- b) descritiva, nos casos em que há suficiente base teórica para fundamentar a análise e descrição do comportamento estudado. A pesquisa pode, então, contribuir para a validação externa dos resultados;
- c) explanatória, para fenômenos completamente dominados, inclusive em relação às suas principais variáveis, permitindo a busca de relações de causa e efeito.

O problema de pesquisa tratado nesta dissertação tem características explanatórias, uma vez que a revisão de literatura mostrou farta disponibilidade de artigos relacionados ao tema. Os fenômenos associados à busca de alto desempenho energético dos edifícios são plenamente conhecidos, e suas variáveis mais importantes estão estabelecidas. As lacunas encontradas referem-se ao

escopo da análise e às relações entre as variáveis consumo e geração de energia elétrica, conforme descrito na seção 1.

De acordo com Yin (2001), as ciências sociais possuem cinco estratégias principais de pesquisa: experimentos, levantamentos, análise de arquivos, pesquisas históricas e estudos de caso. Os experimentos mostram-se adequados para pesquisas que:

- a) respondem a perguntas dos tipos “como” e “por que”, em geral presentes nas pesquisas explanatórias;
- b) exigem controle sobre eventos comportamentais;
- c) focalizam eventos contemporâneos.

Este trabalho possui as três características, pois a principal questão que o autor pretende responder é “**por que** se devem adotar estratégias para a eficiência energética no edifício se, para considerá-lo como de baixo consumo líquido de energia, pode-se gerar mais eletricidade nele, a partir de fontes renováveis?” (ver 1.1), reforçando o já descrito enquadramento como uma pesquisa explanatória. Também deve-se reconhecer o controle sobre os eventos comportamentais associados à variação dos parâmetros do experimento. Por fim, não resta dúvida de que se trata de um tema contemporâneo, com regulamentos em construção e inúmeros artigos recentes correlacionados.

Por todo o exposto, a estratégia utilizada para atingir os objetivos desta pesquisa foi experimental, com uso de dois modelos obtidos de trabalhos acadêmicos nacionais, uma tese e uma dissertação. Dados de outras pesquisas foram aproveitados e foi utilizada a técnica da simulação computacional como ferramenta auxiliar.

As simulações impõem a necessidade de escolha de locais pré-definidos. Foi feita opção pela cidade de Pelotas, por ser uma das maiores cidades do estado do Rio Grande do Sul e destacar-se nacionalmente na adesão a programas habitacionais (PINTO; MEDVEDOVSKI, 2015), constituindo-se portanto em um importante polo de AEC.

Após selecionar os modelos de UH unifamiliares, foi calculado o balanço energético em seus respectivos ciclos de vida com inserção da geração FV. A capacidade do sistema FV foi incrementada em dois módulos por vez, até ocupar toda a área disponível na cobertura. A cada incremento, a produção de energia e o consumo operacional foram estimados, e este foi somado à energia incorporada à

edificação e seus sistemas, inclusive o FV. As variáveis do experimento foram, portanto:

a) independentes:

- produção de energia do sistema FV;
- energia incorporada ao sistema FV;

b) dependente:

- energia operacional da edificação.

Não foram estabelecidas variáveis de controle (espúrias) a serem monitoradas. O sombreamento da cobertura causado pelos módulos FV altera o desempenho térmico da edificação, mas esse efeito não foi tratado individualmente. Apenas o resultado final em consumo para climatização – influenciado por ele – foi levado em conta.

O impacto dos sucessivos incrementos do sistema FV na energia operacional da edificação foi analisado de forma a obterem-se os respectivos valores de energia total consumida no ciclo de vida da edificação (E_{CVE}). Todos os valores de energia – produzida e consumida – foram normalizados pela área de piso de cada UH e anualizados, resultando na unidade kWh/(m².a).

Os modelos utilizados nesta pesquisa representaram uma UH energeticamente ineficiente – isto é, sem um projeto voltado para este fim – e outra com características que a habilitam a ser considerada uma PH (ver 3.3.2). Tal abrangência visou testar o método em casos extremos de eficiência energética para validação e para a generalização possível dentro dos limites deste trabalho.

3.2 Relações entre os objetivos específicos e o método

A Figura 6 mostra uma síntese da forma com que os objetivos específicos relacionados em 1.3 foram cumpridos.

Objetivos	Justificativas	Métodos	Resultados esperados
Analisar o desempenho térmico e o consumo de energia elétrica na fase de uso de modelos de edificações unifamiliares.	Utilização nos cálculos do balanço energético.	Simulação através de ferramenta computacional.	Obtenção dos valores de consumo de energia elétrica na fase de uso.
Estimar a geração de energia no próprio local, por fonte solar FV, em quantidade suficiente para suprir a necessidade operacional e compensar a energia incorporada.	Utilização nos cálculos do balanço energético.	Cálculo com dados de radiação solar e simulação através de ferramenta computacional.	Obtenção dos valores de produção de energia elétrica.
Estabelecer relações entre a qualidade de projeto – em termos de eficiência energética – dos modelos e incrementos de produção de energia elétrica a partir da geração própria, com a finalidade de obter o menor gasto energético no ciclo de vida da edificação.	Formação de uma síntese dos resultados obtidos, de forma a servir como instrumento de avaliação.	Análise dos resultados do experimento, em busca da relação causa-efeito entre as variáveis pesquisadas.	Sistematização dos resultados obtidos com a pesquisa em um conjunto de ações a serem indicadas como método avaliativo.

Figura 6 – Quadro indicativo da organização do método pelos objetivos específicos.

Fonte: elaboração própria (2019).

3.3 Estrutura geral da pesquisa

O método do trabalho foi organizado em etapas, conforme ilustrado na Figura 7.

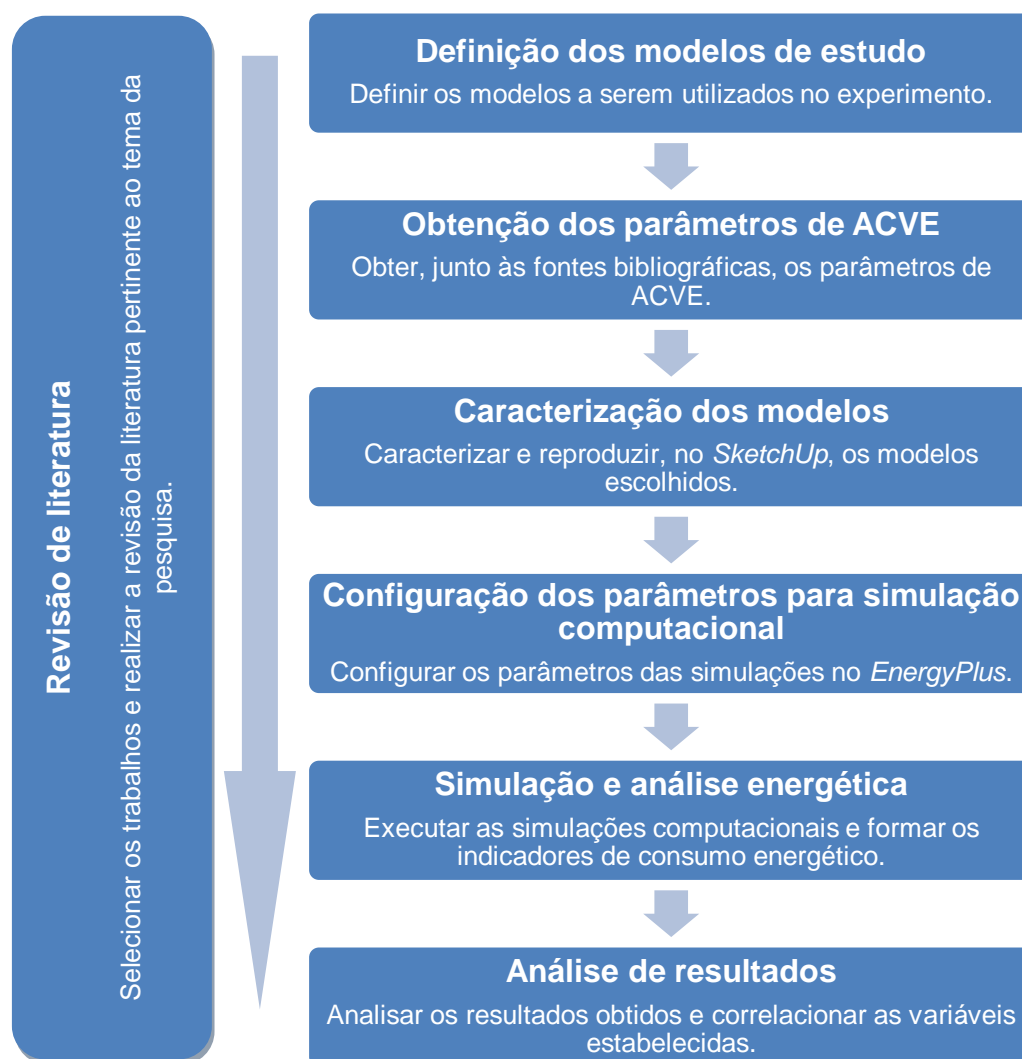


Figura 7 – Fluxograma do trabalho.
Fonte: elaboração própria (2019).

As atividades da pesquisa decorreram em sequência, com a revisão de literatura acompanhando e subsidiando todas elas.

As subseções a seguir descrevem as etapas em detalhes.

3.3.1 Revisão de literatura

A seleção de fontes para revisão de literatura iniciou-se com as referências da tese (DIDONÉ, 2014) que serviu de ponto de partida para a escolha do tema. A partir de sua busca no Portal de Periódicos CAPES/MEC (BRASIL. MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO, 2018) e *Science Direct* (ELSEVIER, 2019), e da sua inclusão no banco próprio do Mendeley (MENDELEY LTD, 2019), trabalhos publicados com temas similares foram apresentados pelos referidos sistemas e por seus boletins enviados periodicamente por *email*. Todos os títulos ofertados, com data de publicação a partir de 2010, foram verificados. Os que mostraram identificação com os tópicos de

interesse para este trabalho tiveram seus resumos examinados. Os que permaneceram mostrando essa identificação foram incluídos no banco do Mendeley para leitura completa. A mesma forma de seleção foi aplicada às referências dos trabalhos lidos, o que criou uma progressão acelerada do processo de revisão.

Mesmo após a primeira fase desta atividade, feita para consolidar o tema da pesquisa, a revisão de literatura permaneceu sendo executada durante todo o desenvolvimento do trabalho, a cada vez em que foi necessário buscar subsídios para algum ponto específico, principalmente em relação à escolha de parâmetros para simulação e cálculos.

3.3.2 Definição dos modelos de estudo

Os modelos foram obtidos de Tavares (2006) e Dalbem (2018). O primeiro utilizou cinco diferentes tipos de edifícios residenciais, sendo três unifamiliares – com padrões para renda baixa, média e alta – e dois multifamiliares – para renda baixa e média. Essa amostra representou, segundo Tavares (2006), um perfil do setor residencial brasileiro naquela época. O modelo de UH unifamiliar de baixa renda foi utilizado nesta dissertação, assim como os valores de energia incorporada calculados no trabalho referência. Esse modelo apresentou significância de 58%, ou seja, mais da metade das residências brasileiras tinham as características dele (TAVARES, 2006).

Dalbem (2018) analisou um modelo de habitação de interesse social unifamiliar, variando parâmetros construtivos para obter desempenho termoenergético crescente até o atendimento à PH. Das soluções encontradas pela autora, foi utilizada nesta dissertação a de número 3, que é um modelo que atende aos requisitos para obtenção de nível A do RTQ-R, porém preparado para o mínimo consumo de energia para aquecimento e graus-horas de refrigeração.

Desta forma, o presente trabalho desenvolveu-se com dois modelos extremos de UH unifamiliar de interesse social: um ineficiente no uso da energia e outro que obteve, para a mesma zona bioclimática abordada nesta pesquisa, o menor consumo a partir de uma análise comparativa entre opções de alto desempenho – RTQ-R e PH (DALBEM, 2018, p. 91). Por apresentarem características distintas, esses modelos não foram comparados entre si, mas utilizados em suas versões sem e com geração própria, a fim de verificar o balanço energético de cada um deles. A distinção entre os modelos teve a função de propiciar uma análise sobre uma

edificação previamente reconhecida como ineficiente e outra como eficiente no uso da energia, por suas características construtivas.

A seguir, são apresentados tais modelos e suas características físicas, limitadas ao que os respectivos autores publicaram. Dados originalmente omitidos estão identificados pontualmente ao longo de cada subseção ou determinados em 3.3.5.1.

3.3.2.1 Modelo 1 – habitação energeticamente ineficiente

A Figura 8 mostra a planta do primeiro modelo de casa estudado, e a Figura 9 apresenta suas principais características físicas. No trabalho referência, este também foi chamado de “modelo 1” (TAVARES, 2006, p. 122). As medidas internas foram adaptadas para preservar as dimensões externas originais, porém atribuindo-se espessuras para as paredes, que foram desconsideradas no cálculo de áreas internas no trabalho referência.

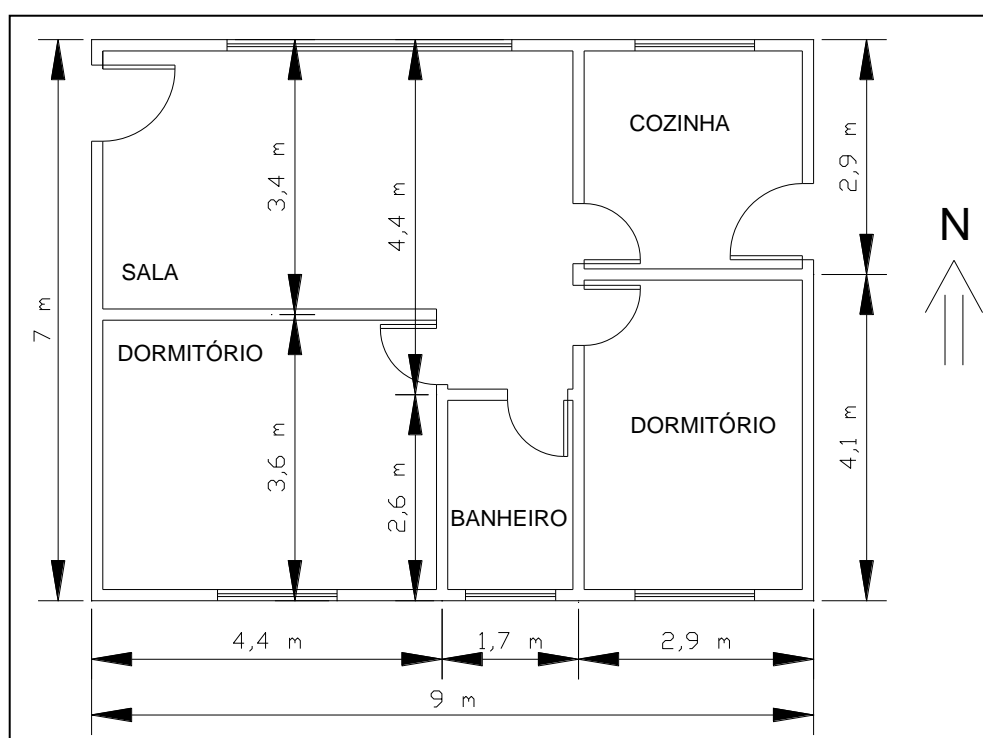


Figura 8 – Planta do modelo 1.

Fonte: adaptação de Tavares (2006, p. 123).

Estrutura	Alvenaria ²¹
Pé direito	2,8 m
Paredes	Blocos cerâmicos 8 furos (9 cm x 19 cm x 19 cm). Dimensões totais: 14 cm (9 cm do bloco, 2,5 cm do reboco interno e 2,5 cm do reboco externo).
Acabamento das paredes	Reboco interno e externo, pintura em branco. ²²
Cobertura	Laje armada em blocos cerâmicos, vigotas em concreto armado. Espessura total 12 cm, rebocada. Recoberta com telhas de fibrocimento sobre estrutura de madeira.
Janelas	Esquadrias de ferro, vidros planos simples com espessura 3 mm. Área de esquadrias: 1/6 da área do piso.
Portas	Portas em madeira. Externas: 0,9 m x 2,1 m. Internas: 0,7 m x 2,1 m.
Pisos	Banheiro e cozinha em cerâmica comum. Nos demais cômodos em tacos de madeira.

Figura 9 – Quadro de características físicas do modelo 1.

Fonte: adaptação de Tavares (2006, p. 123).

3.3.2.2 Modelo 2 – habitação energeticamente eficiente

A Figura 10 mostra a planta baixa do segundo modelo de casa estudado, e a Figura 11 apresenta suas principais características físicas. No trabalho referência, este modelo foi chamado de “solução 3” (DALBEM, 2018, p. 56). As dimensões das zonas térmicas foram adaptadas para que as respectivas áreas de piso correspondam à Tabela 6 do trabalho referência (DALBEM, 2018, p. 43). A orientação geográfica foi invertida para voltar a fachada frontal para Norte, já que, nesta pesquisa, este modelo é considerado de melhor desempenho energético, enquanto o modelo 1 tem a função oposta. Pelo mesmo motivo, foram inseridas proteções (sombreamento) para as janelas do modelo 2 (que não as possui na versão original), enquanto o modelo 1 foi reproduzido sem essa melhoria.

²¹ A estrutura no trabalho referência é de concreto armado. Como os efeitos de pontes térmicas estão fora do escopo desta pesquisa, a estrutura foi modificada para simplificar a modelagem.

²² No trabalho referência, as paredes internas da cozinha e do banheiro têm revestimento de azulejos do piso até 1,8 m de altura. Para esta dissertação, esse revestimento foi omitido.

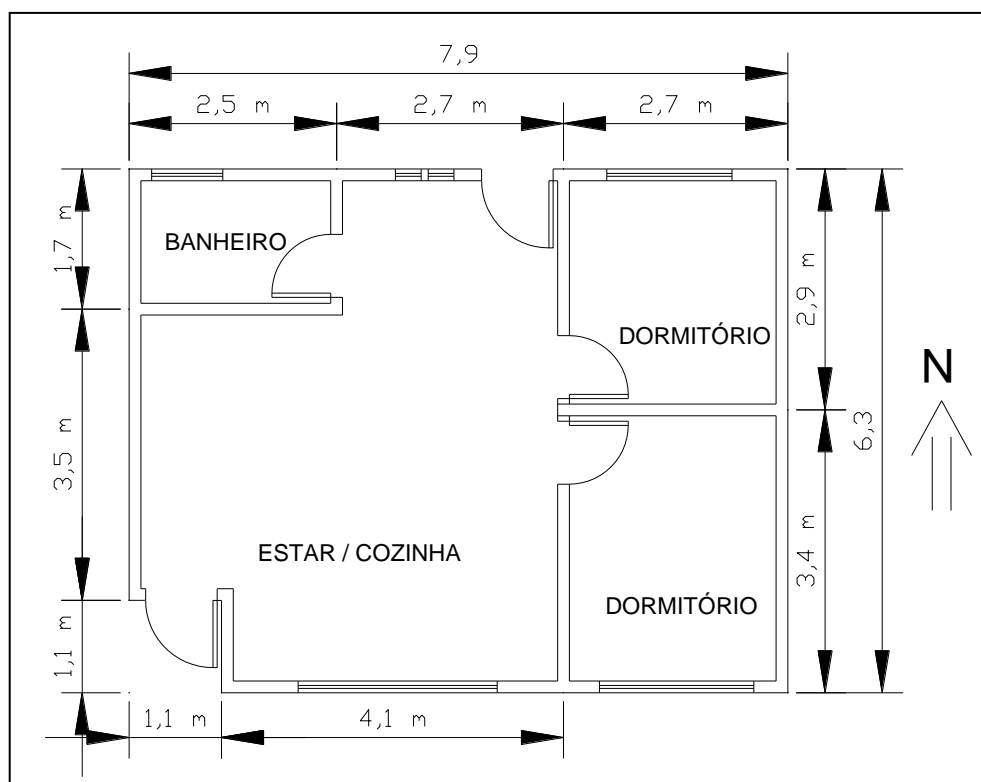


Figura 10 – Planta do modelo 2.

Fonte: adaptação de Dalbem (2018, p. 42, 43).

Estrutura	Alvenaria
Pé direito	2,6 m
Paredes	Externas: blocos cerâmicos 6 furos (14 cm x 19 cm x 29 cm). Dimensões totais: 18 cm (14 cm do bloco, 2 cm do reboco interno e 2 cm do reboco externo). Isolamento térmico em EPS com espessura de 12 cm. Internas: tijolos maciços. Dimensões totais: 15 cm (11 cm do tijolo, 2 cm do reboco interno e 2 cm do reboco externo).
Acabamento das paredes	Reboco interno e externo, pintura em branco ($\alpha=0,2$).
Cobertura	Forro de madeira e telhas de fibrocimento 8 mm. Isolamento térmico em EPS com espessura de 12 cm. Pintura em branco ($\alpha=0,2$).
Janelas	Caixilhos de PVC e vidro insulado. Área de esquadrias: 15,5% da área do piso.
Portas	Portas em madeira. Externas: 0,8 m x 2,1 m. Internas: 0,7 m x 2,1 m.
Pisos	Revestimento cerâmico sobre laje de concreto 10 cm. Isolamento térmico em EPS com espessura de 1 cm.

Figura 11 – Quadro de características físicas do modelo 2.

Fonte: adaptação de Dalbem (2018, p. 42-44, 50, 51, 63, 83, 91).

3.3.3 Obtenção dos parâmetros de ACVE

A partir da constatação de que poucos materiais correspondem a 80% da energia incorporada das edificações (ver 1.6), Tavares (2006) utilizou ACVs de outros autores e fez análises de produção e estatística para determinar os valores médios dos resultados que encontrou. As análises de produção envolveram

indústrias dos estados RJ e SC. E as análises estatísticas foram baseadas em relatórios de órgãos de classe dos fabricantes e no Balanço Energético Nacional disponível à época. Para cada item analisado, somou os valores das diversas fontes e encontrou a média. Para os demais materiais, usou valores encontrados na literatura, tais como ACVs desenvolvidas em outros trabalhos e dados de relatórios publicados. Isso permitiu generalizar os resultados obtidos para considerá-los como representativos dos materiais de construção em âmbito nacional.

Esta pesquisa também adotou o conceito de predominância de alguns itens de materiais para, a partir dos valores unitários de energia incorporada atribuídos ao modelo 1 por Tavares (2006), aplicá-los ao modelo 2, que não possui essa análise em Dalbem (2018). Neste sentido, primeiro foram determinados quais seriam os itens que, em Tavares (2006), representam 80% da energia incorporada total da UH. Os valores unitários de energia incorporada a esses materiais foram obtidos do mesmo trabalho. Após, as quantidades destes itens foram determinadas para o modelo 2 a partir das informações de Dalbem (2018). Uma vez calculada a energia incorporada a esses itens, obteve-se 80% do total de acordo com o que previu Tavares (2006). Para chegar aos 100%, este valor foi dividido por 0,8. Por último, foi adicionado o valor da energia incorporada ao isolamento em EPS, conforme detalhado a seguir. Este último passo foi necessário porque os modelos de Tavares (2006) não possuem esse material, que tem valor significativo de energia incorporada.

Tavares (2006) elaborou detalhada pesquisa sobre energia incorporada em materiais de construção brasileiros. Os valores encontrados foram reproduzidos no Anexo A, em unidade de energia por unidade de massa e/ou volume, assim como o percentual de desperdício de cada material. A partir desses dados, de posse da quantidade de cada material empregado em seus modelos, ele compôs os montantes de energia incorporada inicial. Para atingir seus objetivos, várias formas de agrupamento dos resultados foram apresentadas, como por partes da edificação e por equipamentos. Para esta dissertação, apenas os valores totais do modelo 1 – por fase do ciclo de vida – foram significativos para a análise inicial, e os valores unitários por materiais serviram para aplicação no modelo 2, por equivalência.

3.3.3.1 Parâmetros originais aplicados ao modelo 1

A Tabela 3 mostra os resultados obtidos por Tavares (2006), agrupados por fase do ciclo de vida da edificação modelo 1.

Tabela 3 – Discriminação das fases e etapas com respectivos valores de energia incorporada e operacional para o modelo 1, com seus valores originais.

Fase	Etapas	Sigla	Descrição	Consumo de energia (GJ/m ²)
Pré-uso	1	EI _{mat}	Prospecção, fabricação e transporte de insumos	3,51
	2		Fabricação dos materiais de construção	
	3	EI _{tr.mat}	Transporte dos materiais de construção	0,29
	4	EI _{eq.obra}	Energia consumida por equipamentos na obra	0,02
	5	EI _{tr.obra}	Transporte dos trabalhadores até a obra	(0,38)*
	6	EI _{desp}	Desperdício de materiais	0,66
	7	EI _{tr.desp}	Transporte do desperdício	0,15
Uso	8	EI _{recorrente}	Reposição de materiais	2,44
	9	EO _{equip}	Energia consumida por eletrodomésticos	5,54
	10	EO _{cocção}	Energia para cocção de alimentos	5,54
Pós-uso	11	EI _{dem}	Demolição e remoção dos resíduos	0,38
	12	EI _{tr.dem}	Transporte do material demolido	0,11
		EI _{CVE}	Total do ciclo de vida	18,63

* Contabilizado à parte.

Fonte: adaptação de Tavares (2006, p. 137).

Todas as siglas utilizadas seguiram o padrão: EI é energia incorporada e EO é energia operacional. Para esta dissertação, a soma dos valores de energia das etapas pré-uso foi chamada de EI_{inicial} e das etapas pós-uso de EI_{desconstrução}. Da fase de uso, foi considerada apenas a etapa 8 (EI_{recorrente}) que o autor referência utilizou. Na etapa 9, EO_{equip}, que é a energia operacional consumida na UH, exceto para cocção, foi substituída pelos resultados de consumo obtidos por simulação. A energia para cocção – lenha e gás – está fora do escopo. Neste trabalho, a energia consumida por eletrodomésticos e pelos sistemas de iluminação e ar condicionado da edificação foi chamada de energia operacional, e a soma das parcelas de energia incorporada (EI_{inicial}, EI_{recorrente} e EI_{desconstrução}) foi chamada de energia incorporada no ciclo de vida energético (EI_{CVE}).

A Tabela 4 e a Tabela 5 relacionam os principais materiais utilizados no modelo 1 em relação à energia incorporada. Há alteração nas posições de alguns materiais quando se contabiliza somente a energia incorporada inicial ou quando se inclui a manutenção e reformas ao longo do ciclo de vida. Especialmente a tinta ganhou maior importância, passando do quarto para o primeiro lugar entre os materiais de maior energia incorporada. As tabelas indicam que os seis principais

materiais consomem, aproximadamente, 80% da energia incorporada total da edificação nas fases pré-uso e uso.

Tabela 4 – Energia incorporada inicial nos principais materiais utilizados no modelo 1.

Item	Material	Ei inicial (MJ)	%	% acumulado
1	Cerâmica vermelha	80.358,56	28,95	28,95
2	Cimento	56.385,93	20,31	49,26
3	Aço	40.996,13	14,77	64,03
4	Tinta	19.531,65	7,04	71,06
5	Concreto	15.504,70	5,59	76,65
6	Pedra	14.289,21	5,15	81,79
	Outros (17)	50.540,59	18,21	100,00

Fonte: adaptação de Tavares (2006, p. 141).

Tabela 5 – Energia incorporada total, exceto pós-uso, nos principais materiais utilizados no modelo 1.

Item	Material	Ei total (MJ)	%	% acumulado
1	Tinta	97.658,26	23,19	23,19
2	Cerâmica vermelha	80.387,82	19,09	42,28
3	Cimento	60.620,21	14,40	56,68
4	Aço	55.329,58	13,14	69,82
5	Concreto	29.105,02	6,91	76,73
6	Pedra	14.289,20	3,39	80,12
	Outros (17)	83.713,49	19,88	100,00

Fonte: adaptação de Tavares (2006, p. 141).

Apesar do tempo decorrido desde a realização da ACVE (TAVARES, 2006), uma pesquisa mais recente (INVIDIATA, 2017) constatou não haver muita diferença entre as bases de dados disponíveis, e a mais citada dentre as bases nacionais naquela pesquisa foi justamente a de Tavares (2006). Além disso, a comparação que Invidiata (2017) realizou entre os dados de energia incorporada aos materiais resultou em valores de desvio padrão elevadíssimos. Esses valores encontram-se em uma faixa de 38%²³ a 98%²⁴ para os mesmos seis itens principais adotados nesta dissertação. Tal ordem de dispersão torna imprecisa qualquer forma de atualização que não seja a realização de nova e específica ACVE. Como tal análise não faz parte do escopo deste trabalho, os valores originais publicados por Tavares (2006) foram mantidos para os cálculos a seguir.

Para a fase de uso ($E_{\text{recorrente}}$) e pós-uso ($E_{\text{desconstrução}}$), Tavares (2006) não detalhou os valores por material. Em lugar disso, apresentou os totais conforme mostra a Tabela 6.

²³ Cimento comum com valor médio de 5,35 MJ/kg e desvio padrão de 2,05 MJ/kg (INVIDIATA, 2017, p. 143).

²⁴ Concreto com valor médio de 5,8 MJ/kg e desvio padrão de 5,7 MJ/kg (INVIDIATA, 2017, p. 143).

Tabela 6 – Energia incorporada por etapas no modelo 1.

Etapa	EI (GJ/m ²)	%
EI _{inicial}	4,63	61,2
EI _{recorrente}	2,44	32,3
EI _{desconstrução}	0,49	6,5
EI _{total}	7,56	100,0

Fonte: adaptação de Tavares (2006, p. 139).

Dividindo-se os valores totais pelo tempo de vida atribuído às UHs, de 50 anos (TAVARES, 2006), e convertendo-se unidades, a energia incorporada anualizada do modelo 1 resultou em 42 kWh/(m².a).

3.3.3.2 Atribuição de parâmetros ao modelo 2

Aos materiais componentes do modelo 2 foram atribuídos valores de energia incorporada de acordo com os mesmos critérios adotados para o modelo 1. Os seis itens mais significativos em relação à energia incorporada – cerâmica vermelha, cimento, aço, tinta, concreto e pedra, receberam valoração individual. O valor resultante foi dividido por 0,8, como forma de considerá-lo como 80% de um subtotal que inclui somente materiais similares aos utilizados no trabalho que originou os valores unitários de energia incorporada (TAVARES, 2006). A esse subtotal foi adicionada a energia incorporada ao EPS utilizado para isolamento térmico. Esse procedimento foi necessário porque tal material tem valor elevado de energia incorporada e não está presente no modelo 1, portanto não pôde ser incluído nos 80% dos principais materiais nem nos 20% dos restantes.

Nem todos os materiais foram quantificados por Dalbem (2018). Para a cerâmica vermelha, foi feita a razão entre os volumes de tijolos (área líquida de paredes, ou seja, descontadas as aberturas) x espessura dos tijolos dos modelos, e esta razão aplicada à quantidade de cerâmica vermelha utilizado no modelo 1. Para o cimento, o mesmo procedimento foi feito, porém com a razão entre os volumes de rebocos. Ambas as estimativas foram aproximadas, pois o modelo 2 tem tipos diferentes de tijolos nas paredes externas e internas, enquanto o modelo 1 tem apenas um tipo de tijolos, e também porque a diferença entre a quantidade de cimento para assentamento dos tijolos foi desconsiderada dessa forma. Porém, dado o caráter estatístico da formação dos valores de energia incorporada utilizados, não se faz necessária maior precisão nessas estimativas.

Outros materiais foram quantificados em unidades incompatíveis com os valores unitários de energia incorporada que a revisão de literatura disponibilizou. O aço galvanizado está discriminado por Dalbem (2018) em dimensão linear de calhas, no total de 18,12 m, sem outros detalhes. Para realizar a conversão para massa, foi escolhida a calha quadrada da empresa Mopa, cuja massa específica é de 1,135 kg/m (MOPA..., 2019). O aço laminado está dividido em armadura de tela (radier) e cintas de amarração. A tela radier foi especificada em área de 51,09 m². Para a conversão, foi adotada a especificação do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI) da Caixa Econômica Federal, Q-196, com malha 10 cm x 10 cm de aço CA 60, no valor de 3,11 kg/m² (CAIXA ECONÔMICA FEDERAL, 2017). Após a conversão, foi realizada a soma com a massa de aço das cintas de amarração, já diretamente especificada em 6,59 kg.

Considerando as quantidades de materiais levantadas por Dalbem (2018) ou as estimativas explicadas nos parágrafos anteriores desta subseção, os valores de energia incorporada inicial dos materiais e seus percentuais de desperdício publicados por Tavares (2006), obtiveram-se os resultados mostrados na Tabela 7.

Tabela 7 – Energia incorporada inicial nos principais materiais utilizados no modelo 2.

Item	Material	Quantidade	EI	Desperdício	EI inicial (MJ)
1	Cerâmica vermelha	27.579 kg	2,9 MJ/kg	15%	91.976,71
2	Cimento	5.885 kg	4,2 MJ/kg	40%	34.603,84
3	Aço – chapa galvanizada	20,56 kg	33,8 MJ/kg	-	695,14
	Aço – laminado CA ²⁵	165,48 kg	30 MJ/kg	10%	5.460,84
	Tinta acrílica ²⁶	25 kg	61 MJ/kg	15%	1.753,75
4	Tinta PVA	41 kg	65 MJ/kg	15%	3.064,75
	Verniz (tinta óleo)	2 kg	98,1 MJ/kg	15%	225,63
5	Concreto	6,79 m ³	2.760 MJ/m ³	10%	20.614,44
6	Pedra	3,58 m ³	247,5 MJ/m ³	40%	1.240,47
Subtotal principais materiais					159.635,57
Subtotal sem EPS = Subtotal principais materiais / 0,8					199.544,46
7	EPS ²⁷	15,61 m ³	6.160 MJ/m ³	-	96.167,45
Total					295.711,91

Fonte: adaptação de Tavares (2006, p. 193-194) e Dalbem (2018, p. 63).

Dividindo-se o valor total pela área de piso (49 m²), resultou em 6.035 MJ/m², ou 6,04 GJ/m².

²⁵ Foi utilizada EI do aço CA 50A (TAVARES, 2006) e quantidade do aço CA 60 (DALBEM, 2018), para obtenção de resultado aproximado.

²⁶ Conversão de área de superfície pintada em massa de tinta (acrílica, PVA e verniz) feita com auxílio de calculadora de tinta *online* (LEROY MERLIN, 2019).

²⁷ Foram somados os volumes de EPS aplicados no piso, paredes e cobertura, utilizando as áreas (ver Anexo B) e as espessuras (ver Figura 11).

Como o modelo 1 não possui discriminação da energia incorporada durante as fases de uso e pós-uso por material, os mesmos percentuais da Tabela 6 foram atribuídos ao modelo 2. Fixando-se, portanto, a energia incorporada inicial em 6,04 GJ/m² e os percentuais de rateio entre as etapas, o resultado é apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 – Energia incorporada por etapas no modelo 2.

Etapa	EI (GJ/m ²)	%
EI _{inicial}	6,04	61,2
EI _{recorrente}	3,19	32,3
EI _{desconstrução}	0,64	6,5
EI _{total}	9,87	100,0

Fonte: elaboração própria (2019).

Dividindo-se o valor total pelo tempo de vida atribuído às UHs, de 50 anos (TAVARES, 2006), e convertendo-se unidades, a energia incorporada anualizada do modelo 2 resultou em 55 kWh/(m².a).

Efetuando-se o mesmo cálculo sem o isolamento em EPS, o resultado foi de 37 kWh/(m².a), inferior ao do modelo 1 (42 kWh/[m².a]). Tal resultado condiz com a diferença construtiva mais significativa entre as duas UHs, à exceção do isolamento em EPS: o modelo 1 tem laje na cobertura e o modelo 2 não a tem, ocasionando valores de energia incorporada ao cimento e aço (dois dos materiais mais importantes sob esse aspecto) maiores no modelo 1.

3.3.3.3 Energia incorporada aos sistemas de geração FV

Em adição aos materiais empregados nos trabalhos que forneceram os modelos de UH aqui utilizados, esta pesquisa abordou a geração FV na própria edificação, operando conectada à rede elétrica pública (sem baterias), com módulos de silício policristalino em montagem sobre o telhado. Os dados referentes à energia incorporada aos sistemas FV que foram pesquisados para uso nesta dissertação seguiram essas premissas. Entre 2006 e 2016, o gasto energético para produção dos módulos FV foi reduzido em 64% (BRACQUENE *et al.*, 2018, p. 393). Por essa razão, foram considerados somente artigos publicados nos últimos cinco anos. A Tabela 9 reúne os principais parâmetros encontrados, com todos os valores convertidos para a unidade de energia por área dos módulos (MJ/m²). No caso dos inversores, Wu *et al.* (2017) efetuaram a conversão da unidade original (MJ/kW) para a utilizada aqui. As demais referências estão explicadas em notas individuais.

Tabela 9 – Parâmetros de ACVE de sistemas FV.

Componente	Energia incorporada MJ/m ²	Referência
Módulos	4945	Yu e Halog (2015, p. 1220)
	1715	Adaptação ²⁸ de Fu, Liu e Yuan (2015, p. 10)
	2820	Adaptação ²⁹ de Wu <i>et al.</i> (2017, p. 72)
	1895	Adaptação ³⁰ de Luo <i>et al.</i> (2018, p. 160)
Inversores	530	Adaptação ³¹ de Yu e Halog (2015, p. 1220)
	93,14	Wu <i>et al.</i> (2017, p. 72)
	84,3	Adaptação ³² de Luo <i>et al.</i> (2018, p. 160)
Estruturas	530	Adaptação ³³ de Yu e Halog (2015, p. 1220)
	84,3	Adaptação ³⁴ de Luo <i>et al.</i> (2018, p. 160)

Fonte: várias – ver coluna “Referência”.

Os valores obtidos de Yu e Halog (2015) foram muito discrepantes dos demais, por isso foram desprezados no cálculo das médias, que resultaram em:

- a) 2143 MJ/m² para módulos;
- b) 89 MJ/m² para inversores;
- c) 84 MJ/m² para estruturas.

Para atender aos objetivos deste trabalho, os valores de energia incorporada precisaram ser anualizados, o que implica conhecer a expectativa de vida dos componentes. Para os módulos e estruturas de montagem foram considerados 30 anos, e 15 anos para os inversores (FTHENAKIS *et al.*, 2011, p. 2). A energia incorporada anualizada foi calculada levando-se em consideração a reposição dos itens ao fim da vida de cada um, e a soma dos valores sendo dividida pela expectativa de vida das edificações considerada neste trabalho, de 50 anos. Sendo os módulos substituídos ao fim de 30 anos, a energia incorporada a esse item é o dobro do valor individual, ou 4286 MJ/m². Dividido por 50 anos, resultou em 85,72

²⁸ Considerou-se a informação dos autores, de 12,61 MJ/Wp, e os dados do módulo usado no estudo, que são: 200 Wp e dimensões de 1482 mm x 992 mm – ver tabela 1 do artigo.

²⁹ Soma dos itens da tabela 2 do artigo citado, exceto inversor e transporte.

³⁰ Considerou-se a média dos valores dos três cenários, em MJ por módulo, e a área de 1,6 m² de vidro para o módulo com *glass/backsheets* informado na tabela 3 do artigo.

³¹ Considerou-se a informação dos autores, de que 82,3% da energia incorporada ao sistema é devido aos módulos. Os 17,2% restantes foram atribuídos, em partes iguais, aos inversores e estruturas.

³² Considerou-se a informação dos autores, de 269,9 MJ por módulo, e a área de 1,6 m² de vidro para o módulo com *glass/backsheets* informado na tabela 3 do artigo. O valor resultante foi atribuído, em partes iguais, aos inversores e estruturas.

³³ Considerou-se a informação dos autores, de que 82,3% da energia incorporada ao sistema é devido aos módulos. Os 17,2% restantes foram atribuídos, em partes iguais, aos inversores e estruturas.

³⁴ Considerou-se a informação dos autores, de 269,9 MJ por módulo, e a área de 1,6 m² de vidro para o módulo com *glass/backsheets* informado na tabela 3 do artigo. O valor resultante foi atribuído, em partes iguais, aos inversores e estruturas.

MJ/(m².a), ou 23,8 kWh/(m².a). Já os inversores são substituídos no 15º ano, no 30º ano e no 45º ano, imputando um valor de energia incorporada igual a quatro vezes seu valor individual. A estrutura tem a mesma duração dos módulos, sendo substituída, portanto, no 30º ano.

Dessa forma, os valores de energia incorporada anualizada, ainda em relação à área dos módulos FV, resultaram em:

- a) 23,8 kWh/(m².a) para módulos;
- b) 2 kWh/(m².a) para inversores;
- c) 0,9 kWh/(m².a) para estruturas.

Estando todos na mesma base, tornou-se possível somar diretamente os valores e atribuir 26,7 kWh/(m².a) para a energia incorporada unitária ao sistema FV. A área a que a unidade m² se vincula, neste cálculo, corresponde à face frontal dos módulos. Para uniformizar com a energia incorporada aos outros materiais das UHs, esse valor foi convertido para a área de piso, na forma demonstrada em 3.3.5.8.

A inserção do sistema de geração incrementou a energia incorporada aos modelos, nos valores indicados na Tabela 10.

Tabela 10 – Energia incorporada ao sistema de geração própria.

Modelo	Área do painel conforme 3.3.5.8 (a) m ²	EI unitária (b) kWh/(m ² .a)	EI total (c = a . b) kWh/a	Área da UH (d) m ²	EI _{CVE} do sistema FV (e = c / d) kWh/(m ² .a)
1	31,1	26,7	830,4	63	13,18
2	23,3		622,1	49	12,70

Fonte: elaboração própria (2019).

Com o maior sistema FV permitido pelos critérios adotados neste trabalho, o modelo 1 teve sua energia incorporada aumentada em 13,18 kWh/(m².a), e o modelo 2 em 12,70 kWh/(m².a), onde m² representa a área de piso da UH, portanto na mesma base das demais parcelas de energia das simulações e cálculos.

3.3.4 Caracterização dos modelos

As UHs escolhidas foram modeladas no *SketchUp*® com auxílio do *plug-in Euclid*® para gerar os arquivos .idf necessários para o estudo termoenergético no *EnergyPlus*.

Foi adotada a orientação Norte/Sul para as maiores fachadas, e desconsiderada a influência de prédios vizinhos ou outras barreiras e formas de sombreamento.

3.3.5 Configuração dos parâmetros para simulação computacional

Após modelagem, a parametrização no *EnergyPlus* versão 9.1.0 foi feita com os dados relacionados a seguir.

Os dados de ocupação, renda, consumo de energia e posse de equipamentos que os autores referência utilizaram foram desconsiderados para este trabalho. Em relação a Tavares (2006), isso se deve ao tempo decorrido desde então, considerando-se que, no período de elaboração da tese, estava muito recente ainda o racionamento de eletricidade ocorrido em 2001, portanto os hábitos de consumo no país estavam condicionados àquela restrição, hoje não mais presente. Outro motivo é a maior disponibilidade atual de referências normativas, como a ABNT NBR 16401:2008 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008) e o RTQ-R (INSTITUTO..., 2012). A necessidade de dados para os mesmos fins foi, portanto, suprida por normas técnicas e por outras fontes mais recentes, como descrito em 3.3.5. O trabalho de Dalbem (2018) seguiu esse mesmo princípio.

A Figura 12 apresenta uma comparação entre os métodos utilizados para obtenção da estimativa de energia operacional.

Método	Vantagens	Desvantagens
Estatística	Ao utilizar valores de consumo total, abrange os diversos tipos de carga que os compõem.	Desconsidera características físicas da edificação.
		A pesquisa de posse e uso de equipamentos pode não ser estratificada por faixas de consumo, por consequência não tornando possível a identificação do grau de importância dos equipamentos no consumo total.
		As curvas de carga utilizadas podem não representar corretamente diferentes índices de posse de equipamentos, causando distorções ao serem aplicadas como curvas médias.
Simulação	Rápido e preciso para cargas térmicas.	Não cobre todo o espectro de eventos que definem o consumo de uma edificação.
	Assume condições de contorno dinâmicas e contínuas no tempo.	
	Prevê comportamentos futuros da carga.	
	Ferramenta-chave para quantificar desempenho que embasa decisões construtivas.	Impreciso devido ao grande número de variáveis para configuração.
	Serve para analisar o desempenho sob condições especificadas.	

Figura 12 – Quadro comparativo entre os métodos para estimar a energia operacional.

Fonte: adaptação de Hensen e Lamberts (2011, p. 3, 16) e Tavares (2006, p. 76, 79-80).

Tavares (2006) considerou que a precisão da simulação para as cargas de climatização não era uma vantagem decisiva para o uso desse método, e justificou

essa consideração pela pouca expressividade desse tipo de aparelho nas residências brasileiras. Citou pesquisa do IBGE, de 2000, pela qual somente 7,5% dos domicílios contavam com ar condicionado. Porém essa condição se modificou. Segundo a Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento, em 2017 esse número chegou a 13% (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE REFRIGERAÇÃO..., 2017). Há dados mais recentes sobre o número de aparelhos por domicílio: em 2018 havia 43 condicionadores de ar em cada 100 residências brasileiras, e as projeções indicam que esse número será de 96 em 2035. Em relação ao consumo de energia elétrica para climatização residencial, espera-se crescimento médio de 5,4% ao ano no período 2017-2035, apesar da melhoria na eficiência energética dos aparelhos (EMPRESA..., 2018, p. 23-25).

O maior número de vantagens da simulação e desvantagens da estatística, conforme mostrado na Figura 12, justificou a preferência pelo uso daquela neste trabalho. Assim, para cada modelo foi executada a simulação e foram extraídos os valores de consumo anual estimado por tipo de uso – aquecimento, refrigeração e iluminação. A produção de energia elétrica realizada pelos módulos FV foi estimada com uso do programa Radiasol, após comparação com os resultados do *EnergyPlus* e validação com auxílio de um caso real (ver 4.3).

As imagens dos modelos elaborados no *SketchUp* com o *plugin Euclid*, contendo as zonas térmicas necessárias à simulação, estão mostradas na Figura 13.

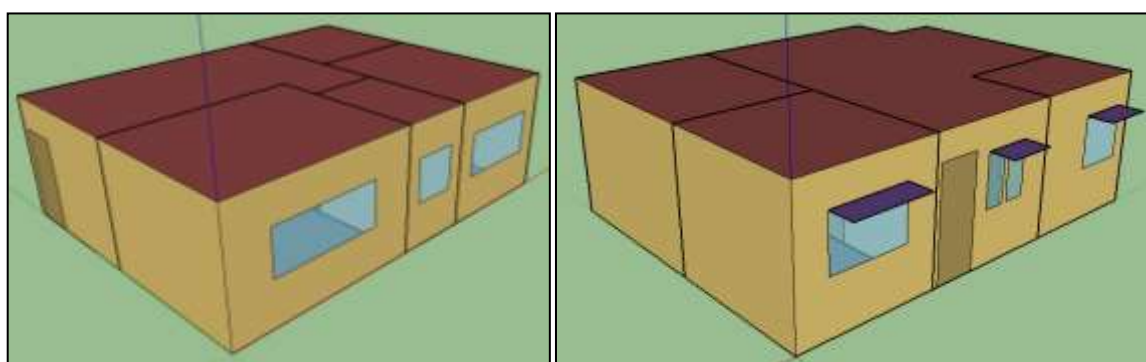


Figura 13 – Desenhos dos modelos 1 (esquerda) e 2 (direita) elaborados no *SketchUp* com *plugin Euclid*.

Fonte: elaboração própria (2019).

O modelo 2 foi desenhado com a frente voltada para Sul, porém na parametrização no *EnergyPlus* a orientação foi ajustada em 180° para que as simulações considerem-na voltada para Norte, de acordo com 3.3.2.2.

3.3.5.1 Parâmetros construtivos

Os parâmetros construtivos inseridos no *EnergyPlus* estão detalhados na Tabela 11, na Tabela 12 e no texto que segue após.

Para viabilizar o ingresso da camada de cerâmica homogênea equivalente ao conjunto heterogêneo do tijolo furado, foram utilizados o método de Ordenes *et al.* (2003) e os parâmetros do Anexo C da NBR 15220-2:2005 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005). Esses cálculos, assim como a obtenção dos valores de transmitância e capacidade térmica das envoltórias opacas, encontram-se demonstrados no Apêndice A.

Tabela 11 - Parâmetros construtivos do modelo 1.

Material		e m	λ W/(m.K)	ρ kg/m ³	c J/(kg.K)	U W/(m ² .K)	C kJ/(m ² K)
Fechamentos opacos							
Paredes	Argamassa reboco	0,025	1,15	2000	1000	2,51	162
	Cerâmica	0,0064	0,9	5229	920		
	Ar	Ver nota ³⁵					
	Cerâmica	0,0064	0,9	5229	920		
	Argamassa reboco	0,025	1,15	2000	1000		
Cobertura (ver nota ³⁶)	Módulos FV	Ver 3.3.5.8				2,36/ 1,72	118
	Telha fibrocimento	0,006	0,65	1700	840		
	Ar	Ver nota ³⁷					
	Argamassa reboco	0,001	1,15	2000	1000		
	Cerâmica	0,00095/ 0,000143	0,9	57551/ 382053	920		
	Concreto	0,001	1,75	2200	1000		
	Ar	Ver nota ³⁸					
	Concreto	0,001	1,75	2200	1000		
	Cerâmica	0,00095/ 0,000143	0,9	57551/ 382053	920		
	Argamassa reboco	0,001	1,15	2000	1000		
Portas externas	Madeira (0,9 m x 2,1 m)	0,03	0,29	800	1340	9,67	32
Portas internas	Madeira (0,7 m x 2,1 m)	0,03	0,29	800	1340		
Fechamentos transparentes							
Janelas	Vidro monolítico 3 mm				Ver Tabela 13		
	Caixilhos de ferro				Ver Tabela 14		
Pisos							
Banheiro e cozinha	Piso cerâmico	0,005	0,9	1600	920	12,49	267
	Argamassa assentamento	0,02	1,15	2000	1000		
	Laje de concreto	0,1	1,75	2200	1000		
Demais cômodos	Tacos de madeira	0,011	0,29	800	1340	10,52	232
	Laje de concreto	0,1	1,75	2200	1000		

Fonte: adaptação da ABNT NBR 15220-2:2005 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005).

³⁵ A camada de ar equivalente aos furos dos tijolos da parede é representada por sua resistência térmica de 0,17 m².K/W (fluxo horizontal, espessura da câmara de ar superior a 5 cm, superfície de alta emissividade, conforme a Tabela B.1 da NBR 15220-2:2005).

³⁶ Os valores separados por uma barra (/) são referentes à condição de inverno / condição de verão.

³⁷ A camada de ar entre o telhado e a pré-laje é representada por sua resistência térmica de 0,14 m².K/W na condição de inverno (fluxo ascendente) e de 0,21 m².K/W na condição de verão (fluxo descendente), espessura da câmara de ar de mais de 5 cm, superfície de alta emissividade, conforme a Tabela B.1 da NBR 15220-2:2005).

³⁸ A camada de ar equivalente aos furos dos tijolos da pré-laje é representada por sua resistência térmica de 0,13 m².K/W na condição de inverno (fluxo ascendente) e de 0,15 m².K/W na condição de verão (fluxo descendente), espessura da câmara de ar de até 2 cm, superfície de alta emissividade, conforme a Tabela B.1 da NBR 15220-2:2005).

Tabela 12 - Parâmetros construtivos do modelo 2.

Tabela 12 – Parâmetros construtivos do modelo 2.							
Material		e m	λ W/(m.K)	ρ kg/m ³	c J/(kg.K)	U W/(m ² .K)	C kJ/(m ² .K)
Fechamentos opacos							
Paredes externas	Argamassa reboco	0,02	1,15	2000	1000	0,29	150
	EPS	0,12	0,04	35	1420		
	Cerâmica	0,037	0,9	941	920		
	Ar	Ver nota ³⁹					
	Cerâmica	0,037	0,9	941	920		
	Argamassa reboco	0,02	1,15	2000	1000		
Paredes internas	Argamassa reboco	0,02	1,15	2000	1000	3,15	258
	Cerâmica	0,101	0,9	1916	920		
	Argamassa reboco	0,02	1,15	2000	1000		
Cobertura (ver nota ⁴⁰)	Módulos FV				Ver 3.3.5.8	0,3/ 0,29	23
	Telha fibrocimento	0,008	0,65	1700	840		
	Ar	Ver nota ⁴¹					
	EPS	0,12	0,04	35	1420		
	Forro de madeira	0,005	0,29	800	1340		
Portas externas	Madeira (0,8 m x 2,1 m)	0,03	0,29	800	1340	9,67	32
Portas internas	Madeira (0,7 m x 2,1 m)	0,03	0,29	800	1340		
Fechamentos transparentes							
Janelas	Vidro insulado				Ver Tabela 13		
	Caixilhos de PVC				Ver Tabela 14		
Pisos							
Todos os cômodos	Piso cerâmico	0,005	0,9	1600	920	3,03	268
	Argamassa assentamento	0,02	1,15	2000	1000		
	EPS	0,01	0,04	35	1420		
	Laje de concreto	0,1	1,75	2200	1000		

Fonte: adaptação da ABNT NBR 15220-2:2005 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005).

Para a absorvência das superfícies externas das paredes e caixilhos das janelas foram adotados, respectivamente, o valor de 0,2, correspondente a uma pintura na cor branca, e o valor de 0,3, correspondente a uma pintura na cor amarela (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005, p. 12). Para a cobertura de fibrocimento, a absorvência foi configurada em 0,593, correspondente a telha nova (SILVEIRA; MARINOSKI; LAMBERTS, 2012, p. 1169). O valor médio da absorvência de células FV é de 0,58 (ANDRADE, 2008, p. 44), porém como esse valor é muito próximo do utilizado para as telhas, por simplicidade foi mantida a mesma absorvência de 0,593 para a cobertura, com ou sem módulos FV. A

³⁹ A camada de ar equivalente aos furos dos tijolos da parede é representada por sua resistência térmica de 0,17 m².K/W (fluxo horizontal, espessura da câmara de ar superior a 5 cm, superfície de alta emissividade, conforme a Tabela B.1 da NBR 15220-2:2005).

⁴⁰ Os valores separados por uma barra (/) são referentes à condição de inverno / condição de verão.

⁴¹ A camada de ar entre o telhado e o forro é representada por sua resistência térmica de 0,14 m².K/W na condição de inverno (fluxo ascendente) e de 0,21 m².K/W na condição de verão (fluxo descendente), espessura da câmara de ar de mais de 5 cm, superfície de alta emissividade, conforme a Tabela B.1 da NBR 15220-2:2005).

emissividade foi considerada no valor de 0,9 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005, p. 12). As janelas foram configuradas com dados obtidos do banco internacional de dados óticos de produtos para envidraçamento (IGDB, na sigla em língua inglesa), acessada pelo autor através do programa *WINDOW* (BERKELEY LAB, 2019a). Os vidros do modelo 2 foram descritos no trabalho referência como “...do tipo insulado de 24 mm (CEBRACE), que possuem fator solar de 0,45 e transmitância térmica de 1,98 W/(m²K)...” (DALBEM, 2018, p. 52). O conjunto disponível no programa *WINDOW* com dados mais próximos desses é *double high solar gain low-e*, que possui espessura total de 25,933 mm e transmitância térmica de 1,935 W/(m².K). Ele é formado por uma camada de vidro CLEAR5 (ID 9803), uma camada de ar de 16,5 mm e uma camada de vidro LOW-E_5 (ID 9923). Devido à amplitude da variação de temperaturas, característica da ZB2, a ordem dos vidros pode interferir no desempenho de forma diferente para os períodos de aquecimento e refrigeração. Por essa razão, as duas opções foram testadas: CLEAR5 externo e LOW-E_5 interno, e vice-versa. Em 4.4 foi feita a discussão e escolha da melhor alternativa para os objetivos deste trabalho. A Tabela 13 apresenta os dados dos vidros utilizados nos dois modelos.

Os dados dos caixilhos foram obtidos através do programa *THERM* (BERKELEY LAB, 2019b). A Tabela 14 apresenta os dados dos caixilhos utilizados nos dois modelos.

Tabela 13 – Parâmetros óticos dos vidros ID 102 (monolítico 3 mm), ID 9803 (monolítico 5 mm) e ID 9923 (*Low-E* 5 mm) utilizados nas janelas dos modelos adotados.

Parâmetro	ID 102	ID 9803	ID 9923
e (m)	0,003048	0,0047	0,0047
T _{sol}	0,834	0,796	0,676
R _{sol1}	0,075	0,074	0,117
R _{sol2}	0,075	0,074	0,105
T _{vis}	0,899	0,888	0,826
R _{vis1}	0,083	0,082	0,115
R _{vis2}	0,083	0,082	0,109
T _{ir}	0	0	0
E _{mis1}	0,84	0,84	0,158
E _{mis2}	0,84	0,84	0,84
λ (W/m.K)	1	1	1

Fonte: base de dados do programa *WINDOW* (BERKELEY LAB, 2019a).

Tabela 14 – Parâmetros dos caixilhos utilizados nas janelas dos modelos adotados.

Parâmetro	Modelo 1 (ferro)	Modelo 2 (PVC)
Largura (m)	0,02	0,02
Condutância (W/m ² .K)	5,367	0,0876
Absortância	0,3	0,3
Emissividade	0,2	0,9

Fonte: adaptação da base de dados do programa *THERM* (BERKELEY LAB, 2019b) e da ABNT NBR 15220-2:2005 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005).

3.3.5.2 Ocupação dos ambientes internos

A agenda de ocupação adotada foi a indicada pelo RTQ-R (INSTITUTO..., 2012, p. 68-69) para avaliação da envoltória da UH por simulação computacional. Ela foi reproduzida na Tabela 15. Os cabeçalhos originais – “dia de semana” e “final de semana” (*sic*) – foram substituídos para adequação aos parâmetros utilizados na simulação. Os percentuais foram aplicados ao número de pessoas que usam os ambientes, sendo duas por dormitório e quatro nos demais ambientes de permanência prolongada. No modelo 1, essas quatro pessoas foram distribuídas entre a sala e a cozinha, duas em cada zona. No modelo 2, as quatro estão na zona conjugada estar/cozinha.

Tabela 15 – Agenda de ocupação para zonas de permanência prolongada.

Horário	Dormitórios		Sala	
	Dias úteis	Sábados, domingos e feriados	Dias úteis	Sábados, domingos e feriados
0h – 7h	100%	100%	-	-
8h – 9h	-	100%	-	-
10h	-	50%	-	-
11h	-	-	-	25%
12h	-	-	-	75%
13h	-	-	-	-
14h	-	-	25%	75%
15h – 17h	-	-	25%	50%
18h	-	-	25%	25%
19h	-	-	100%	25%
20h	-	-	50%	50%
21h	50%	50%	50%	50%
22h – 23h	100%	100%	-	-

Fonte: adaptação de Instituto... (2012, p. 69).

A carga térmica originada por essa ocupação foi configurada com 108 W por pessoa nas salas e 81 W por pessoa nos dormitórios (INSTITUTO..., 2012, p. 70).

3.3.5.3 Sistema de iluminação

A densidade de potência de iluminação foi configurada em 5 W/m² para os dormitórios e 6 W/m² para a sala, conforme o RTQ-R (INSTITUTO..., 2012, p. 71). A agenda de uso da iluminação segue o mesmo regulamento e é reproduzida na Tabela 16. Valem as mesmas observações feitas em 3.3.5.2 quanto aos cabeçalhos.

Tabela 16 – Agenda de uso da iluminação para zonas de permanência prolongada.

Horário	Dormitórios		Sala	
	Dias úteis	Sábados, domingos e feriados	Dias úteis	Sábados, domingos e feriados
0h – 6h	-	-	-	-
7h	100%	-	-	-
8h	-	-	-	-
9h	-	100%	-	-
10h	-	-	-	-
11h – 12h	-	-	-	100%
13h – 16h	-	-	-	-
17h – 20h	-	-	100%	100%
21h	100%	100%	100%	100%
22h	100%	100%	-	-
23h	-	-	-	-

Fonte: adaptação de Instituto... (2012, p. 71).

3.3.5.4 Carga de equipamentos

A densidade de carga de equipamentos, somente para a sala, foi configurada em 1,5 W/m², com dissipação ininterrupta (24h/dia), conforme o RTQ-R (INSTITUTO..., 2012, p. 72).

3.3.5.5 Sistema de climatização

A climatização dos ambientes foi arbitrada como híbrida, ou seja, feita através da ventilação natural e complementada por condicionamento artificial. Os dois modelos de UH cumpriam os requisitos de área mínima de aberturas (8% da área útil de piso por ambiente na ZB2) e de ventilação cruzada para obtenção de nível A na avaliação da envoltória pelo RTQ-R (INSTITUTO..., 2012, p. 26-28), se essa

avaliação para etiquetagem fosse feita. Não está no escopo deste trabalho, mas tal constatação importa como evidência de que a ventilação natural tem potencial para contribuir com o conforto térmico nos modelos sob análise.

A ventilação natural foi configurada para que as janelas sejam abertas quando a temperatura operativa de cada zona é igual ou superior a 25°C e a diferença para a temperatura externa é de até 5°C (FREITAS *et al.*, 2018). O fator de abertura, que modula o quanto as janelas são abertas (área de abertura), decresce linearmente de 1 a 0,1 com essa diferença. Por exemplo, se a temperatura interna estiver em 28°C e a externa em um valor minimamente inferior a este, as janelas são totalmente abertas. Se, com o mesmo valor de temperatura interna, a externa estiver em 23°C, as janelas abrem o equivalente a 10% de suas respectivas áreas. Entre esses limites, o percentual de abertura varia linearmente.

As portas externas estiveram sempre fechadas e as internas sempre abertas (MONTES, 2016). A agenda de disponibilidade da ventilação natural foi a mesma de ocupação de cada zona (AMERICAN..., 2016), exceto para o banheiro, que não teve agenda de ocupação. Neste caso, a ventilação natural esteve sempre disponível.

Os parâmetros de infiltração são médios e variam conforme o modelo, devido às características de vedação adotadas para esta pesquisa (modelo 1 ineficiente, sem vedação e modelo 2 eficiente, com vedação). As portas são de uma folha pivotante e as janelas são de duas folhas, com eixo vertical lateral. A Tabela 17 apresenta os principais parâmetros de ventilação natural utilizados.

Tabela 17 – Parâmetros para configuração da ventilação natural.

Parâmetros	Modelo 1	Modelo 2
Tipo de controle para abertura de janela	Temperatura	
Setpoint para abertura de janela	25°C	
Diferença de temperatura ext/int máxima para abertura de janela	5°C	
Tipo de controle para o fluxo de ar	Multizona sem distribuição	
Limite para abertura (área) de janela	100%	
Coeficiente da equação de ventilação pelas frestas quando a janela está fechada	0,00035 kg/(s.m)	0,00004 kg/(s.m) ⁴²
Coeficiente da equação de ventilação pelas frestas quando a porta externa está fechada	0,00171 kg/(s.m)	0,00124 kg/(s.m)
Coeficiente da equação de ventilação pelas frestas quando a porta interna está fechada	0,0024 kg/(s.m)	0,00187 kg/(s.m)
Expoente da equação de ventilação pelas frestas quando a esquadria está fechada	0,66	0,75
Coeficiente de descarga para janela aberta	0,78	

Fonte: adaptação de Cruz e Viegas (2016, p. 470), Pereira *et al.* (2013, p. 24-27) e Freitas *et al.* (2018, p. 380).

Para o condicionamento artificial dos ambientes foi adotado um sistema de expansão direta configurado através do objeto *HVACTemplate:Zone:UnitarySystem* do *EnergyPlus*. A configuração foi com velocidade única (*SingleSpeedDX*) para refrigeração e aquecimento, para simular o funcionamento de condicionadores de ar tipo *split* comum, já que os aparelhos mais novos (*split inverter*), que têm controle contínuo de velocidade, ainda não possuem modelo no *EnergyPlus*.

A agenda de disponibilidade do sistema coincidiu com a de ocupação de cada zona, com *setpoint* de temperatura de 21,5°C para aquecimento e 25,5°C para refrigeração, respectivamente 0,5°C acima e abaixo dos limites de conforto térmico estabelecidos pela ABNT NBR 16401-2:2008 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 3). Esse valor de 0,5°C foi utilizado como margem de tolerância para obtenção dos indicadores de conforto térmico, ou seja, os condicionadores de ar foram ligados entre 21,5°C e 25,5°C, mas os ambientes foram considerados em conforto entre 21°C e 26°C. A taxa de fluxo de ar por pessoa foi de 0,00944 m³/s, modo de operação do ventilador contínuo, eficiência do ventilador de 0,7 e do motor de 0,9 (INSTITUTO..., 2012, p. 74). O COP do sistema, tanto para refrigeração como para aquecimento, foi considerado no valor de 3,24, sendo este o patamar mínimo estabelecido pela Portaria INMETRO/MDIC nº 410 para obtenção da ENCE nível A (INSTITUTO..., 2013b).

⁴² Valor referente a janela de madeira, por ausência de dados para PVC na fonte.

3.3.5.6 Temperatura do solo

As configurações da temperatura do solo foram feitas utilizando a ferramenta *Slab* vinculada ao *EnergyPlus*. O primeiro passo foi realizar uma simulação inicial para verificar as temperaturas operativas médias mensais do ar interno na edificação, considerando o solo em uma condição adiabática. Com esses valores e os parâmetros sugeridos por Costa e Chvatal (2017), o pré-processador *Slab* foi executado e, através dele, foram determinadas as temperaturas médias do solo para cada mês, exibidas na Tabela 18. O processo foi feito individualmente para cada modelo.

Tabela 18 – Temperaturas do solo.

Modelo	Temperatura °C											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1	25	25	24	22	20	18	18	18	19	22	23	24
2	26	25	25	24	23	22	22	22	23	24	24	25

Fonte: elaboração própria (2019).

3.3.5.7 Arquivos climáticos

Para realizar as simulações, foi utilizado o arquivo climático (LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES, 2018) da cidade escolhida. As condições climáticas médias e informações geográficas principais estão relacionadas na Tabela 19 e a Figura 14 mostra as temperaturas médias nas estações extremas.

Tabela 19 – Condições climáticas e informações geográficas de Pelotas.

Zona bioclimática brasileira	ZB2
Classificação climática <i>Köppen</i>	Cfa (úmido subtropical)
Coordenadas	-31,718°; -52,328°
Altitude	18 m
Temperatura de bulbo seco	18,1°C
Umidade relativa	Média anual 81%
Radiação global	4602 Wh/(m ² .dia)

Fonte: adaptação do arquivo climático INMET (LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES, 2018).

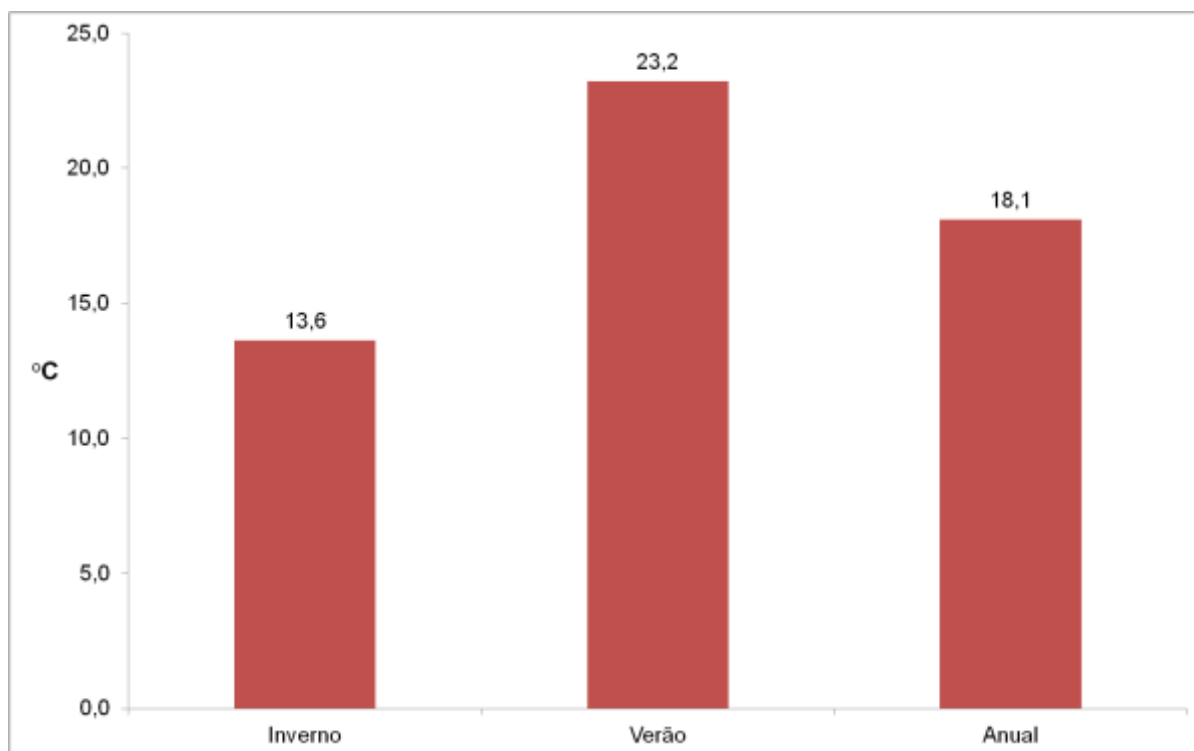


Figura 14 – Gráfico de temperaturas médias externas.

Fonte: adaptação do arquivo climático INMET (LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES, 2018).

A Figura 15 mostra a localização geográfica do município escolhido no mapa bioclimático brasileiro.

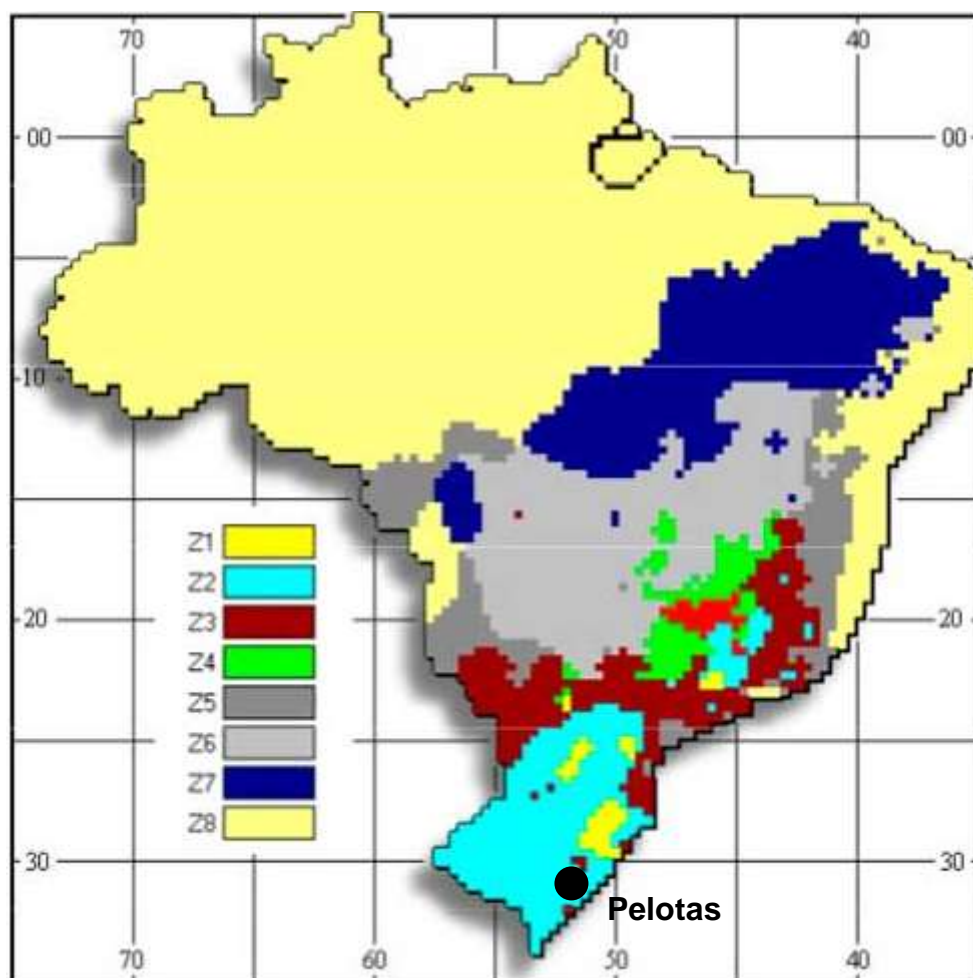


Figura 15 – Localização de Pelotas no mapa bioclimático brasileiro.
Fonte: adaptação de Harada (2019).

3.3.5.8 Sistema fotovoltaico

O sistema FV adotado nesta pesquisa teve porte variável de acordo com a necessidade de cada UH para atingir as metas NZEB. Essa variabilidade foi tratada através do número de módulos sobre a cobertura, com faces voltadas ao Norte e inclinação aproximadamente igual à latitude do local, sem sombreamento nos módulos.

O limite máximo de ocupação da cobertura por módulos FV foi estabelecido através da relação entre áreas dos módulos e da face da cobertura utilizada. Como o trabalho que originou o modelo 1 não especifica o desenho da cobertura, foi considerada sua divisão em duas águas, uma orientada para Norte e a outra para Sul. Somente a face Norte foi utilizada para os módulos FV. A inclinação foi arbitrada para coincidir com a latitude da região de instalação. A área líquida disponível teve, além do desprezo dos avanços beirais, uma redução de 10% para levar em conta a provável impossibilidade de ocupar toda a face, devido a sobras fracionárias de

espaço nos extremos dos arranjos FV. O modelo 2 tem a forma geral da cobertura definida, porém não há especificação de declividade e as faces são voltadas para Leste e Oeste. Para uniformização, essa cobertura foi modificada para ficar com a mesma orientação e ângulo de elevação utilizados no modelo 1, mantendo a área de planta original. Dessa forma, os limites máximos por modelo estão indicados na Tabela 20.

Tabela 20 – Limites máximos de área de cobertura a ocupar com os módulos FV, por modelo.

Modelo	Área de planta (a) m ²	Área da projeção da face ocupada (b = a / 2) m ²	Ângulo de elevação ⁴³ (c)	Área da face de telhado (d = b / cos [c]) m ²	Limite a ocupar (e = 90%.d) m ²
1	63	31,5	32°	37,1	33,4
2	49	24,5		28,9	26,0

Fonte: elaboração própria (2019).

Sabendo-se a área máxima possível a ocupar em cada modelo, a inserção dos módulos FV no *EnergyPlus* foi realizada através de uma superfície inclinada de sombreamento sobre a cobertura, em etapas de ocupação crescente até atingir esses limites.

O modelo utilizado é CS3U-355P (CANADIAN SOLAR, 2019), composto por 72 células de silício policristalino. Possui as características apresentadas na Tabela 21, nas *Standard Test Conditions* (STC). Os coeficientes de temperatura tiveram seus valores convertidos da unidade do *datasheet* (%.°C⁻¹) para as unidades utilizadas no *EnergyPlus* (A/K e V/K).

Tabela 21 – Dimensões e parâmetros elétricos do módulo FV.

Parâmetros	Valores
Largura	0,992 m
Comprimento	1,96 m
Área	1,944 m ²
Potência nominal	355 Wp
Número de células em série	72
Corrente de curto-circuito (I _{sc})	9,84 A
Tensão de circuito aberto (V _{oc})	46,4 V
Corrente no ponto de máxima potência	9,3 A
Tensão no ponto de máxima potência	38,2 V
Eficiência de conversão	18,26%
Coeficiente de temperatura para I _{sc}	0,005 A/K
Coeficiente de temperatura para V _{oc}	-0,13 V/K
Temperatura nominal operativa	43°C

Fonte: adaptação de Canadian Solar (2019).

⁴³ Latitude aproximada de Pelotas.

A Tabela 22 mostra o número máximo de módulos FV a instalar na cobertura de cada modelo, de acordo com os limites de área já definidos.

Tabela 22 – Número máximo de módulos FV e área do painel por modelo.

Modelo	Limite a ocupar conforme Tabela 20 (e) m ²	Área do módulo conforme Tabela 21 (f) m ²	Número máximo de módulos (g = e / f)	Área máxima de painel (h = f . g) m ²
1	33,4	1,944	17	33,1
2	26,0		13	25,3

Fonte: elaboração própria (2019).

Para o modelo 1, apesar do limite por área permitir até 17 módulos, as dimensões lineares do telhado e dos módulos limitaram em duas linhas de oito módulos com a menor dimensão na direção horizontal e a maior na direção inclinada. Assim, o modelo 1 foi simulado com 16 módulos FV de 355 Wp, totalizando 5,68 kWp e área de painel de 31,1 m². Pelo mesmo motivo, apesar do limite por área permitir até 13 módulos para o modelo 2, o arranjo mais favorável ocorre com a maior dimensão dos módulos na direção horizontal e a menor na direção inclinada, fazendo três linhas de quatro módulos cada. Assim, o modelo 2 foi simulado com 12 módulos FV de 355 Wp, totalizando 4,26 kWp e área de painel de 23,3 m².

Para completar a parte ativa do sistema gerador FV, cada UH recebeu um inversor com capacidade suficiente para seu respectivo conjunto de módulos, de forma a não limitar a potência máxima que eles podem fornecer. O modelo de inversor utilizado para simulação no *EnergyPlus* foi *Simple*, com valor de eficiência adotado em 97%, típico de inversores de fabricação recente (ZEB *et al.*, 2018). O inversor do modelo 1 foi localizado na cozinha e o do modelo 2 na sala de estar/cozinha. Essas zonas receberam o calor dissipado pelo equipamento. Mesmo com a aplicação do método de cálculo através do Radiasol, a simulação do sistema FV permaneceu sendo realizada para considerar os efeitos do sombreamento da cobertura pelos módulos FV e do aquecimento da zona térmica pelo inversor.

3.3.6 Simulação e análise energética

A energia consumida durante o período de uso das UHs foi estimada a partir de simulações computacionais realizadas no *EnergyPlus*. Com relação à geração no local, para o modelo 1 foi utilizado o método EODM para simulação da produção de energia por módulos FV e o método *Simple* para o desempenho dos inversores.

Também foi estimada a geração através do programa Radiasol, para comparação com os resultados do *EnergyPlus*. Como houve muita diferença entre as estimativas, um caso real de geração FV foi selecionado e seus registros de produção foram comparados com os resultados do cálculo a partir do Radiasol e da simulação no *EnergyPlus*, e dessa forma justificou-se a opção pelo cálculo.

3.3.7 Análise de resultados

Para análise e discussão dos resultados, os arquivos .idf utilizados nas simulações foram configurados com dados de saída em kWh/(m².a) e o fator de conversão *site-to-source* adotado foi de 1,6, conforme relatório do CB3E Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações (RUPP; LAMBERTS, 2017, p. 2).

Somadas as parcelas de energia ao longo do ciclo de vida de cada modelo, os resultados foram analisados para comparação com objetivos NZEB. A análise é predominantemente quantitativa a partir dos resultados numéricos das simulações. Esses resultados sustentam avaliações de desempenho e a tomada de decisão sobre eventuais ajustes na busca das metas.

A partir daí, foi feita análise da relação causa-efeito entre as variáveis estudadas – produção de energia a partir da geração própria e consumo energético no ciclo de vida, a fim de produzir uma definição sobre a melhor relação entre a eficiência energética e a geração no local.

4 Resultados

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados obtidos por meio da aplicação do método proposto nos objetos de estudo.

Os valores de energia incorporada foram adquiridos da revisão de literatura e atribuídos aos modelos estudados. O consumo operacional e a energia gerada são resultados das simulações no *EnergyPlus* versão 9.1.0. A energia gerada também foi calculada através do Radasol, para comparação e escolha do método a utilizar na análise.

Os resultados são apresentados e discutidos na seguinte ordem: cálculo da energia gerada pelo Radasol, simulação de cada modelo conforme descrito originalmente e com inserção de geração própria, comparação entre os métodos para estimativa da produção de energia e escolha de um deles para a sequência do experimento; incremento da capacidade de geração até atingir a ocupação máxima determinada para a cobertura de cada modelo.

Por fim, são analisadas as relações entre os diferentes desempenhos dos modelos em termos de eficiência energética, a geração e os resultados em consumo de energia, operacional e incorporada.

4.1 Cálculo da energia gerada

No Radasol, a irradiação solar média diária obtida para as condições estabelecidas neste trabalho está representada na Tabela 23, em intervalos de uma hora. Além disso, os valores totais diários para as médias mensais são informados. As incidências direta e difusa estão consideradas nestes valores.

Tabela 23 – Irradiação solar média diária incidente sobre plano inclinado a 32°, sem desvio azimutal em relação ao Norte, localizado em Pelotas.

Hora	Radiação solar média diária (Wh/[m ² .dia])												Média
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	
05:30	35	3	0	0	0	0	0	0	0	0	23	40	8
06:30	138	111	59	11	0	0	0	0	30	71	125	136	57
07:30	271	260	186	116	66	54	66	81	131	177	258	255	160
08:30	418	432	341	250	178	177	197	191	254	297	407	384	294
09:30	546	587	490	391	304	319	348	309	377	411	538	498	427
10:30	635	695	599	502	411	442	476	407	471	493	629	577	528
11:30	682	750	652	560	470	511	547	459	519	534	676	618	582
12:30	682	750	652	560	470	511	547	459	519	534	676	618	582
13:30	635	695	599	502	411	442	476	407	471	493	629	577	528
14:30	546	587	490	391	304	319	348	309	377	411	538	498	427
15:30	418	432	341	250	178	177	197	191	254	297	407	384	294
16:30	271	260	186	116	66	54	66	81	131	177	258	255	160
17:30	138	111	59	11	0	0	0	0	30	71	125	136	57
18:30	35	3	0	0	0	0	0	0	0	0	23	40	8
TOTAL	5450	5676	4654	3660	2858	3006	3268	2894	3564	3966	5312	5016	4110

Fonte: Radiasol (LABSOL UFRGS, 2019).

Distribuindo as médias ao longo de cada mês, considerando o número de dias de cada um deles (sendo 28,25 para fevereiro, como média de um período de quatro anos consecutivos), obtêm-se os valores acumulados de radiação incidente conforme mostra a Tabela 24, convertidos para kWh/m².

Tabela 24 – Radiação solar média mensal e acumulada anual, incidente sobre plano inclinado a 32°, sem desvio azimutal em relação ao Norte, localizado em Pelotas.

Hora	Radiação solar média mensal e acumulada anual (kWh/m ²)												
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Ano
05:30	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	3
06:30	4	3	2	0	0	0	0	0	1	2	4	4	21
07:30	8	7	6	3	2	2	2	3	4	5	8	8	58
08:30	13	12	11	8	6	5	6	6	8	9	12	12	107
09:30	17	17	15	12	9	10	11	10	11	13	16	15	155
10:30	20	20	19	15	13	13	15	13	14	15	19	18	192
11:30	21	21	20	17	15	15	17	14	16	17	20	19	212
12:30	21	21	20	17	15	15	17	14	16	17	20	19	212
13:30	20	20	19	15	13	13	15	13	14	15	19	18	192
14:30	17	17	15	12	9	10	11	10	11	13	16	15	155
15:30	13	12	11	8	6	5	6	6	8	9	12	12	107
16:30	8	7	6	3	2	2	2	3	4	5	8	8	58
17:30	4	3	2	0	0	0	0	0	1	2	4	4	21
18:30	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	3
TOTAL	169	160	144	110	89	90	101	90	107	123	159	155	1498

Fonte: Radiasol (LABSOL UFRGS, 2019).

Para esta configuração, portanto, a radiação solar incidente totaliza 1498 kWh/(m².a). Com eficiência máxima de 18,26% nas STC (ver Tabela 21), esse valor

é convertido em 273,5348 kWh/(m².a) de energia elétrica nos terminais dos módulos FV, sem considerar a variação de eficiência com a temperatura. Considerando-se uma taxa de desempenho global do sistema FV no valor de 80% (PINHO; GALDINO, 2014, p. 329), a energia elétrica útil gerada (EG unitária) por esse sistema é estimada em 218,8 kWh/(m².a), sendo a unidade m² referente à área dos painéis.

A Tabela 25 mostra o cálculo da energia anual gerada por unidade de área de piso de cada modelo.

Tabela 25 – Produção de energia elétrica em valores secundários por modelo, estimada com uso do Radiasol.

Modelo	Área do painel conforme 3.3.5.8 (a) m ²	EG unitária (b) kWh/(m ² .a)	EG total (c = a . b) kWh/a	Área da UH (d) m ²	EG do sistema FV (e = c / d) kWh/(m ² .a)
1	31,1	218,8	6.804,7	63	108
2	23,3		5.098,0	49	104

Fonte: elaboração própria (2019).

EG total, neste caso, é a energia gerada em cada painel, na configuração com ocupação máxima da área disponível, conforme 3.3.5.8. Quando tais valores são divididos pela área de piso de cada UH, o resultado é o valor unitário de energia (secundária) gerada, por ano e por área da UH.

Para todos os fins deste trabalho, a energia deve ser convertida para valores primários, com fator de conversão *site-to-source* de 1,6 (ver 3.3.7). Portanto, através desse método, a máxima estimativa de energia gerada é de 173 kWh/(m².a) para o modelo 1 e de 166 kWh/(m².a) para o modelo 2, sendo m² a área de piso da UH, e dessa forma os valores estão na mesma base das demais grandezas a serem analisadas nesta seção de resultados. Esses valores são referentes ao número máximo de módulos estabelecido para cada UH.

4.2 Simulação do modelo 1 original

O modelo 1, conforme apresentado em 3.3.2.1 e com as configurações descritas em 3.3.5, com exceção de 3.3.5.8 (Sistema fotovoltaico), resultou nos valores de consumo de energia mostrados na Tabela 26. Como no caso dos fechamentos horizontais faz-se necessário escolher os parâmetros térmicos para simulação entre as opções de fluxo ascendente e descendente, as duas foram simuladas separadamente, a fim de verificar-se qual condição é majoritária ao longo do ano. Foram adotados os resultados da configuração para inverno (fluxo de calor

ascendente), pois o consumo para aquecimento predominou⁴⁴. As parcelas de energia incorporada têm os mesmos valores obtidos por Tavares (2006), porém convertidos de GJ para kWh. Para fins de comparação com os resultados obtidos por Tavares (2006), a energia operacional está com seu valor secundário (contabilizada no local de consumo – *site*).

Tabela 26 – Consumo energético do modelo 1 original, com a energia operacional (EO) em valor secundário.

Fase	Tipo de energia	Consumo	
		kWh/(m ² .a)	%
Pré-uso	El _{inicial}	25,7	33
Uso	El _{recorrente}	13,6	17
	EO	37,3	47
Pós-uso	El _{desconstrução}	2,7	3
Total		79,3	100

Fonte: elaboração própria (2019).

Para esse modelo, as parcelas somadas de energia incorporada na construção (El_{inicial}), manutenção (El_{recorrente}) e desconstrução (El_{desconstrução}) da UH representam 53% do consumo de todo o seu ciclo de vida. Comparando-se com os trabalhos citados em 2.4, pode-se afirmar que este parâmetro é superior às faixas referentes aos edifícios convencionais estudados naqueles casos, que apresentaram em torno de 40% de contribuição da energia incorporada em relação à total, em sua maioria. Considerando que a maior parte das pesquisas ocorreu em países de clima muito frio, é esperado que a parcela de energia operacional em edificações convencionais naqueles países seja maior do que em uma edificação convencional brasileira, e portanto a contribuição da energia operacional seja maior na Europa e a energia incorporada seja maior no Brasil.

Já em comparação à pesquisa de Tavares (2006), em que a parcela de contribuição da energia incorporada foi de até 68%, esta dissertação encontrou resultados menores. O fato de este trabalho usar seus parâmetros de ACVE permite comparar esses resultados, mostrando que a diferença entre os métodos de obtenção de energia operacional foi determinante para essa divergência. Ao adotar parâmetros de normas atuais e simular o desempenho energético da edificação, a estimativa de consumo resultou superior em relação ao método estatístico que

⁴⁴ Na condição de fluxo ascendente, o consumo para aquecimento resultou em 24,6 kWh/(m².a), enquanto o consumo para refrigeração foi de 10,3 kWh/(m².a). Na condição de fluxo descendente, o consumo para aquecimento resultou em 23,4 kWh/(m².a), enquanto o consumo para refrigeração foi de 8,8 kWh/(m².a). Em ambas opções, o consumo para aquecimento é amplamente superior.

Tavares (2006) utilizou. Aliado a isso, há o tempo decorrido entre as pesquisas, fator de assimetria mesmo se os métodos fossem iguais. Especificamente sobre o modelo 1, a estimativa original foi de 20,5 kWh/(m².a) para o que foi chamado de Energia Operacional (Eletricidade)⁴⁵, portanto pouco superior à metade do valor obtido nesta pesquisa.

A Tabela 27 reproduz a anterior, porém com o consumo operacional dado em energia primária (contabilizada na fonte energética – *source*). Deste ponto em diante, todos os valores analisados serão primários, quando não informado. Os valores de energia incorporada permanecem iguais, de acordo com o trabalho que os originou (ver 1.6).

Tabela 27 – Consumo energético do modelo 1 original, com a energia operacional (EO) em valor primário.

Tipo de energia	Consumo	
	kWh/(m ² .a)	%
El _{CVE}	42,0	41
EO	59,7	59
E _{CVE}	101,7	100

Fonte: elaboração própria (2019).

O total de energia operacional é composto por tipos de uso final conforme relacionado na Tabela 28.

Tabela 28 – Energia operacional do modelo 1 por uso final.

Tipo de uso	Consumo	
	kWh/(m ² .a)	%
Aquecimento	24,6	41
Refrigeração	10,3	17
Iluminação	13,5	23
Eletrodomésticos	7,5	13
Ventilação mecânica	3,8	6
Total	59,7	100

Fonte: elaboração própria (2019).

A Figura 16 ilustra os mesmos dados, mostrando a predominância da carga para aquecimento.

⁴⁵ O valor original é de 3,69 GJ/m² para todo o ciclo de vida (TAVARES, 2006, p. 139). Dividido por 50 anos, fica em 0,0738 GJ/(m².a). Com a conversão de unidades, resulta nos 20,5 kWh/(m².a) informados.

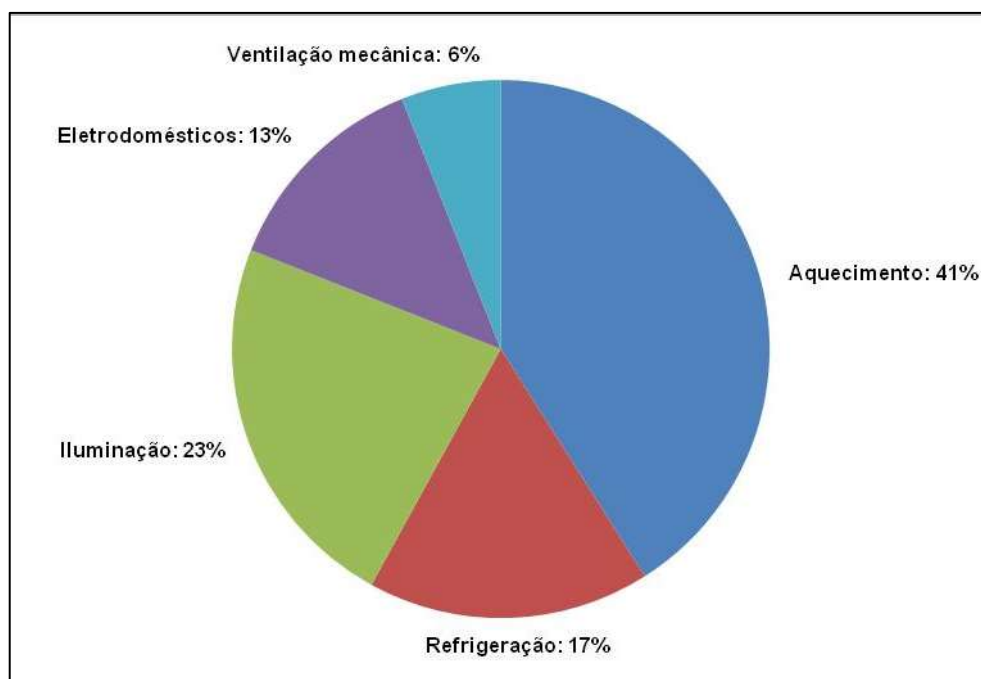


Figura 16 – Gráfico dos consumos de energia operacional do modelo 1 por uso final.
Fonte: elaboração própria (2019).

Como o método estatístico empregado por Tavares (2006) – com base na classificação da UH segundo critérios socioeconômicos – visou estimar o consumo total do modelo, não há como comparar os tipos de uso final para verificação de quais são os que mais influenciaram no aumento do consumo estimado. Mas é possível, de forma qualitativa, inferir que as cargas de iluminação tenham decrescido pela melhoria da eficiência atrelada à tecnologia das lâmpadas e que o consumo para condicionamento do ar tenha aumentado muito, pela maior intensidade de uso desse tipo de carga no presente, fato reconhecido pelo RTQ-R através da agenda de disponibilidade prevista nele.

Os resultados obtidos para o modelo 1 mostram que a faixa de temperaturas estabelecida em 3.3.5.5 é descumprida em 1,6% do tempo de ocupação dos ambientes. A Tabela 29 resume os dados.

Tabela 29 – Tempo em desconforto térmico.

	Tempo	
	h/ano	%
Número de horas fora da faixa com aquecimento	183,92	1,5
Número de horas fora da faixa com refrigeração	3,42	0,1
Total de horas fora da faixa	187,34	1,6
Total de horas com sistema em funcionamento ⁴⁶	11888,76	100

Fonte: elaboração própria (2019).

4.3 Inserção da geração própria no modelo 1

Mesmo se tratando de um modelo considerado ineficiente em relação ao uso da energia, o passo seguinte na estratégia de pesquisa é dotá-lo de geração FV, a fim de comparar com os resultados do outro modelo. Conforme 3.3.5.8, trata-se de um arranjo de 16 módulos de 355 Wp cada, totalizando 5,68 kWp. Os módulos são voltados para o Norte, com inclinação de 32°.

A simulação no *EnergyPlus* resultou em uma estimativa de produção anual de 245,6 kWh/(m².a). Comparando com o resultado de 173 kWh/(m².a) obtido através do Radiasol (ver 4.1), verifica-se diferença na ordem de 42% entre os métodos. Para embasar a escolha entre eles, foi consultado o registro de monitoramento de uma central geradora⁴⁷ localizada no mesmo município utilizado nesta pesquisa, composta por 16 módulos de 335 Wp cada, totalizando potência de 5,36 kWp. O ângulo de inclinação dos módulos é de 26° e o desvio azimutal é de, aproximadamente, 15° em relação ao Norte. Os dados obtidos dos registros são mostrados na Tabela 30.

⁴⁶ Soma das *Typical Hours/Week in Operation [hr/wk]* da tabela EAp2-1 *Space Usage Type* do relatório da simulação no *EnergyPlus*, considerando somente as zonas condicionadas, multiplicadas por 52 para converter horas por semana em horas por ano.

⁴⁷ Propriedade do Sr. Ilto Zurchimitten Mota, que gentilmente cedeu acesso ao monitoramento.

Tabela 30 – Produção de energia de central geradora usada para validar a escolha do método para estimar.

Mês/ano	Energia gerada kWh
Outubro/2018	761,19
Novembro/2018	839,04
Dezembro/2018	780,09
Janeiro/2019	635,85
Fevereiro/2019	663,81
Março/2019	666,02
Abril/2019	513,33
Maio/2019	390,11
Junho/2019	403,12
Julho/2019	436,35
Agosto/2019	509,3
Setembro/2019	614,1
Total 12 meses	7212,31

Fonte: elaboração própria (2019).

Os valores foram obtidos diretamente dos registros, portanto são secundários. Para fins de comparação, o total gerado em 12 meses foi convertido para valor primário, resultando em 11539,696 kWh/a. Além disso, faz-se necessário proporcionalizar em relação às respectivas potências nominais do caso real e do simulado. A potência do caso real é de 5,36 kWp, portanto a energia gerada por unidade de potência foi de 2152,9 kWh/(kWp.a). O modelo 1 tem potência total de 5,68 kWp, então a estimativa de geração pela mesma base do caso real é de 12.228,5 kWh/a. Dividindo-se este valor pela área de piso da UH (63 m²), a central geradora real teria produzido 194 kWh/(m².a). A Figura 17 apresenta os três valores.

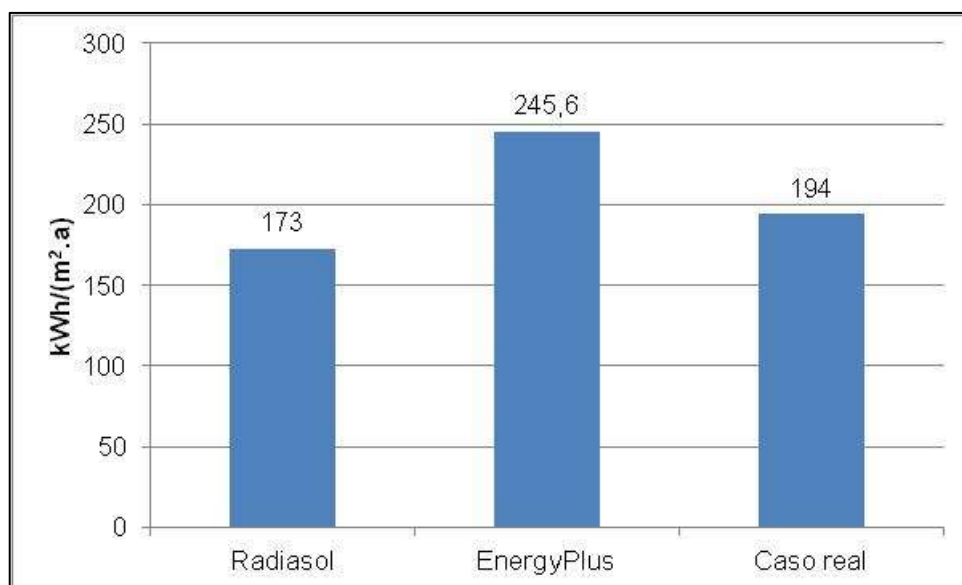


Figura 17 – Gráfico comparativo das estimativas do Radasol e *EnergyPlus* com o registro do caso real adotado como base para validação.

Fonte: elaboração própria (2019).

Através do Radasol, a estimativa de produção ficou 11% abaixo do caso real, enquanto o *EnergyPlus* estimou 27% acima. A Figura 18 mostra esses desvios.

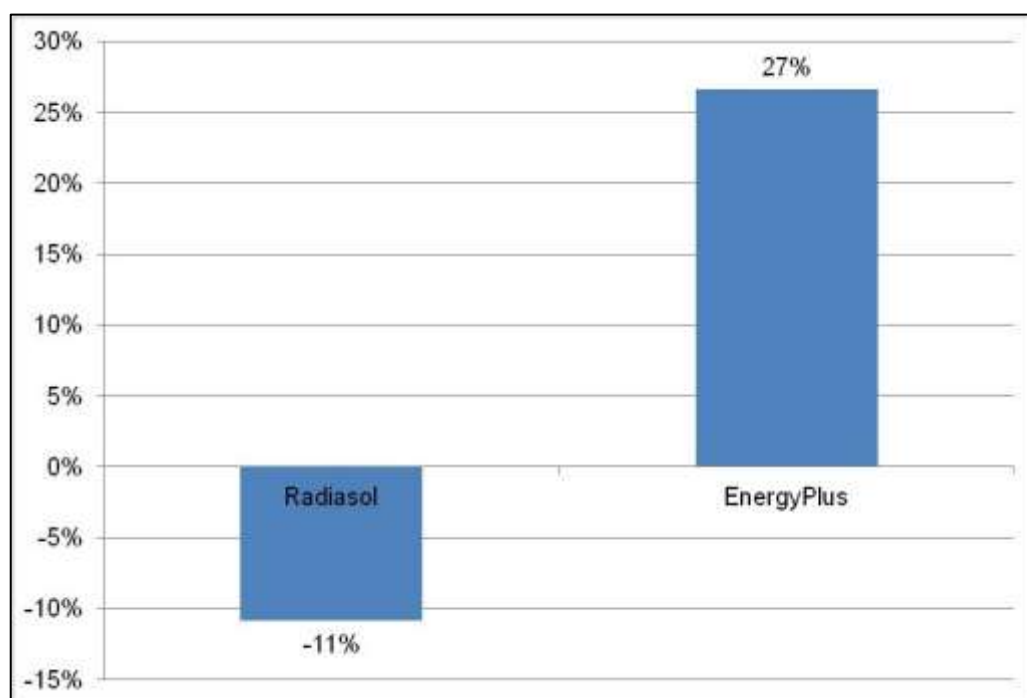


Figura 18 – Gráfico comparativo dos desvios entre as estimativas do Radasol e *EnergyPlus* em relação à energia gerada pelo caso real adotado como base para validação.

Fonte: elaboração própria (2019).

O método que utiliza o Radasol, portanto, forneceu a estimativa mais próxima do caso real. Além disso, sobre os dados de radiação que o programa oferece, é aplicada uma taxa de desempenho global de 80% (ver 4.1). Para o caso aqui

estudado, bastaria esta taxa ser alterada para 90% para que a estimativa coincidissem com o caso real⁴⁸. Comparação entre os mesmos programas foi feita também por Bender (2018), que analisou diferentes tipos de revestimentos para fachadas de edificações – inclusive módulos opacos FV e vidros FV – e concluiu por diferenças entre 23,89% e 29,95%, porém com as estimativas através do Radiasol mais altas do que os resultados do *EnergyPlus*. O método avaliativo no *EnergyPlus* foi *Simple* e os módulos e vidros FV foram previstos em posição vertical sobre as fachadas. Estes foram as principais diferenças entre os estudos comparativos de Bender (2018) e deste trabalho, o que pode explicar a inversão de resultados. Por esses motivos, o valor estimado através do Radiasol foi adotado para os cálculos a seguir, para ambos os modelos de UH.

A Tabela 31 mostra os resultados dos cálculos e simulações, a cada incremento de número de módulos. Os valores de consumo foram obtidos das simulações no *EnergyPlus*. A energia gerada (EG) foi calculada através do Radiasol e proporcionalizada conforme o número de módulos. A energia operacional (EO) foi obtida pela diferença entre o consumo e a energia gerada, dividida pela área de piso da UH. A energia incorporada aos módulos FV ($E_{I_{FV}}$) foi proporcionalizada conforme o número de módulos e, somada ao valor fixo da UH sem a geração FV, resultou na energia total incorporada à UH ($E_{I_{CVE}}$). Esta, somada a EO, resulta na energia total consumida no ciclo de vida da UH (E_{CVE}).

Tabela 31 – Consumo energético do modelo 1 com geração própria.

Nº de módulos	Consumo kWh/a	EG kWh/a	EO kWh/(m ² .a)	$E_{I_{FV}}$ kWh/(m ² .a)	$E_{I_{CVE}}$ kWh/(m ² .a)	E_{CVE} kWh/(m ² .a)
2	3.732,93	1.361,11	37,65	1,65	43,65	81,30
4	3.705,10	2.722,22	15,60	3,30	45,30	60,90
6	3.738,96	4.083,33	-5,47	4,94	46,94	41,48
8	3.655,22	5.444,44	-28,40	6,59	48,59	20,19
10	3.633,33	6.805,56	-50,35	8,24	50,24	-0,12
12	3.616,03	8.166,67	-72,23	9,89	51,89	-20,35
14	3.598,11	9.527,78	-94,12	11,53	53,53	-40,59
16	3.583,63	10.888,89	-115,96	13,18	55,18	-60,78

Fonte: elaboração própria (2019).

⁴⁸ Como comparação, verifica-se a pesquisa de Peng *et al.* (2016). Com uso de células de silício amorfo e microinversores, as medições indicaram taxa de desempenho global do sistema FV de 88%.

A Figura 19 apresenta a síntese dos resultados de energia operacional (EO), energia incorporada no ciclo de vida ($E_{I_{CVE}}$) e energia total consumida no ciclo de vida (E_{CVE}) para o modelo 1.

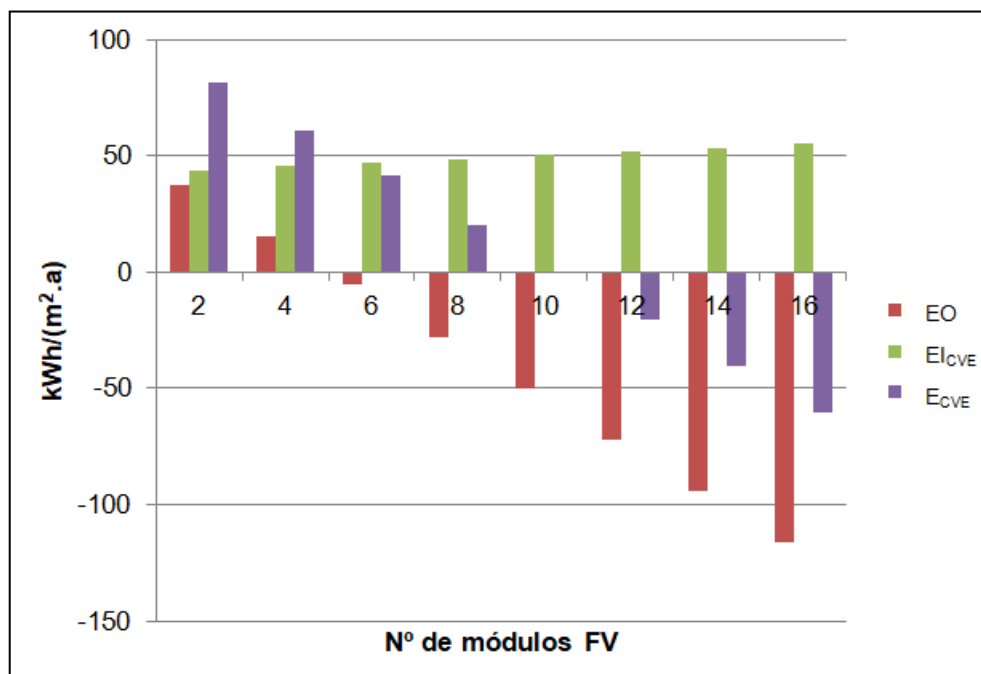


Figura 19 – Gráfico dos consumos de energia a cada incremento de módulos FV no modelo 1.
Fonte: elaboração própria (2019).

4.4 Simulação do modelo 2 original

O modelo 2, conforme apresentado em 3.3.2.2 e com as configurações descritas em 3.3.5, com exceção de 3.3.5.8 (Sistema FV), resultou nos valores de consumo de energia mostrados na Tabela 32. Assim como descrito em 4.2 para o modelo 1, a simulação foi realizada com opções de fluxo ascendente e descendente. Foram adotados os resultados da configuração para verão (fluxo de calor descendente), pois o consumo para refrigeração predominou⁴⁹. Também foram testadas as duas opções possíveis para a posição relativa das lâminas no vidro insulado, e a opção com *Low-E* (baixa emissividade) externo produziu, com pequena diferença, o melhor resultado em consumo geral⁵⁰. Por isso, essa alternativa foi utilizada nas simulações para obtenção dos valores de energia operacional. Para compor a energia incorporada total ($E_{I_{CVE}}$), foram transcritos os valores demonstrados em 3.3.3.2, porém convertidos de MJ para kWh.

⁴⁹ O consumo para aquecimento resultou em 0,2 kWh/(m².a), enquanto o consumo para refrigeração foi de 6,8 kWh/(m².a).

⁵⁰ Com o vidro *Low-E* externo, o consumo total da UH resultou em 33,63 kWh/(m².a). Com *Low-E* interno, o valor foi de 33,64 kWh/(m².a).

Tabela 32 – Consumo energético do modelo 2 original.

Tipo de energia	Consumo	
	kWh/(m ² .a)	%
El _{CVE}	55,0	62
EO	33,6	38
E _{CVE}	88,6	100

Fonte: elaboração própria (2019).

O total de energia operacional é composto por tipos de uso final conforme relacionado na Tabela 33.

Tabela 33 – Energia operacional do modelo 2 por uso final.

Tipo de uso	Consumo	
	kWh/(m ² .a)	% ⁵¹
Aquecimento	0,2	1
Refrigeração	6,8	20
Iluminação	14,0	42
Eletrodomésticos	11,8	36
Ventilação mecânica	0,8	1
Total	33,6	100

Fonte: elaboração própria (2019).

A Figura 20 ilustra os mesmos dados, mostrando a ínfima contribuição da carga para aquecimento.

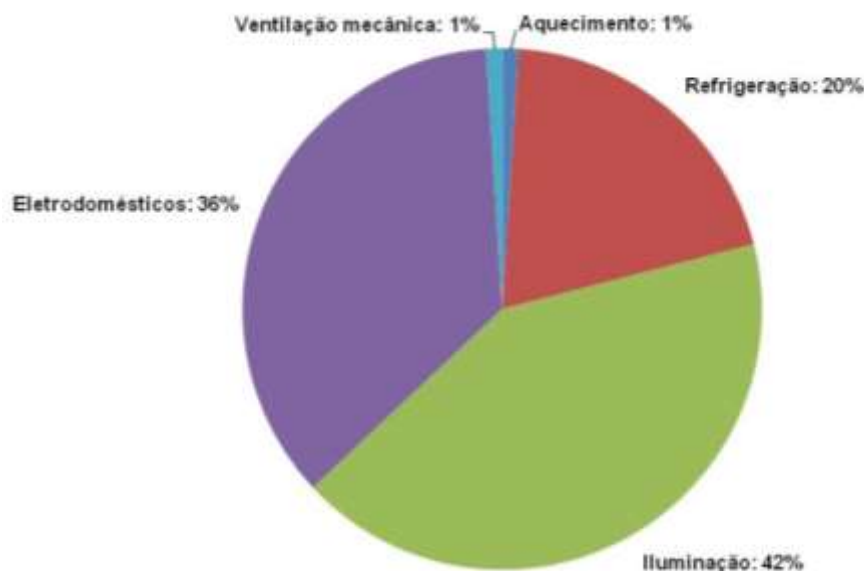


Figura 20 – Gráfico dos consumos de energia operacional do modelo 2 por uso final.

Fonte: elaboração própria (2019).

⁵¹ Valores que seriam arredondados para zero foram considerados como iguais a 1%, para representar alguma contribuição.

Os resultados obtidos para o modelo 2 mostram que a faixa de temperaturas estabelecida em 3.3.5.5 é descumprida em 0,3% do tempo de ocupação dos ambientes. A Tabela 34 resume os dados.

Tabela 34 – Tempo em desconforto térmico.

	Tempo	
	h/ano	%
Número de horas fora da faixa com aquecimento	23	0,2
Número de horas fora da faixa com refrigeração	16,33	0,1
Total de horas fora da faixa	39,33	0,3
Total de horas com sistema em funcionamento ⁵²	11888,76	100

Fonte: elaboração própria (2019).

4.5 Inserção da geração própria no modelo 2

A estratégia seguinte para redução do consumo líquido é dotar o modelo de geração FV. Usando o mesmo critério do modelo 1 para estabelecer o limite de módulos (ver 3.3.5.8), para o modelo 2 são 12 módulos no máximo, com área do painel de 23,3 m².

A Tabela 35 mostra os resultados dos cálculos e simulações, a cada incremento de número de módulos, da mesma forma realizada para o modelo 1 (ver 4.3).

Tabela 35 – Consumo energético do modelo 2 com geração própria.

Nº de módulos	Consumo kWh/a	EG kWh/a	EO kWh/(m ² .a)	El _{FV} kWh/(m ² .a)	El _{CVE} kWh/(m ² .a)	E _{CVE} kWh/(m ² .a)
2	1.638,51	1.361,11	5,66	2,12	57,12	62,78
4	1.636,16	2.722,22	-22,16	4,23	59,23	37,07
6	1.649,52	4.083,33	-49,67	6,35	61,35	11,68
8	1.640,40	5.444,44	-77,63	8,47	63,47	-14,17
10	1.655,55	6.805,56	-105,10	10,58	65,58	-39,52
12	1.640,18	8.166,67	-133,19	12,70	67,70	-65,49

Fonte: elaboração própria (2019).

A Figura 21 apresenta a síntese dos resultados de energia operacional (EO), energia incorporada no ciclo de vida (El_{CVE}) e energia total consumida no ciclo de vida (E_{CVE}) para o modelo 2.

⁵² Soma das *Typical Hours/Week in Operation [hr/wk]* da tabela EAp2-1 *Space Usage Type* do relatório da simulação no *EnergyPlus*, considerando somente as zonas condicionadas.

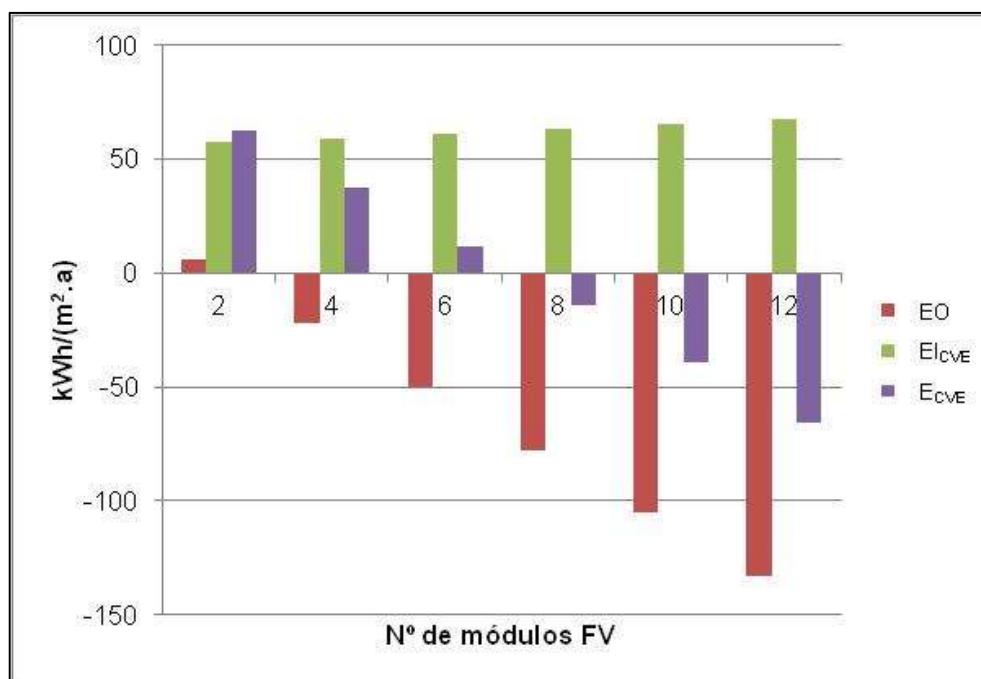


Figura 21 – Gráfico dos consumos de energia a cada incremento de módulos FV no modelo 2.
Fonte: elaboração própria (2019).

4.6 Discussão dos resultados

Os valores de consumo obtidos das simulações revelam a facilidade de construção de NZEB no Brasil. Mesmo para o modelo de UH considerado ineficiente, bastaria acrescentar geração própria para transforma-lo em NZEB.

4.6.1 Modelos sem geração própria

O modelo 1 sem geração apresentou consumo operacional de 59,7 kWh/(m².a). Embora as exigências climáticas diferentes tornem imprecisa qualquer comparação, esse valor atenderia às metas nZEB de qualquer local da UE. O menor valor máximo permitido para aquela região é de 65 kWh/(m².a) para as zonas do Mediterrâneo e Oceânica (ver Tabela 1). A diferença entre os fatores de conversão *site-to-source* é decisiva para esse resultado, pois o mesmo limite máximo de 65 kWh/(m².a) estabelecido a partir de um fator de conversão igual a 2,5 (ver 2.1.1), seria de 41,6 kWh/(m².a) para o fator brasileiro de 1,6 (ver 3.3.7). Neste caso, o valor obtido para o modelo 1 não atingiria a meta, como esperado para uma edificação ineficiente.

A energia incorporada ao modelo 1 original foi calculada por Tavares (2006) e apenas reproduzida nesta dissertação.

O modelo 2 sem geração própria mostrou significativa diferença em relação ao modelo 1, em se tratando de consumo de energia operacional. A Figura 22 mostra que a redução do consumo operacional compensou além do aumento na energia incorporada, resultando em uma diminuição de 13%, aproximadamente, na energia total consumida no ciclo de vida (E_{CVE}).

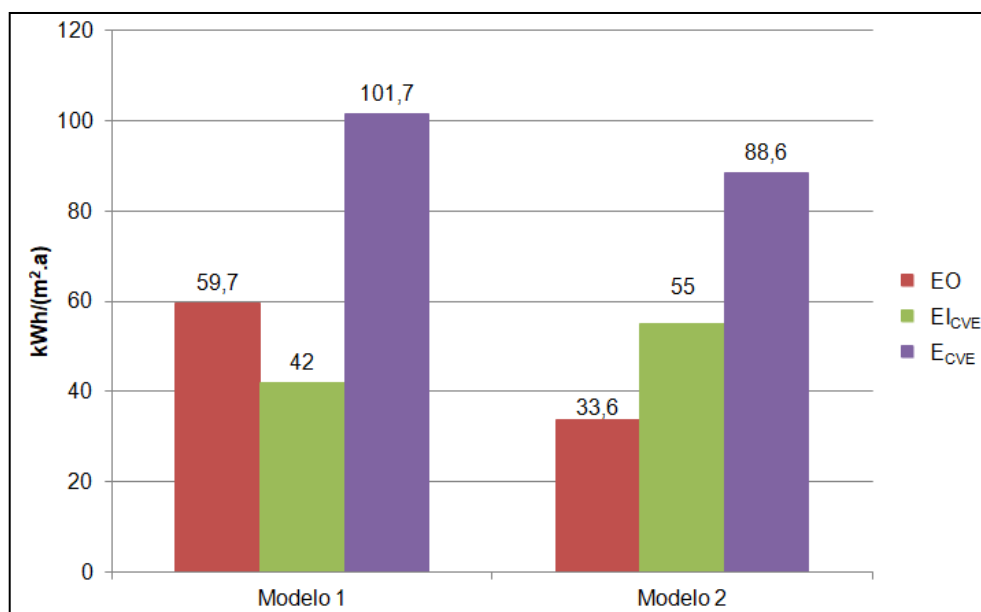


Figura 22 – Gráfico comparativo dos consumos de energia dos modelos sem geração.
Fonte: elaboração própria (2019).

O valor de energia operacional obtido para o modelo 2 atende à meta europeia convertida para o Brasil ($33,6 \text{ kWh}/[\text{m}^2.\text{a}] \times 41,6 \text{ kWh}/[\text{m}^2.\text{a}]$).

Até este ponto, as estimativas de consumo de energia indicam resultados de acordo com as expectativas, ou seja, o modelo 1, considerado ineficiente, confirma tal perfil. Enquanto isso, o modelo 2 mostra-se realmente um prédio energeticamente eficiente.

4.6.2 Modelos com geração própria

Ao inserir geração FV crescente – à taxa de dois módulos FV por vez – nos modelos, constata-se que os perfis de demanda líquida de energia rapidamente convergem de edificações consumidoras para NZEBs e então para NPEBs.

Iniciando-se por apenas dois módulos FV em cada UH, o modelo 1 torna-se NPEB operacional (superavitário em energia para uso de seus ocupantes) com seis módulos FV, e no ciclo de vida com dez módulos. Ou seja, atinge o *status* NPEB no ciclo de vida ocupando apenas 62,5% do total disponível em área de cobertura. Ao atingir 100% (16 módulos FV), o modelo 1 passa a suprir $60,78 \text{ kWh}/(\text{m}^2.\text{a})$ para a

rede, além da sua necessidade. Deixa de ser uma edificação que demanda 101,7 kWh/(m².a) ao longo de seu ciclo de vida para tornar-se fonte líquida para as demais.

O modelo 2 torna-se NPEB operacional com quatro módulos FV, e no ciclo de vida com oito. Com o total previsto (doze), atinge 65,49 kWh/(m².a) de energia excedente.

A Figura 23 apresenta a evolução da energia operacional em comparação entre os modelos. A série inicia-se com as opções sem geração própria, depois com o sistema FV mínimo e incrementos de dois módulos por vez até atingir a ocupação máxima prevista para cada cobertura. Nela, pode-se notar o momento em que os modelos tornam-se NPEBs operacionais.

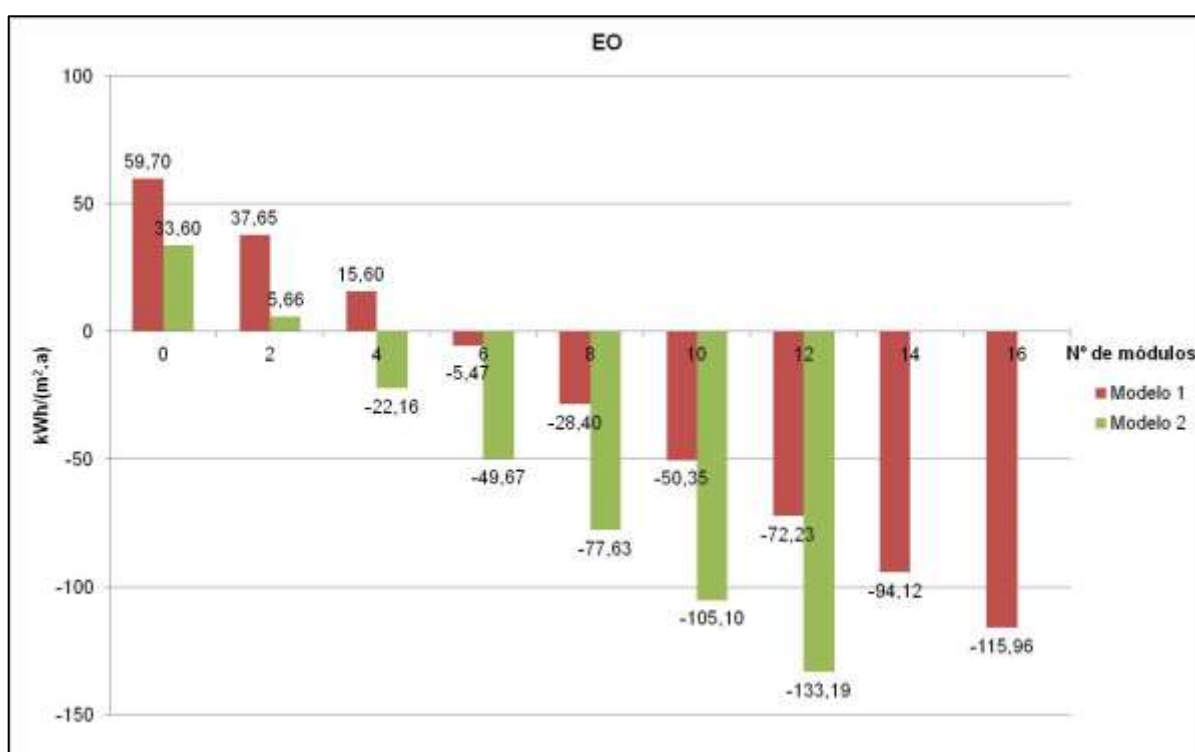


Figura 23 – Gráfico comparativo de energia operacional dos modelos.
Fonte: elaboração própria (2019).

Os sistemas FV incrementam a energia incorporada às edificações, principalmente devido ao consumo energético para fabricação dos módulos FV (ver 3.3.3.3). A energia total incorporada ao modelo 1 é aumentada em 31% com a inserção do sistema FV máximo adotado, em relação ao caso sem geração. Para o modelo 2, esse crescimento é de 23%. A diferença entre os modelos ocorre por dois fatores: a área disponível no modelo 2 é menor, e o valor da energia incorporada a ele – original, sem geração – é maior, devido ao melhor isolamento do modelo.

Estes números mostram que é significativa a contribuição dos sistemas de geração FV à energia incorporada das edificações, pois dentre todos os materiais utilizados na construção, esse componente é capaz de causar tais incrementos. Comparada à energia incorporada total ao modelo 1, por exemplo, a energia incorporada ao seu sistema FV máximo representa 24% (13,18 kWh/[m².a] / 55,18 kWh/[m².a]). É o item de maior peso, portanto (ver Tabela 5).

A Figura 24 apresenta a evolução da energia incorporada aos modelos.

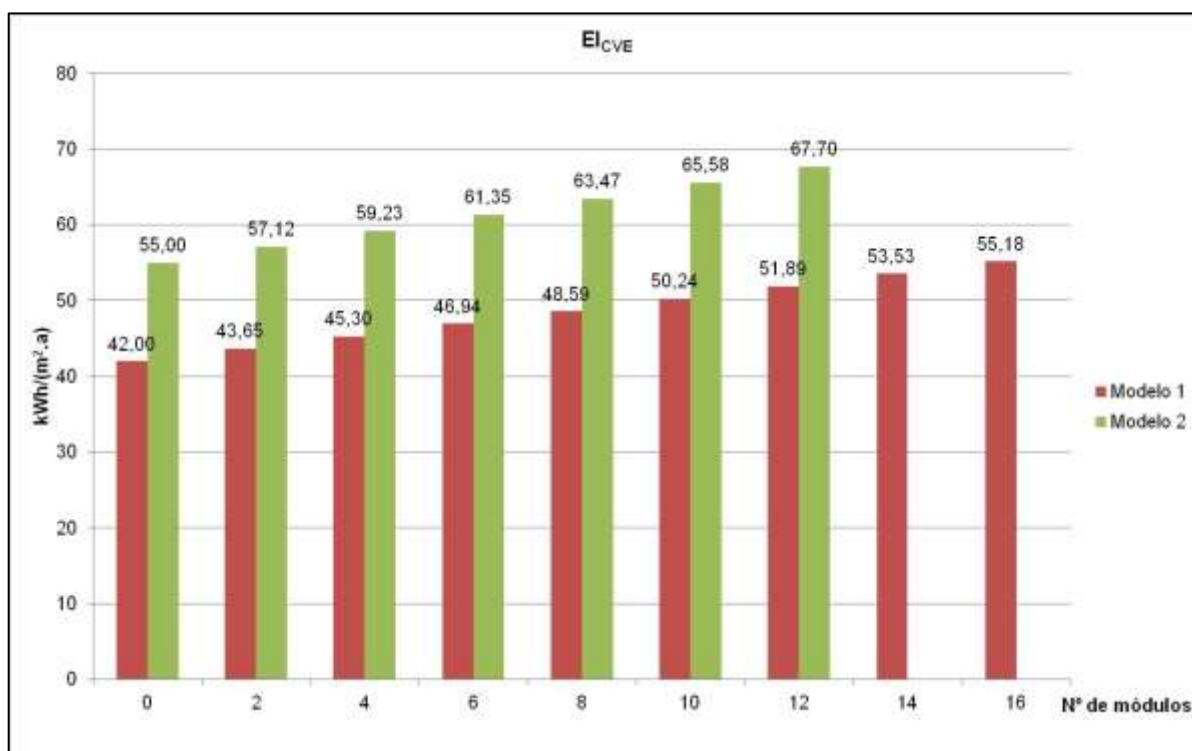


Figura 24 – Gráfico comparativo de energia incorporada aos modelos.
Fonte: elaboração própria (2019).

Apesar de tamanha importância no lado negativo do balanço energético, a contribuição da geração própria no lado positivo é maior. Os mesmos módulos FV que incrementam a energia incorporada em 31% no modelo 1 produzem quase três vezes a energia operacional demandada pela UH. No modelo 2, o sistema FV incrementa a energia incorporada em 23% mas produz quase cinco vezes a energia operacional de que a edificação necessita. Ao somar as parcelas para fechar o balanço, o resultado é favorável à adoção da geração FV como estratégia energética, pois ambos os modelos tornam-se superavitários em energia sem ocupar toda a capacidade disponível.

A Figura 25 mostra a evolução da energia total consumida no ciclo de vida dos modelos. Nela, pode-se notar o momento em que eles tornam-se NPEBs no ciclo de vida.

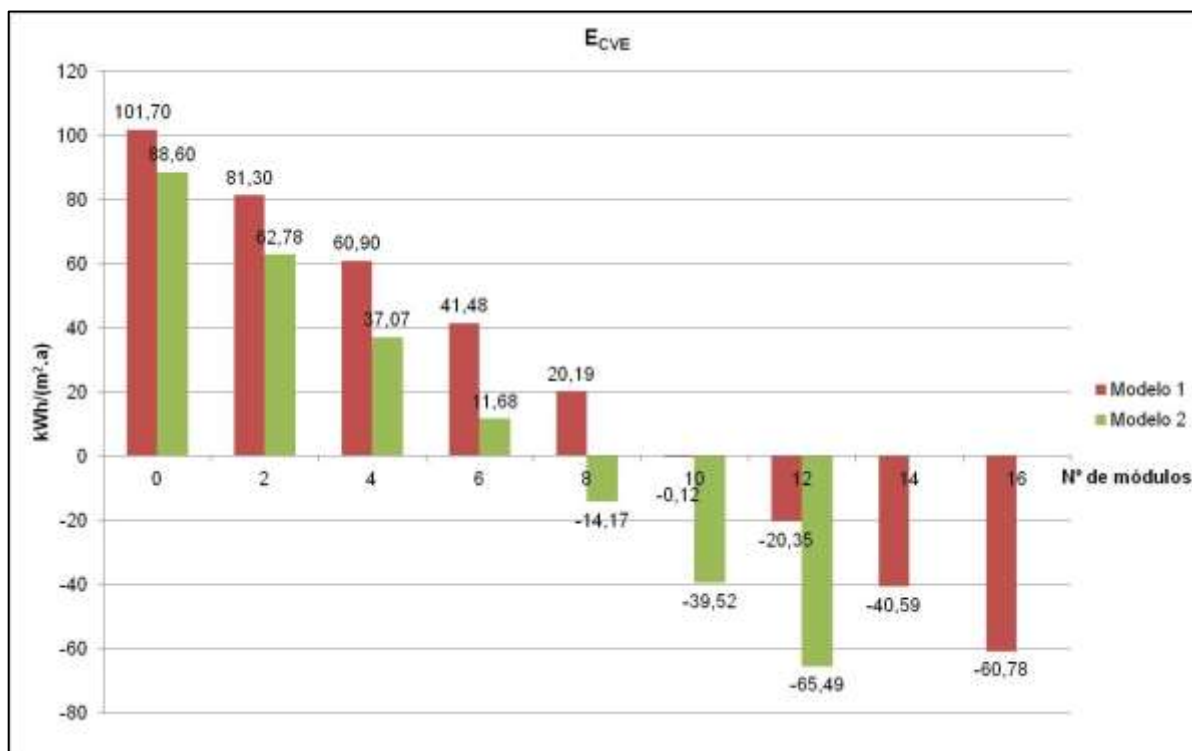


Figura 25 – Gráfico comparativo dos consumos totais de energia no ciclo de vida dos modelos.
Fonte: elaboração própria (2019).

4.6.3 Considerações finais sobre os resultados

A Tabela 36 mostra uma síntese dos resultados gerais de consumo e geração de energia elétrica nos dois modelos estudados. Todos os valores de energia são primários e normalizados pela área de piso de cada UH. O consumo bruto refere-se à energia consumida total, provida interna e externamente. EG é a energia gerada pela fonte própria. EO é a energia operacional (consumo bruto – EG). El_{CVE} é a energia incorporada no ciclo de vida. E_{CVE} é o total de energia consumida no ciclo de vida (EO + El_{CVE}).

Tabela 36 – Resultados gerais de consumo e geração para os dois modelos.

Modelo	Nº de módulos	Consumo bruto	EG	EO	El _{CVE}	E _{CVE}
		kWh/(m ² .a)				
1	0	59,70	0,00	59,70	42,00	101,70
	2	59,25	21,60	37,65	43,65	81,30
	4	58,81	43,21	15,60	45,30	60,90
	6	59,35	64,81	-5,47	46,94	41,48
	8	58,02	86,42	-28,40	48,59	20,19
	10	57,67	108,02	-50,35	50,24	-0,12
	12	57,40	129,63	-72,23	51,89	-20,35
	14	57,11	151,23	-94,12	53,53	-40,59
	16	56,88	172,84	-115,96	55,18	-60,78
2	0	33,60	0,00	33,60	55,00	88,60
	2	33,44	27,78	5,66	57,12	62,78
	4	33,39	55,56	-22,16	59,23	37,07
	6	33,66	83,33	-49,67	61,35	11,68
	8	33,48	111,11	-77,63	63,47	-14,17
	10	33,79	138,89	-105,10	65,58	-39,52
	12	33,47	166,67	-133,19	67,70	-65,49

Fonte: elaboração própria (2020).

A mesma síntese geral é ilustrada na Figura 26, onde se percebe:

- o decréscimo do consumo bruto de energia à medida em que aumentam-se os módulos sobre a cobertura. Com exceção do intervalo 4-6 módulos, em que houve um pequeno crescimento em ambos os modelos, o sombreamento causado pelos painéis FV reduziu o consumo de energia das UHs;
- o crescimento linear da energia gerada, em função do incremento dos módulos FV;
- o acelerado decréscimo da energia líquida operacional, dada pela subtração entre o consumo bruto e a energia gerada pela fonte própria. Esta grandeza mostra a condição em que os modelos tornam-se NPEBs operacionais. O modelo 1 com seis módulos FV e o modelo 2 com quatro módulos FV;
- a evolução da energia incorporada. Os valores referentes às edificações sem geração própria permanecem compondo o total desta grandeza e, a partir da inserção dos sistemas FV, o crescimento se dá linearmente com o número de módulos;
- por fim, a curva descendente da energia total consumida no ciclo de vida de cada modelo, onde se verifica a condição em que eles tornam-se

NPEBs no ciclo de vida. O modelo 1 com dez módulos FV e o modelo 2 com oito módulos FV.

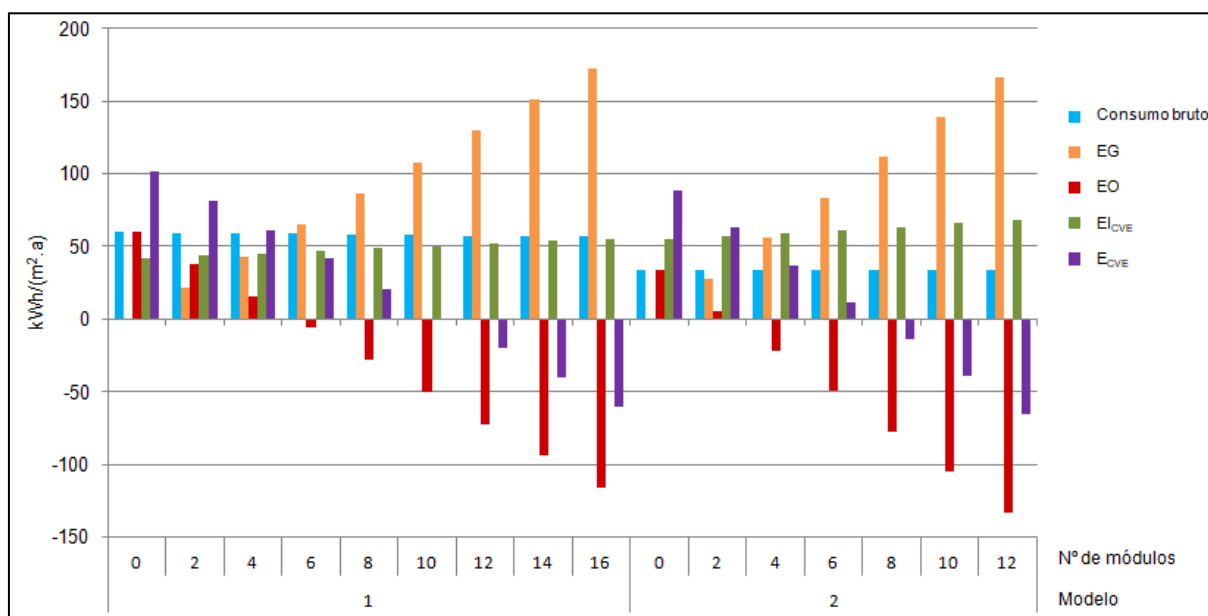


Figura 26 – Gráfico comparativo dos resultados gerais de consumo e geração pelos dois modelos. Fonte: elaboração própria (2020).

Devem ser considerados, em relação aos resultados obtidos, que os valores de transmitância térmica das paredes externas e da cobertura do modelo 1 (ver Tabela 11) não atendem aos requisitos do RTQ-R, que para nível superior a C na ZB2 devem ser iguais ou inferiores a 2,5 W/(m².K) e 2,3 W/(m².K), respectivamente. A ausência de sombreamento nas aberturas também o afasta da referida norma. Mesmo com essas deficiências, o modelo atinge o *status* NPEB, conforme discutido em 4.6.2. O modelo 2 atende aos requisitos do RTQ-R.

Os dois casos experimentados neste trabalho demonstram a importância da geração com fontes renováveis no próprio local de consumo. Isso é potencializado pela disponibilidade do recurso energético solar no Brasil. Enquanto vários países necessitam fundamentalmente investir no isolamento da envoltória das edificações e na eficiência energética de seus sistemas de climatização, o Brasil pode valer-se de estratégias de ventilação natural (aumentando a taxa de renovação do ar e melhorando a qualidade do ar interior) e suprir a demanda por energia elétrica a partir de geração própria, em quantidade suficiente para o uso operacional e com excedentes para compensar a energia incorporada.

5 Conclusão

Nesta seção, são apresentadas as considerações que encerram o trabalho de pesquisa e indicam oportunidades de avanço no tema.

5.1 Atendimento aos objetivos propostos

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar a relação entre a eficiência energética e a geração de energia no próprio local de consumo. O método encontra-se descrito na seção 3, aplicado e discutido na seção 4. Diferente do que está regulamentado na UE e em outros locais, ele não se restringe à etapa de ocupação e uso do edifício, ou seja, à energia operacional. Estende-se pela fase pré-operacional, em que energia é gasta para que a matéria-prima seja extraída da natureza, os materiais sejam industrializados, transportados e aplicados na obra. Também perpassa a vida útil e contabiliza a energia utilizada na desconstrução e na destinação dos resíduos, ou seja, na etapa pós-operacional. Por fim, leva em conta os ciclos de manutenção e as reformas realizadas durante a fase operacional, além da energia consumida no uso da habitação.

O método proposto agrega as duas formas de consumo de energia que ocorrem no ciclo de vida do prédio: aquela utilizada para que ele exista ou deixe de existir – a energia incorporada – e a que seus habitantes usam para ter conforto – a energia operacional. A soma das duas formas de energia resulta no total gasto no ciclo de vida da edificação. É este total que o método aqui demonstrado visa minimizar. Enquanto a energia incorporada é inerente aos materiais e sistemas que compõem o edifício, a energia operacional pode ser provida por fontes renováveis locais a tal ponto de tornar-se negativa – menos energia consumida do que gerada – e assim produzir superávit que compense a energia incorporada. Essa relação é interdependente, ou seja, para compensar mais energia incorporada e operacional necessita-se de maior sistema de geração, que carrega consigo mais energia

incorporada. Então a eficiência energética é o fator que contribui para a redução da demanda operacional. Mas mesmo ela, ao utilizar-se de materiais mais isolantes e outras técnicas construtivas, também aumenta a energia incorporada. Por essas razões, o balanço energético torna-se parte nuclear do método.

O nível de detalhamento utilizado permite a outros interessados reproduzirem-no com as adaptações necessárias à aplicação em outros locais e com outros modelos de edificações.

Quanto aos objetivos específicos, esta pesquisa utilizou-se do recurso da simulação computacional para estimar o consumo de energia elétrica na fase operacional, e do cálculo da produção de energia por índices de radiação solar. A produção de energia também foi estimada por simulação, mas um trabalho de validação dos resultados de ambas as técnicas indicou a opção pelo cálculo.

Os dados de energia incorporada aos materiais e sistemas foram objeto de revisão de literatura, e sua aplicação ao método elaborado foi justificada e aprimorada quando necessário.

A discussão entre eficiência energética – por qualidade do projeto, envolvendo materiais, orientação, sombreamento das aberturas e isolamento térmico – e os incrementos de geração própria de eletricidade nos modelos foi realizada, não somente para atingir o menor gasto energético mas também para produzir energia excedente no ciclo de vida da edificação. Tal efeito, inesperado quando da formulação dos objetivos, também é discutido neste trabalho.

As hipóteses estabelecidas em 1.2 foram confirmadas pelas análises feitas no decorrer desta pesquisa, pois o método elaborado pode ser considerado como adequado para responder à pergunta de pesquisa. O balanço energético das edificações estudadas mostrou que não basta considerar a etapa operacional para saber se elas são deficitárias, superavitárias ou neutras no uso da energia. Para uma avaliação completa, o ciclo de vida deve ser levado em conta, tomando-se o cuidado de escolher materiais e sistemas que não carreguem consigo energia incorporada que anule os ganhos obtidos na energia operacional.

Constatou-se que o acréscimo de energia incorporada ao sistema FV não impede o decréscimo da energia total consumida, ao menos na região estudada, pois o aumento na produção causado pelo incremento de módulos FV resultou maior do que o aumento da energia incorporada total causado pelo mesmo incremento.

Os resultados do experimento mostraram que, para o modelo 1, o consumo total de energia elétrica no ciclo de vida de 101,7 kWh/(m².a) foi reduzido pela inserção do sistema FV até tornar-se negativo com dez módulos FV. Ou seja, o modelo considerado energeticamente ineficiente tornou-se NPEB no ciclo de vida com 62,5% da geração total que pode ser instalada nele. Seu consumo de energia operacional, iniciado em 59,7 kWh/(m².a) sem geração própria, passou a ser negativo com seis módulos FV, quando portanto tornou-se NPEB operacional. Já para o modelo 2, o consumo total de energia elétrica no ciclo de vida de 88,6 kWh/(m².a) foi reduzido da mesma forma até tornar-se negativo com oito módulos FV, tornando-o NPEB no ciclo de vida com 66,7% da geração total que pode ser instalada nele. Seu consumo de energia operacional, iniciado em 33,6 kWh/(m².a) sem geração própria, passou a ser negativo com quatro módulos FV (NPEB operacional).

Para ambos os modelos, não houve um ponto de inflexão na curva de decréscimo da energia total consumida no ciclo de vida. Isto resulta da grande diferença entre a energia que os sistemas FV gastam para serem produzidos e aquela que eles produzem durante sua vida útil. Mesmo considerando a substituição dos componentes para alcançar o ciclo de vida do edifício, considerado com 50 anos, o sistema FV carrega 26,7 kWh/(m².a) de energia incorporada e produz 350 kWh/(m².a)⁵³ no local e nas condições previstas na pesquisa.

5.2 Lições aprendidas

As principais lições aprendidas com a pesquisa relatada nesta dissertação são:

- a eficiência no uso da energia nas edificações deve ser obtida por meio de um projeto que contemple além da fase de uso, pois soluções que visam à redução do consumo de energia operacional podem incrementar a energia incorporada. Desta forma, um prédio eficiente durante a etapa de uso pode ser ineficiente no ciclo de vida;

- o baixo consumo líquido de energia deve ser um resultado da conjugação entre a eficiência energética e a produção de energia, no local, por fontes renováveis. Isto não significa que a edificação torne-se independente do

⁵³ Os dois valores estão normalizados pela área de módulos nesta comparação.

fornecimento de energia gerada em pontos distantes e/ou por fontes não renováveis, mas auxilia a reduzir a quantidade da energia que é gerada desta forma. Assim, os recursos naturais não renováveis são preservados, prolongando sua disponibilidade na natureza e reduzindo os efeitos de sua exploração;

- a redução no consumo de energia não deve sacrificar o conforto dos usuários da edificação e nem a qualidade do ar interior. Estes indicadores devem fazer parte do projeto, tanto quanto o resultado do balanço energético;

- em um país com os níveis de radiação solar que o Brasil possui, é fácil obter NZEB e até mesmo NPEB, o que indica um vasto potencial para que a área de AEC possa trabalhar em benefício da sustentabilidade e conservação dos recursos naturais.

Mesmo que os resultados desta pesquisa tenham mostrado a facilidade de obterem-se excedentes de produção de energia elétrica em edificações conforme os modelos utilizados, há que se considerar que grande parte dos prédios existentes nas cidades não possui tal proporção entre área disponível na cobertura e área construída – e, portanto, à carga de uso da energia. Tipologias diferentes, como prédios de maior altura, podem ter a mesma disponibilidade para geração mas uma carga muito maior, em seus apartamentos ou salas. Por isso, a ineficiência energética não deve ser compensada por geração própria. O balanço positivo individual não significa que um grupo maior de unidades, como um bairro ou uma cidade, possa também obtê-lo. Outro motivo para impor limites à geração FV é a instabilidade, por tratar-se de fonte intermitente. Diversos estudos mostram as implicações negativas de uma proporção alta desse tipo de fonte no total que abastece um sistema de transmissão e distribuição. Portanto, é melhor para a sociedade que o balanço energético seja obtido no ponto mínimo da curva geração x consumo, ou seja, onde o consumo é menor para que a geração possa também ser a menor, no ciclo de vida.

5.3 Sugestões para trabalhos futuros

O método avaliativo proposto neste trabalho foi desenvolvido sobre modelos de edificações residenciais unifamiliares. Outros tipos poderão ser estudados, a fim de verificar-se que diferenças pode haver e que aprimoramentos devem ser feitos no método para contempla-las, tornando os resultados mais abrangentes.

A aplicação do método requer um elevado nível de parametrização conforme o caso a estudar. A mais complexa é a ACVE. Novos estudos sobre este tema poderão encontrar meios de fixar parâmetros generalizáveis, se não para todo o país, ao menos por região ou zona bioclimática. Assim restariam menos dados a pesquisar a cada aplicação. A ACVE também pode contabilizar o potencial de reuso dos resíduos de demolição.

As simulações poderão levar em conta cenários futuros de clima, com uso de simuladores de variação de parâmetros como temperatura, umidade e radiação solar. Dessa forma, seriam levadas em conta novas condições ambientais internas das edificações e, conseqüentemente, novos valores de consumo energético em razão das mudanças climáticas previstas.

O estudo do comportamento do usuário da edificação poderá acrescentar novo valor ao método, ao criar alternativas de agendas e cargas que possam se aproximar mais das condições reais de ocupação e uso.

O conceito de NZEB/NPEB pode ser reavaliado à luz do impacto causado no ciclo de vida do sistema de produção e transporte de energia elétrica externos ao edifício – geração remota, transmissão e distribuição de energia – se o consumo não é concomitante à geração local. Sendo necessário injetar, na rede pública, a energia excedente produzida em determinados horários e consumir, a partir dela, em outros, o edifício impõe carregamento a essa rede em ambos horários. Esse carregamento exige capacidade do sistema, o que implica custos ambientais para sua operação, manutenção e expansão. Dessa forma, é possível que o edifício “externalize” sua demanda por fontes não renováveis de energia e não possa ser considerado NZEB ou NPEB sem uma análise ainda mais ampla do que a utilizada neste trabalho.

Por fim, a facilidade de obterem-se excedentes de produção de energia elétrica no tipo de unidade habitacional estudado nesta pesquisa faz refletir sobre as possibilidades de uso destes excedentes. Assim, uma revisão de literatura sobre as formas existentes de comercialização da energia gerada pelo próprio consumidor poderia conduzir a um trabalho propositivo de inovações neste campo.

Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012**: estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, p. 53, v. 149, n. 76, Brasília, DF, 19 abr. 2012. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>. Acesso em: 6 ago. 2017.

ALSEMA, Erik. Energy Payback Time and CO2 Emissions of PV Systems. **Practical Handbook of Photovoltaics**, [s. l.], Elsevier, p. 1097–1117, 2012. DOI 10.1016/B978-0-12-385934-1.00037-4.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ANSI/ASHRAE Standard 105**. Standard Methods of Determining, Expressing and Comparing Building Energy Performance and Greenhouse Gas Emissions. Washington, DC – USA: ASHRAE, 2014.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2016**. Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality. Atlanta, GA – USA, 2016.

ANDRADE, Airton Cabral de. **Análise e simulação da distribuição de temperaturas em módulos fotovoltaicos**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/14738>. Acesso em: 9 fev. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA. **Energia solar fotovoltaica atinge marca histórica de 500 MW em microgeração e minigeração distribuída no Brasil**. Disponível em: <http://www.absolar.org.br/noticia/noticias-externas/energia-solar-fotovoltaica-atinge-marca-historica-de-500-mw-em-microgeracao-e-minigeracao-distribuid.html>. Acesso em: 16 fev. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15220**: desempenho térmico de edificações. Parte 2: métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16401**: instalações de ar-condicionado: sistemas centrais e unitários. Parte 2: parâmetros de conforto térmico. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15575**: edificações habitacionais - desempenho. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE REFRIGERAÇÃO, AR CONDICIONADO, VENTILAÇÃO E AQUECIMENTO. **Economia e praticidade fazem aparelhos split dominarem o mercado de ar condicionado**. Disponível em: <https://abrava.com.br/economia-e-praticidade-fazem-aparelhos-split-dominarem-o-mercado-de-ar-condicionado>. Acesso em: 24 ago. 2019.

ATTIA, Shady. Net Zero Energy Buildings Performance Indicators and Thresholds. In: ATTIA, Shady. **Net Zero Energy Buildings (NZEB)**. Amsterdam: Elsevier, 2018. p. 53–85.

BENDER, Livia Vasques. **Análise de desempenho energético e viabilidade econômica de fachadas solares fotovoltaicas na zona bioclimática brasileira 2**. 2018. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2018. Disponível em: <https://wp.ufpel.edu.br/prograu/dissertacoes-conforto-e-sustentabilidade-do-ambiente-construido>. Acesso em: 1 jul. 2019.

BERGGREN, Björn; HALL, Monika; WALL, Maria. LCE analysis of buildings - Taking the step towards Net Zero Energy Buildings. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 62, p. 381–391, 2013. DOI 10.1016/j.enbuild.2013.02.063.

BERKELEY LAB. **WINDOW v. 7.7.07 IGDB v. 68.0.0**. [S. l.]: LBL, 2019a. Disponível em: <https://windows.lbl.gov/software/window>. Acesso em: 9 set. 2018.

BERKELEY LAB. **THERM v. 7.7.07**. [S. l.]: LBL, 2019b. Disponível em: <https://windows.lbl.gov/software/therm>. Acesso em: 26 set. 2019.

BESSA, Vanessa Montoro Taboranski. **Contribuição à metodologia de avaliação das emissões de dióxido de carbono no ciclo de vida das fachadas de edifícios de escritórios**. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010. Disponível em: https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-21102010-114255/publico/Tese_Vanessa_M_Taboranski_Bessa.pdf. Acesso em: 22 jul. 2019.

BRACQUENE, Ellen; PEETERS, Jef R.; DEWULF, Wim; DUFLOU, Joost R. Taking Evolution into Account in a Parametric LCA Model for PV Panels. **Procedia CIRP**, [s. l.], v. 69, p. 389–394, 1 jan. 2018. DOI 10.1016/J.PROCIR.2017.11.103.

BRASIL. MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO. **Portal de Periódicos CAPES/MEC**. Disponível em: <http://www.periodicos.capes.gov.br>. Acesso em: 19 jul. 2018.

BRASIL. **Decreto nº 9.863, de 27 de junho de 2019**. Dispõe sobre o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica - Procel e sobre o Prêmio Nacional de Conservação e Uso Racional da Energia. Diário Oficial da União: seção 1, Ano CLVII Nº 123, 28 jun. 2019, Brasília, 2019.

BRE GLOBAL. **Methodology For The Environmental Assessment Of Buildings Using EN 15978: 2011**. Watford, UK: [s. n.]. Disponível em: http://www.greenbooklive.com/filelibrary/EN_15804/PN326-BRE-EN-15978-Methodology.pdf. Acesso em: 10 fev. 2019.

BRITANNICA GROUP INC. Humid subtropical climate climatology. In: **Encyclopædia Britannica (online)**. Disponível em: <https://www.britannica.com/science/humid-subtropical-climate>. Acesso em: 15 nov. 2019.

CAIXA ECONÔMICA FEDERAL. **Cadernos técnicos de composições para radier (pisos/laje de concreto sobre solo)**. Brasília: CEF, 2017. Disponível em:

http://www.caixa.gov.br/Downloads/sinapi-composicoes-aferidas-lote1-habitacao-fundacoes-estruturas/SINAPI_CT_LOTE1_RADIIERS_v002.pdf. Acesso em: 13 out. 2019.

CANADIAN SOLAR. **MaxPower Module Datasheet**. Ontario – Canada: [s. n.], 2019. Disponível em:

<https://www.canadiansolar.com/upload/be0d42a693ef525c/597088d687b498b5.pdf>. Acesso em: 15 set. 2019.

CARMINATTI JUNIOR, Riberto. Análise do ciclo de vida energético de projeto de habitação de interesse social concebido em Light Steel Framing. 2012. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade de São Carlos, São Carlos, 2012. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/4669/4297.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 28 jul. 2019.

CELLURA, Maurizio; GUARINO, Francesco; LONGO, Sonia; MISTRETTA, Marina. Energy life-cycle approach in Net zero energy buildings balance: Operation and embodied energy of an Italian case study. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 72, p. 371–381, abr. 2014. DOI 10.1016/j.enbuild.2013.12.046.

CHASTAS, P.; THEODOSIOU, T.; BIKAS, D.; KONTOLEON, K. Embodied Energy and Nearly Zero Energy Buildings: A Review in Residential Buildings. **Procedia Environmental Sciences**, [s. l.], v. 38, p. 554–561, 2017. DOI 10.1016/j.proenv.2017.03.123.

COMISSÃO EUROPEIA. Orientações que acompanham o Regulamento Delegado (UE) nº 244/2012 da Comissão. **Jornal Oficial da União Europeia**, Bruxelas – Bélgica, C 115, p. 1-28, 2012. Disponível em: [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:52012XC0419\(02\)&from=PT](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:52012XC0419(02)&from=PT). Acesso em: 26 jul. 2018.

COMISSÃO EUROPEIA. Recomendação (UE) 2016/1318 da Comissão. **Jornal Oficial da Comissão Europeia**, Bruxelas – Bélgica, L 208, p. 46-57, 2016. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32016H1318&from=EN>. Acesso em: 21 jul. 2018.

COSTA, Vanessa Aparecida Caieiro da; CHVATAL, Karin Maria Soares. **Manual do Pré-processador Slab**. Instituto de Arquitetura e Urbanismo (IAU/USP-SC). São Carlos – SP: IAU/USP-SC, 2017.

CRAWFORD, Robert H. Post-occupancy life cycle energy assessment of a residential building in Australia. **Architectural Science Review**, [s. l.], v. 57, n. 2, p. 114–124, 2014. DOI 10.1080/00038628.2013.819556.

CRUZ, Hildebrando; VIEGAS, João Carlos. On-site assessment of the discharge coefficient of open windows. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 126, p. 463–476, 2016. DOI 10.1016/j.enbuild.2016.05.051.

DALBEM, Renata. **Desempenho de edificação residencial no Sul do Brasil sob a ótica energética e econômica**: da NBR 15575 à Passive House. 2018. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo,

Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2018. Disponível em: <https://wp.ufpel.edu.br/prograu/dissertacoes-conforto-e-sustentabilidade-do-ambiente-construido>. Acesso em: 17 mar. 2019.

DÁVI, Giovani Almeida; CAAMAÑO-MARTÍN, Estefanía; RÜTHER, Ricardo; SOLANO, Juan. Energy performance evaluation of a net plus-energy residential building with grid-connected photovoltaic system in Brazil. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 120, 2016. DOI 10.1016/j.enbuild.2016.03.058.

DEBIASI, Rosana. **Análise da estratégia de ventilação híbrida para a redução do consumo de energia elétrica em edificações comerciais para o clima de Florianópolis**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/174295/344663.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 1 nov. 2019.

DENG, S.; WANG, R. Z.; DAI, Y. J. How to evaluate performance of net zero energy building - A literature research. **Energy**, [s. l.], p. 1–16, 2014. DOI 10.1016/j.energy.2014.05.007.

DIDONÉ, Evelise Leite. **Parametric study for net zero energy building strategies in Brazil considering semi-transparent PV windows**. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia) – Department of Architecture, Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe – Germany, 2014. Disponível em: <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000044721>. Acesso em: 14 jul. 2018.

DUTRA, Leno Porto; SALAMONI, Isabel Tourinho; CUNHA, Eduardo Grala da. O conceito NZEB aplicado a edificação comercial na Zona Bioclimática 2 – Pelotas/RS. In: XX Encontro de Pós-graduação, 2018, Pelotas. **Anais [...]**. Pelotas: UFPEL, 2018. Disponível em: http://cti.ufpel.edu.br/siepe/arquivos/2018/SA_00945.pdf. Acesso em: 20 jan. 2018.

DUTRA, Leno Porto; SALAMONI, Isabel Tourinho; CUNHA, Eduardo Grala da. A aplicação de metas NZEB a edificação residencial na zona bioclimática brasileira nº 2. In: XV Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído e XI Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído: Mudanças climáticas, concentração urbana e novas tecnologias, 2019, João Pessoa. **Anais [...]**. João Pessoa: ANTAC, 2019, p. 2065-2074. Disponível em: <https://www.even3.com.br/encac2019>. Acesso em: 27 nov. 2019.

EFFINERGIE. **Regles techniques des labels BEPOS effinergie 2017 et BEPOS+ effinergie 2017 associés à l'expérimentation E+C- Version 1 – 8 mars 2017**. Paris: [s. n.], 2017. Disponível em: <https://www.alterea.fr/wp-content/uploads/2017/09/Règles-techniques-des-labels-BEPOS-et-BEPOS-Effinergie.pdf>. Acesso em: 30 set. 2018.

ELSEVIER. **Science Direct**. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com>. Acesso em: 19 jul. 2018.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balço Energético Nacional 2019:** Ano base 2018. Brasília: EPE, 2019. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-377/topico-494/BEN 2019 Completo WEB.pdf>. Acesso em: 22 dez. 2019.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Nota Técnica EPE 030/2018.** Uso de Ar Condicionado no Setor Residencial Brasileiro: Perspectivas e contribuições para o avanço em eficiência energética. Brasília: EPE, 2018. Disponível em: http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-341/NT EPE 030_2018_18Dez2018.pdf. Acesso em: 24 ago. 2019.

ESSER, Anke; SENSFUSS, Frank. **Review of the default primary energy factor (PEF) reflecting the estimated average EU generation efficiency referred to in Annex IV of Directive 2012/27/EU and possible extension of the approach to other energy carriers.** Final report. Evaluation of primary energy factor calculation options for electricity. Karlsruhe – Germany: Fraunhofer ISI, 2016. Disponível em: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/final_report_pef_eed.pdf. Acesso em: 30 nov. 2019.

EUROPEAN COMMISSION. **UK National Plan: Increasing the number of nearly zero energy buildings.** [S. l: s. n.]. Disponível em: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/united_kingdom_en_version.pdf. Acesso em: 16 fev. 2019.

EUROPEAN COMMISSION. **Action plan for increasing the number of nearly zero-energy buildings.** [S. l: s. n.]. Disponível em: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/france_en_version.pdf. Acesso em: 16 fev. 2019.

EUROSTAT EUROPEAN COMMISSION. **Energy, transport and environment indicators - 2017 edition.** Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2017. Disponível em: <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/3217494/8435375/KS-DK-17-001-EN-N.pdf/18d1ecfd-acd8-4390-ade6-e1f858d746da>. Acesso em: 26 out. 2018.

FAY, Roger; TRELOAR, Graham; IYER-RANIGA, Usha. Life-cycle energy analysis of buildings: a case study. **Building Research & Information**, [s. l.], v. 28, n. 1, p. 31–41, 2000. DOI 10.1080/096132100369073.

FRANCE. **Arrêté du 26 octobre 2010 relatif aux caractéristiques thermiques et aux exigences de performance énergétique des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles de bâtiments.** Paris: [s. n.], 2010. Disponível em: <https://www.legifrance.gouv.fr/eli/arrete/2010/10/26/DEVU1026270A/jo/texte>. Acesso em: 30 set. 2018.

FREITAS, Julye Ramalho; LEITZKE, Rodrigo Karini; CLEFF, Vinicius Marins; HAX, Douglas; DUARTE, Carolina de Mesquita; CARVALHO, Amanda Rosa de; CUNHA, Eduardo Grala da. Análise das condições de contorno para simulação e configuração de ventilação natural em prédio escolar. In: XVII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2018, Foz do Iguaçu. **Anais [...]**. Foz do Iguaçu:

ANTAC, 2018, p. 377-387. Disponível em: <https://www.antac.org.br/anais-c1pyf>. Acesso em: 28 set. 2019.

FTHENAKIS, V. M.; KIM, H. C. Photovoltaics: Life-cycle analyses. **Solar Energy**, [s. l.], v. 85, n. 8, p. 1609–1628, 2011. DOI 10.1016/j.solener.2009.10.002.

FTHENAKIS, Vasilis; FRISCHKNECHT, Rolf; RAUGEI, Marco; KIM, Hyung Chul; ALSEMA, Erik; HELD, Michael; WILD-SCHOLTEN, Mariska de. **Methodology Guidelines on Life Cycle Assessment of Photovoltaic Electricity**. [S. l.: s. n.], 2011. Disponível em: http://www.iea-pvps.org/fileadmin/dam/public/report/technical/rep12_11.pdf. Acesso em: 8 fev. 2019.

FU, Yinyin; LIU, Xin; YUAN, Zengwei. Life-cycle assessment of multi-crystalline photovoltaic (PV) systems in China. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 86, p. 180–190, 2015. DOI 10.1016/j.jclepro.2014.07.057.

GIORDANO, Roberto; DEMARIA, Enrico; DUZEL, Angela. Embodied energy versus operational energy in a nearly zero energy building case study. **Energy Procedia**, [s. l.], v. 111, p. 367–376, 2017. DOI 10.1016/j.egypro.2017.03.198.

GLOBAL BUILDINGS PERFORMANCE NETWORK. **Building Policies for a Better World**. Disponível em: <http://www.gbpn.org/databases-tools/bc-detail-pages/germany#Code History and Future Targets>. Acesso em: 29 mar. 2019.

GOVERNMENT EUROPA. **EU approves revisions to Energy Performance of Buildings directive**. Disponível em: <https://www.governmenteuropa.eu/eu-revisions-energy-performance-of-buildings-directive/86566>. Acesso em: 21 jul. 2018.

HARADA, Magali. Bioclimatismo. In: HARADA, Magali. **Blog de Arquitetura Bioclimática**. Disponível em: <http://bioclimatismo.com.br>. Acesso em: 22 jul. 2019.

HARKOUSS, Fatima; FARDOUN, Farouk; BIWOLE, Pascal Henry. Optimization approaches and climates investigations in NZEB—A review. **Building Simulation**, [s. l.], v. 11, n. 5, p. 923–952, 8 out. 2018. DOI 10.1007/s12273-018-0448-6.

HENSEN, Jan L M; LAMBERTS, Roberto. **Building Performance Simulation for Design and Operation**. Abingdon, Oxon – UK: Spon Press, 2011. *E-book* (534 p.).

HERNANDEZ, Patxi; KENNY, Paul. Development of a methodology for life cycle building energy ratings. **Energy Policy**, [s. l.], v. 39, n. 6, p. 3779–3788, 2011. DOI 10.1016/j.enpol.2011.04.006.

HERNANDEZ, Patxi; KENNY, Paul. From net energy to zero energy buildings : Defining life cycle zero energy buildings. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 42, n. 6, p. 815–821, 2010. DOI 10.1016/j.enbuild.2009.12.001.

HIMPE, Eline; TRAPPERS, Leen; DEBACKER, Wim; DELGHUST, Marc; LAVERGE, Jelle; JANSSENS, Arnold; MOENS, Jan; VAN HOLM, Marlies. Life cycle energy analysis of a zero-energy house. **Building Research and Information**, [s. l.], v. 41, n. 4, p. 435–449, ago. 2013. DOI 10.1080/09613218.2013.777329.

HONG, Jingke; SHEN, Geoffrey Q.P.; FENG, Yong. Life Cycle Assessment of Green Buildings: A Case Study in China. *In: International Conference on Construction and Real Estate Management*, 2013, Karlsruhe – Germany. **Anais [...]**. Karlsruhe – Germany: ASCE, 2013, p. 209-220. DOI 10.1061/9780784413135.020.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais - Anexo da Portaria nº 18, de 16 de janeiro de 2012**. Rio de Janeiro: INMETRO, 2012. Disponível em: <http://www.pbeedifica.com.br>. Acesso em: 29 jul. 2018.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas - Anexo da Portaria nº 372, de 17 de setembro de 2010, com alterações das portarias: nº 17 de 2012 e nº 299 de 2013**. Rio de Janeiro: INMETRO, 2013a. Disponível em: <http://www.pbeedifica.com.br>. Acesso em: 29 jul. 2018.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **Portaria nº 410, de 16 de agosto de 2013**. Brasília: INMETRO, 2013b. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC000789.pdf>. Acesso em: 21 out. 2018.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **PBE Edifica**. [S. l.]: INMETRO, 2018. Disponível em: <http://www.pbeedifica.com.br>. Acesso em: 10 jun. 2018.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Evaluation of Embodied Energy and CO₂eq for Building Construction (Annex 57) - Subtask 1: Basics, Actors and Concepts**. Karlsruhe – Germany: Institute for Building Environment and Energy Conservation, 2016. Disponível em: http://www.ecbcs.org/Data/publications/EBC_Annex_57_ST1_Basics_Actors_Concepts.pdf. Acesso em: 20 jan. 2019.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **United Kingdom Zero Energy Buildings**. Disponível em: [https://www.iea.org/beep/united kingdom/labels/zero-energy-buildings-zeb.html](https://www.iea.org/beep/united%20kingdom/labels/zero-energy-buildings-zeb.html). Acesso em: 28 mar. 2019.

INTERNATIONAL ORGANISATION FOR STANDARDISATION. **ISO 14040:2006**. Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework. Geneva – Swiss: ISO, 2006a.

INTERNATIONAL ORGANISATION FOR STANDARDISATION. **ISO 14044:2006**. Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines. Geneva – Swiss: ISO, 2006b.

INVIDIATA, Andrea. **Método de avaliação multicritério de estratégias de projeto de edificações mais sustentáveis**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017. Disponível em:

<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/188525/PECV1097-T.pdf?sequence=-1>. Acesso em: 29 abr. 2019.

JELLE, Bjørn Petter. Building integrated photovoltaics: A concise description of the current state of the art and possible research pathways. **Energies**, [s. l.], v. 9, n. 1, p. 1–30, 2016. DOI 10.3390/en9010021.

KANTOLA, Mikko; SAARI, Arto. Ensuring functionality of a nearly zero-energy building with procurement methods. **Facilities**, [s. l.], v. 32, n. 7/8, p. 312–323, 2014. DOI 10.1108/F-05-2012-0040.

LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES. **Arquivos climáticos INMET 2018**. Disponível em: <http://www.labee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/inmet2018>. Acesso em: 2 mar. 2019.

LABSOL UFRGS. **Radiasol**. Porto Alegre: UFRGS, 2019. Disponível em: <http://www.solar.ufrgs.br>. Acesso em: 15 set. 2019.

LAMBERTS, Roberto; GHISI, Enedir; PEREIRA, Cláudia Donald; BATISTA, Juliana Oliveira. **Casa Eficiente**: Simulação Computacional do Desempenho Termo-Energético, v. 4. Florianópolis: UFSC/LabEEE, 2010.

LEROY MERLIN. **Calculadora de tinta**. Disponível em: <https://www.leroymerlin.com.br/assistente/calculadora-de-tinta>. Acesso em: 13 set. 2019.

LIDDAMENT, Martin W. **Air Infiltration Calculation Techniques**: An Applications Guide. Coventry - UK: The Air Infiltration and Ventilation Centre, 1986. Disponível em: <http://www.aivc.org>. Acesso em: 3 nov. 2019.

LUO, Wei; KHOO, Yong Sheng; KUMAR, Abhishek; LOW, Jonathan Sze Choong; LI, Yanmin; TAN, Yee Shee; WANG, Yan; ABERLE, Armin G.; RAMAKRISHNA, Seeram. A comparative life-cycle assessment of photovoltaic electricity generation in Singapore by multicrystalline silicon technologies. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, [s. l.], v. 174, p. 157–162, 1 jan. 2018. DOI 10.1016/j.solmat.2017.08.040.

MANFREDINI, Constance. **Impactos ambientais causados pelas indústrias de cerâmica vermelha no Rio Grande do Sul**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/117391/000375935.pdf?sequence=1>. Acesso em: 28 jul. 2019.

MARSZAL, A. J.; HEISELBERG, P.; BOURRELLE, J. S.; MUSALL, E.; VOSS, K.; SARTORI, I.; NAPOLITANO, A. Zero Energy Building - A review of definitions and calculation methodologies. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 43, n. 4, p. 971–979, 2011. DOI 10.1016/j.enbuild.2010.12.022.

MENDELEY LTD. **Mendeley**, 2019. Disponível em: <https://www.elsevier.com/solutions/mendeley>. Acesso em: 20 out. 2018.

- MONTES, María Andrea Triana. **Abordagem integrada no ciclo de vida de habitações de interesse social considerando mudanças climáticas**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade de Santa Catarina, Florianópolis, 2016. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/teses/TESE MARIA ANDREA TRIANA.pdf>. Acesso em: 22 jul. 2019.
- MOPA INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA. **Catálogo de produtos MOPA**. São Paulo: [s. n.], 2019. Disponível em: http://www.mopa.com.br/static/catalogos_downloads/75cba95c469daf40d493eb6d0d6fc17309092304.pdf. Acesso em: 13 out. 2019.
- MOTUZIENĖ, Violeta; ROGOŽA, Artur; LAPINSKIENĖ, Vilūnė; VILUTIENĖ, Tatjana. Construction solutions for energy efficient single-family house based on its life cycle multi-criteria analysis: A case study. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 112, n. 2015, p. 532–541, 2016. DOI 10.1016/j.jclepro.2015.08.103.
- MUNARIM, Ulisses. **Benefícios ambientais da preservação do patrimônio edificado**: Análise do ciclo de vida da reabilitação de edificações vs. nova construção. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/130929>. Acesso em: 28 jul. 2019.
- NABUT NETO, Abdala Carim. **Energia incorporada e emissões de CO2 de fachadas**. Estudo de caso do Steel Frame para utilização em Brasília. 2011. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2011. Disponível em: <http://www.pecc.unb.br/wp-content/uploads/dissertacoes/M11-9A-Abdala-Neto.pdf>. Acesso em: 28 jul. 2019.
- NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY. **Sandia PV module database - library editor of System Advisor Model (SAM)**. [S. l.]: NREL, 2014.
- ORDENES, Martín; PEDRINI, Aldomar; GHISI, Enedir; LAMBERTS, Roberto. **Metodologia utilizada na elaboração da biblioteca de materiais e componentes construtivos brasileiros para simulações no VisualDOE-3.1**. Florianópolis: UFSC/LabEEE, 2003. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/node/266>. Acesso em: 9 set. 2018.
- PARLAMENTO EUROPEU; CONSELHO DA UNIÃO EUROPEIA. Directiva 2010/31/UE do Parlamento Europeu e do Conselho de 19 de maio de 2010 relativa ao desempenho energético dos edifícios (reformulação). **Jornal Oficial da União Europeia**. Strasbourg – France: [s. n.], 2010. Disponível em: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/pt/TXT/?uri=CELEX:32010L0031>. Acesso em: 22 jul. 2018.
- PARLAMENTO EUROPEU; CONSELHO DA UNIÃO EUROPEIA. Diretiva (UE) 2018/844 do Parlamento Europeu e do Conselho de 30 de maio de 2018 que altera a Diretiva 2010/31/UE relativa ao desempenho energético dos edifícios e a Diretiva 2012/27/UE sobre a eficiência energética (Texto relevante para efeitos do EEE). **Jornal Oficial da União Europeia**. Strasbourg – France, 2018. Disponível em:

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L0844&from=EN>. Acesso em: 9 jan. 2019.

PAULSEN, Jacob Silva; SPOSTO, Rosa Maria. A life cycle energy analysis of social housing in Brazil: Case study for the program “MY HOUSE MY LIFE”. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 57, n. 2013, p. 95–102, 2013. DOI 10.1016/j.enbuild.2012.11.014.

PENG, Jinqing; CURCIJA, Dragan C.; LU, Lin; SELKOWITZ, Stephen E.; YANG, Hongxing; MITCHELL, Robin. Developing a method and simulation model for evaluating the overall energy performance of a ventilated semi-transparent photovoltaic double-skin facade. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, [s. l.], v. 24, n. 6, p. 781–799, 2016. DOI 10.1002/pip.2727.

PEREIRA, Enio Bueno; MARTINS, Fernando Ramos; ABREU, Samuel Luna de; RÜTHER, Ricardo. **Atlas Brasileiro de Energia Solar - 2ª edição**. São José dos Campos: INPE, 2017. Disponível em: http://sonda.ccst.inpe.br/publicacoes/atlas_solar.html. Acesso em: 3 nov. 2017.

PEREIRA, Helena Aviz da Costa; MELO, Ana Paula; SORGATO, Márcio; VERSAGE, Rogério; MATOS, Michele; LAMBERTS, Roberto. **Manual de simulação computacional de edifícios naturalmente ventilados no programa EnergyPlus - Versão 8.0**. Florianópolis: UFSC/LabEEE, 2013. Disponível em: <http://www.labee.ufsc.br>. Acesso em: 6 out. 2019.

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antonio. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CRESESB/CEPEL, 2014.

PINTO, Jones Vieira; MEDVEDOVSKI, Nirce Saffer. Contribuições para estudo do Minha Casa Minha Vida para uma cidade de porte médio: Pelotas-RS. *In*: IV Simpósio Brasileiro de Qualidade do Projeto no Ambiente Construído, 2015, Viçosa - MG. Anais [...]. Viçosa – MG: UFV, 2015. DOI 10.18540/2176-4549.6032.

PROCEL INFO. **PROCEL - Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica**. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br/main.asp>. Acesso em: 7 set. 2019.

REN21. **Renewables 2019 Global Status Report**. Paris: REN21, 2019. Disponível em: <https://www.ren21.net/gsr-2019>. Acesso em: 5 jul. 2019.

RUPP, Ricardo Forgiarini; LAMBERTS, Roberto. **Fatores de conversão de energia elétrica e térmica em energia primária e em emissões de dióxido de carbono a serem usados na etiquetagem de nível de eficiência energética de edificações**. Florianópolis: UFSC/CB3E, 2017. Disponível em: http://cb3e.ufsc.br/sites/default/files/Relatório_Fatores_de_Conversão.pdf. Acesso em: 26 jul. 2018.

SABER, Esmail M.; LEE, Siew Eang; MANTHAPURI, Sumanth; YI, Wang; DEB, Chirag. PV (photovoltaics) performance evaluation and simulation-based energy yield prediction for tropical buildings. **Energy**, [s. l.], v. 71, p. 588–595, 15 jul. 2014. DOI 10.1016/j.energy.2014.04.115.

SANTOS, Aguinaldo dos. **Seleção do método de pesquisa**: guia para pós-graduando em design e áreas afins. Curitiba: Insight, 2018.

SARTORI, I.; HESTNES, A.G. Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: A review article. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 39, n. 3, p. 249–257, 1 mar. 2007. DOI 10.1016/j.enbuild.2006.07.001.

SESANA, Marta Maria; SALVALAI, Graziano. Overview on life cycle methodologies and economic feasibility for nZEBs. **Building and Environment**, [s. l.], v. 67, p. 211–216, 2013. DOI 10.1016/j.buildenv.2013.05.022.

SILVA, Bruna Vicente da. **Construção de ferramenta para avaliação do ciclo de vida de edificações**. 2013. Dissertação (Mestrado em Energia) – Departamento de Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013. Disponível em: www.teses.usp.br. Acesso em: 24 jul. 2019.

SILVA, Luciano Pires. **Análise do ciclo de vida energético de habitações de interesse social**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/76184>. Acesso em: 27 jul. 2019.

SILVEIRA, Ricardo; MARINOSKI, Deivis Luis; LAMBERTS, Roberto. Avaliação da absorção à radiação solar e temperatura superficial de telhas de edificações do campus da UFSC. In: XIV ENTAC - Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2012, Juiz de Fora. **Anais [...]**. Juiz de Fora: ANTAC, 2012, p. 1166–1170. Disponível em: <http://www.infohab.org.br/entac2014/2012/docs/1073.pdf>. Acesso em: 16 mar. 2019.

STEPHAN, André; CRAWFORD, Robert H.; DE MYTTENAERE, Kristel. A comprehensive assessment of the life cycle energy demand of passive houses. **Applied Energy**, [s. l.], v. 112, p. 23–34, 2013. DOI 10.1016/j.apenergy.2013.05.076.

TAVARES, Sérgio Fernando. **Metodologia de análise do ciclo de vida energético de edificações residenciais brasileiras**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGECC, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/89528>. Acesso em: 26 jul. 2018.

THE NATIONAL INSTITUTE OF BUILDING SCIENCES. **A Common Definition for Zero Energy Buildings**. [S. l.]: DOE, 2015. Disponível em: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/09/f26/bto_common_definition_zero_energy_buildings_093015.pdf. Acesso em: 29 mar. 2019.

THE WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT. **Our Common Future**. [S. l.]: UN, 1987. Disponível em: <http://www.un-documents.net/our-common-future.pdf>. Acesso em: 17 nov. 2018.

THOMAS, Stefan; SUERKEMPER, Felix; ADISORN, Thomas; HAUPTSTOCK, Dorothea; SCHÄFER-SPARENBERG, Carolin; THOLEN, Lena; VONDUNG, Florin; BECKER, Daniel; TESNIERE, Lucie; BOURGAULT, Charles; FÖRSTER, Sonja. **Energy Efficiency Policies in Europe**. Case Study Danish Building Code. [S. l.]:

Ecofys, 2016. Disponível em: http://www.energy-efficiency-watch.org/fileadmin/eew_documents/EEW3/Case_Studies_EEW3/Case_Study_Danish_Building_Code_final.pdf. Acesso em: 30 set. 2018.

THOMSEN, Kirsten Englund. Danish plans towards Nearly Zero Energy Buildings. **REHVA Journal**, Brussels – Belgium, p. 40–42, 2014. Disponível em: https://www.rehva.eu/fileadmin/REHVA_Journal/REHVA_Journal_2014/RJ_issue_3/P.06/06-08_Thomsen_RJ1403_WEB.pdf. Acesso em: 30 set. 2018.

THORMARK, Catarina. The effect of material choice on the total energy need and recycling potential of a building. **Building and Environment**, [s. l.], v. 41, n. 8, p. 1019–1026, 2006. DOI 10.1016/j.buildenv.2005.04.026.

TORCELLINI, P; PLESS, S; DERU, M; CRAWLEY, D. Zero Energy Buildings: A Critical Look at the Definition. ACEEE Summer Study. **Anais [...]**. Pacific Grove, CA - USA: NREL, 2006. Disponível em: <http://www.nrel.gov/docs/fy06osti/39833.pdf>. Acesso em: 23 jul. 2018.

UNITED KINGDOM. **Climate Change Act 2008**. Disponível em: <http://www.legislation.gov.uk/ukpga/2008/27/section/1>. Acesso em: 16 fev. 2019.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Executive Order 13693, Planning for Federal Sustainability in the Next Decade**. Disponível em: <https://www.epa.gov/greeningepa/executive-order-13693-planning-federal-sustainability-next-decade>. Acesso em: 16 fev. 2019.

US DEPARTMENT OF ENERGY. **EnergyPlus v.9.1.0**. San Francisco, CA – USA: NREL, 2019a. Disponível em: <https://energyplus.net>. Acesso em: 21 abr. 2019.

US DEPARTMENT OF ENERGY. **EnergyPlus Version 9.1.0 Documentation - Input Output Reference**. San Francisco, CA – USA: NREL, 2019b. Disponível em: <https://energyplus.net>. Acesso em: 21 abr. 2019.

WU, Peishi; MA, Xiaoming; JI, Junping; MA, Yunrong. Review on life cycle assessment of energy payback of solar photovoltaic systems and a case study. **Energy Procedia**, [s. l.], v. 105, p. 68–74, 2017. DOI 10.1016/j.egypro.2017.03.281.

YIN, Robert K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. 2ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.

YU, Man; HALOG, Anthony. Solar photovoltaic development in Australia-a life cycle sustainability assessment study. **Sustainability (Switzerland)**, [s. l.], v. 7, n. 2, p. 1213–1247, 2015. DOI 10.3390/su7021213.

ZEB, Kamran; UDDIN, Waqar; KHAN, Muhammad Adil; ALI, Zunaib; ALI, Muhammad Umair; CHRISTOFIDES, Nicholas; KIM, H. J. A comprehensive review on inverter topologies and control strategies for grid connected photovoltaic system. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 94, p. 1120–1141, 2018. DOI 10.1016/j.rser.2018.06.053.

Glossário

Célula FV: dispositivo elementar especificamente desenvolvido para realizar a conversão direta de energia solar em energia elétrica.

Central geradora: conjunto formado pelos módulos FV, inversores e instalações necessárias à geração de energia elétrica.

Consumo líquido de energia: energia consumida no edifício, deduzido o valor da energia gerada no próprio.

Energia incorporada: energia consumida para construção, manutenção e demolição do edifício.

Energia operacional: energia utilizada por aparelhos e equipamentos vinculados à ocupação e uso do edifício, como a iluminação, a climatização e os aparelhos eletrodomésticos.

Energia primária: energia consumida pela fonte geradora de energia elétrica. Por exemplo, a energia mecânica das usinas hidroelétricas e eólicas.

Energia secundária: energia elétrica consumida pelas máquinas utilizadas na construção, pela iluminação, climatização, aparelhos eletrodomésticos, etc.

Fator de conversão *site-to-source*: razão entre a energia primária e a secundária. Representa o quanto se consome de energia da natureza para disponibilizá-la para consumo final.

Geração distribuída: geração de energia elétrica por fontes conectadas ao sistema de distribuição. No contexto deste trabalho, trata da geração no próprio edifício consumidor.

Inversor: dispositivo eletrônico que converte a corrente contínua produzida pelas células FV em corrente alternada compatível com o sistema público de distribuição de energia elétrica.

Módulo FV: unidade básica formada por um conjunto de células FV, interligadas eletricamente e encapsuladas, com o objetivo de gerar energia elétrica.

Módulo FV policristalino: tipo de módulo FV composto por células formadas a partir da fusão de diferentes cristais de silício.

Painel FV: um ou mais módulos fotovoltaicos interligados eletricamente, montados de modo a formar uma única estrutura.

Passive House (PH): conceito construtivo, desenvolvido na Alemanha, cujo objetivo é obter alto desempenho energético de edificações através de estratégias passivas referentes ao isolamento da envoltória, à redução de pontes térmicas e à estanqueidade.

Apêndices

Apêndice A – Cálculo de superfície homogênea equivalente, transmitâncias e capacidades térmicas da envoltória opaca

Os parâmetros térmicos das paredes e pré-laje dos modelos utilizados nesta pesquisa foram obtidos por equivalência entre a seção transversal heterogênea (real) e a homogênea (equivalente). O método segue aquele apresentado por Ordenes *et al.* (2003) e utiliza as equações e parâmetros de materiais da ABNT NBR 15220-2:2005 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005).

A.1 Paredes do modelo 1

Dimensões do tijolo: 9 cm x 19 cm x 19 cm.

$$\rho_{\text{cerâmica}} = 1600 \text{ kg/m}^3$$

$$\lambda_{\text{cerâmica}} = 0,9 \text{ W/(m.K)}$$

$$C_{\text{cerâmica}} = 0,92 \text{ kJ/(kg.K)}$$

$$\rho_{\text{argamassa}} = \rho_{\text{reboco}} = 2000 \text{ kg/m}^3$$

$$\lambda_{\text{argamassa}} = \lambda_{\text{reboco}} = 1,15 \text{ W/(m.K)}$$

$$C_{\text{argamassa}} = C_{\text{reboco}} = 1 \text{ kJ/(kg.K)}$$

$$R_{\text{ar}} = 0,16 \text{ m}^2.\text{K/W}$$

A Figura A.1 contém a representação e dimensões dessa seção de parede, e a Figura A.2 mostra a parede equivalente em camadas homogêneas.

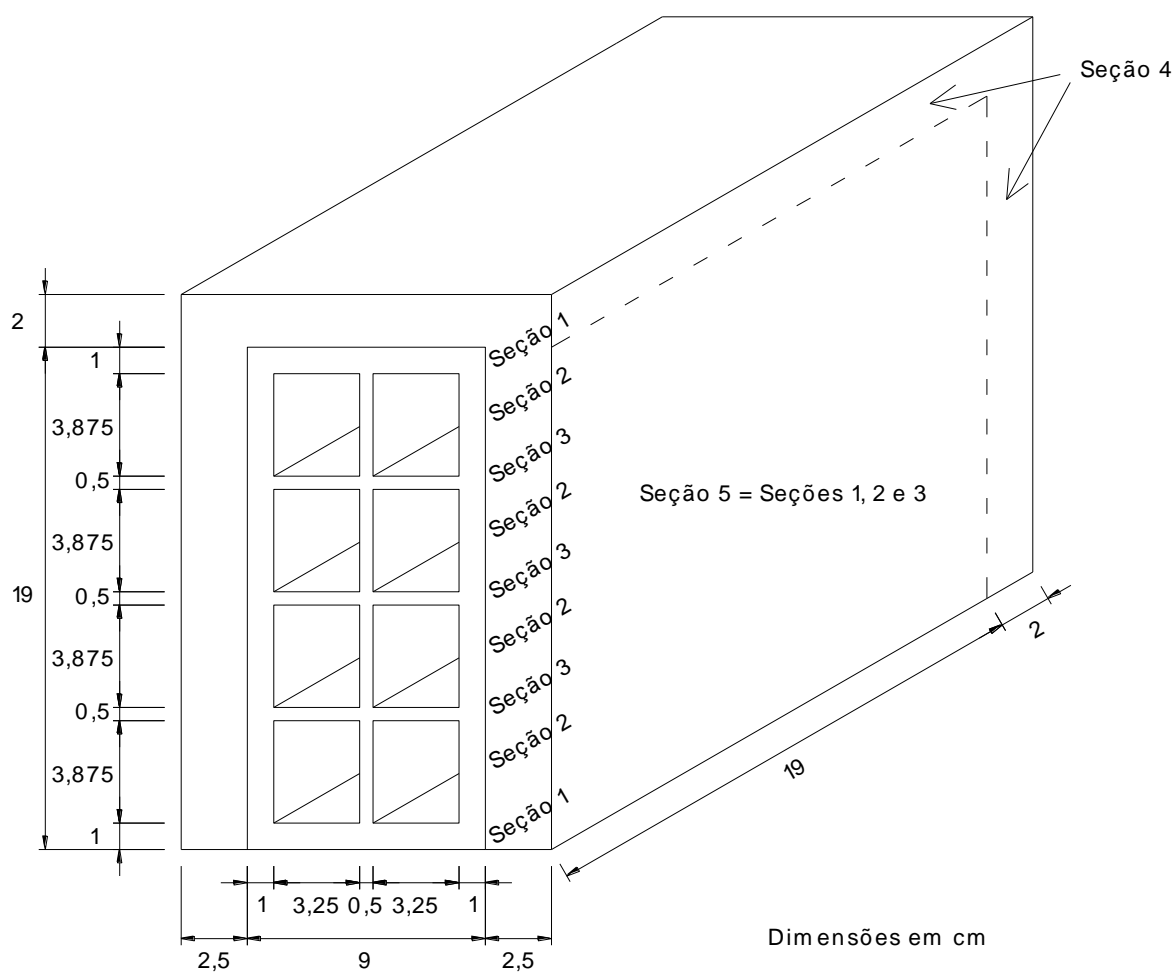


Figura A.1 – Desenho de corte de parede de tijolos cerâmicos rebocados em ambas as faces, utilizada no modelo 1. Vista em perspectiva com indicação das seções delimitadas para cálculo dos parâmetros térmicos.

Fonte: elaboração própria (2019).

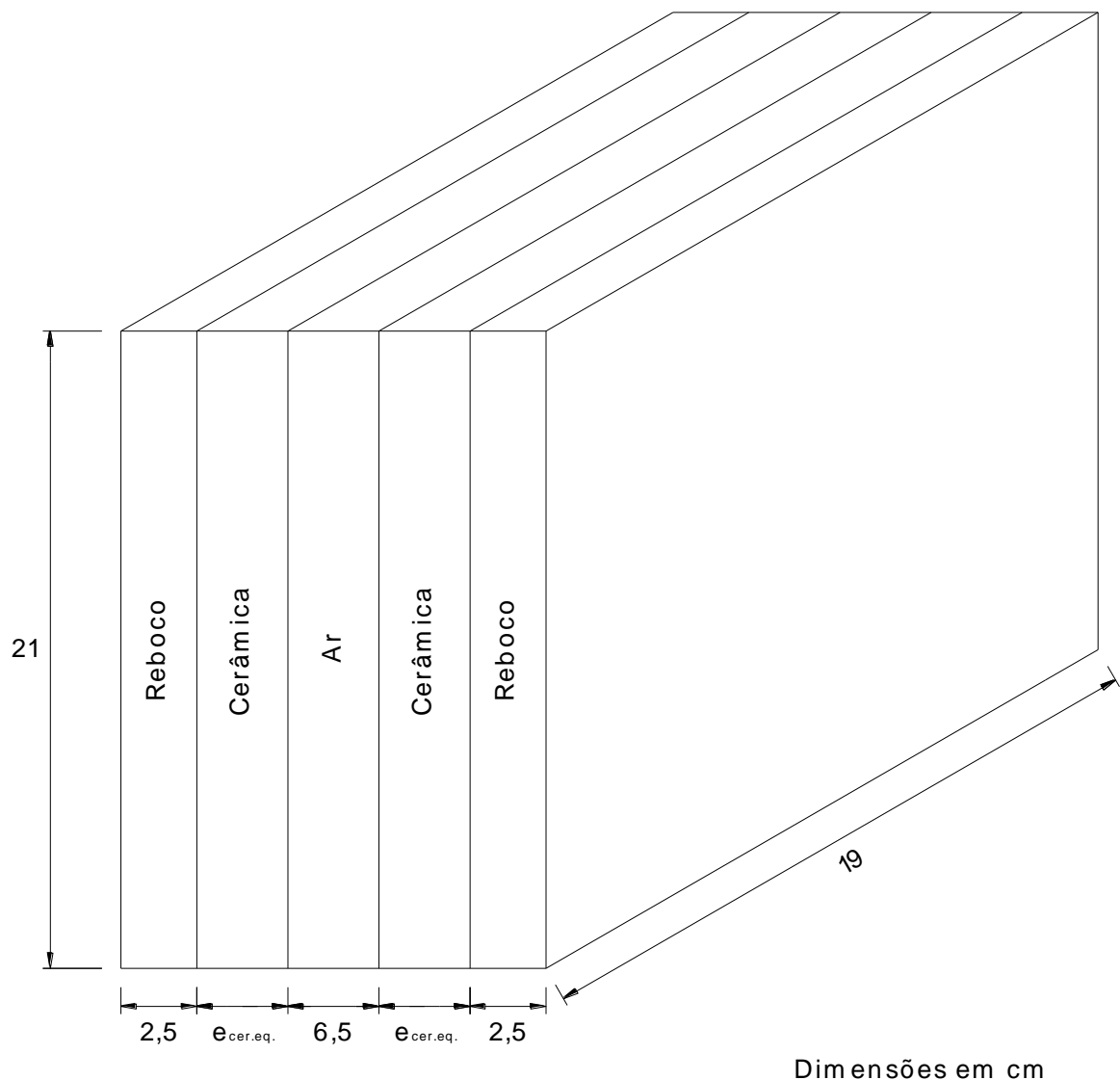


Figura A.2 – Desenho de corte de parede composta por camadas homogêneas, equivalente à da Figura A.1.

Fonte: elaboração própria (2019).

Seguem-se os cálculos para obtenção dos parâmetros equivalentes:

a) Resistência térmica do tijolo (R_{tijolo}):

Seção 1 (tijolo):

$$A_1 = 0,01 \times 0,19 = 0,0019 \text{ m}^2$$

$$R_1 = \frac{e_{\text{cerâmica}}}{\lambda_{\text{cerâmica}}} = \frac{0,09}{0,9} = 0,1 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

Seção 2 (cerâmica + câmara de ar + cerâmica + câmara de ar + cerâmica):

$$A_2 = 0,03875 \times 0,19 = 0,0073625 \text{ m}^2$$

$$R_2 = \frac{e_{\text{cerâmica}}}{\lambda_{\text{cerâmica}}} + R_{\text{ar}} + \frac{e_{\text{cerâmica}}}{\lambda_{\text{cerâmica}}} + R_{\text{ar}} + \frac{e_{\text{cerâmica}}}{\lambda_{\text{cerâmica}}}$$

$$R_2 = \frac{0,01}{0,9} + 0,16 + \frac{0,005}{0,9} + 0,16 + \frac{0,01}{0,9} = 0,3478 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

Seção 3 (cerâmica):

$$A_3 = 0,005 \times 0,19 = 0,00095 \text{ m}^2$$

$$R_3 = \frac{e_{\text{cerâmica}}}{\lambda_{\text{cerâmica}}} = \frac{0,09}{0,9} = 0,1 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

Portanto, a resistência do tijolo será:

$$R_{\text{tijolo}} = \frac{2xA_1 + 4xA_2 + 3xA_3}{\frac{2xA_1}{R_1} + \frac{4xA_2}{R_2} + \frac{3xA_3}{R_3}} = \frac{2 \times 0,0019 + 4 \times 0,0073625 + 3 \times 0,00095}{\frac{2 \times 0,0019}{0,1} + \frac{4 \times 0,0073625}{0,3478} + \frac{3 \times 0,00095}{0,1}} = \frac{0,0361}{0,1512}$$

$$R_{\text{tijolo}} = 0,2388 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

b) Resistência térmica da parede (R_t):

Seção 4 (reboco + argamassa + reboco):

$$A_4 = 0,02 \times 0,19 + 0,02 \times 0,21 = 0,008 \text{ m}^2$$

$$R_4 = \frac{e_{\text{reboco}}}{\lambda_{\text{reboco}}} + \frac{e_{\text{argamassa}}}{\lambda_{\text{argamassa}}} + \frac{e_{\text{reboco}}}{\lambda_{\text{reboco}}} = \frac{0,025}{1,15} + \frac{0,09}{1,15} + \frac{0,025}{1,15} = 0,1217 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

Seção 5 (reboco + tijolo + reboco):

$$A_5 = 0,19 \times 0,19 = 0,0361 \text{ m}^2$$

$$R_5 = \frac{e_{\text{reboco}}}{\lambda_{\text{reboco}}} + R_{\text{tijolo}} + \frac{e_{\text{reboco}}}{\lambda_{\text{reboco}}} = \frac{0,025}{1,15} + 0,2388 + \frac{0,025}{1,15} = 0,2823 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

Portanto, a resistência da parede será:

$$R_t = \frac{A_4 + A_5}{\frac{A_4}{R_4} + \frac{A_5}{R_5}} = \frac{0,008 + 0,0361}{\frac{0,008}{0,1217} + \frac{0,0361}{0,2823}} = \frac{0,0441}{0,1936} = 0,2278 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

c) Resistência térmica total:

$$R_T = R_{si} + R_t + R_{se} = 0,13 + 0,2278 + 0,04 = 0,3978 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

d) Transmitância térmica:

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{0,3978} = 2,51 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

e) Capacidade térmica da parede:

Seção 1 (reboco + cerâmica + reboco):

$$C_{T1} = \sum_{i=1}^3 e_i \cdot c_i \cdot \rho_i = (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{reboco}} + (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{cerâmica}} + (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{reboco}}$$

$$C_{T1} = 0,025 \times 1 \times 2000 + 0,09 \times 0,92 \times 1600 + 0,025 \times 1 \times 2000 = 232 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Seção 2 (reboco + cerâmica + câmara de ar + cerâmica + câmara de ar + cerâmica + reboco):

Desprezando-se as parcelas das câmaras de ar, devido à densidade muito baixa desse elemento, restam cinco parcelas.

$$C_{T2} = \sum_{i=1}^5 e_i \cdot c_i \cdot \rho_i$$

$$C_{T2} = (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{reboco}} + (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{cerâmica}} + (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{cerâmica}} + (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{cerâmica}} + (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{reboco}}$$

$$C_{T2} = 0,025 \times 1 \times 2000 + 0,01 \times 0,92 \times 1600 + 0,005 \times 0,92 \times 1600 + 0,01 \times 0,92 \times 1600 + 0,025 \times 1 \times 2000 = 137 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Seção 3 (reboco + cerâmica + reboco):

$$C_{T3} = \sum_{i=1}^3 e_i \cdot c_i \cdot \rho_i = (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{reboco}} + (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{cerâmica}} + (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{reboco}}$$

$$C_{T3} = 0,025 \times 1 \times 2000 + 0,09 \times 0,92 \times 1600 + 0,025 \times 1 \times 2000 = 232 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Seção 4 (reboco + argamassa + reboco):

$$C_{T4} = \sum_{i=1}^3 e_i \cdot c_i \cdot \rho_i = (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{reboco}} + (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{argamassa}} + (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{reboco}}$$

$$C_{T4} = 0,025 \times 1 \times 2000 + 0,09 \times 1 \times 2000 + 0,025 \times 1 \times 2000 = 280 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Portanto, a capacidade térmica da parede será:

$$C_T = \frac{2xA_1 + 4xA_2 + 3xA_3 + A_4}{\frac{2xA_1}{C_{T1}} + \frac{4xA_2}{C_{T2}} + \frac{3xA_3}{C_{T3}} + \frac{A_4}{C_{T4}}} = \frac{2 \times 0,0019 + 4 \times 0,0073625 + 3 \times 0,00095 + 0,008}{\frac{2 \times 0,0019}{232} + \frac{4 \times 0,0073625}{137} + \frac{3 \times 0,00095}{232} + \frac{0,008}{280}}$$

$$C_T = \frac{0,0441}{0,0002722} = 162 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

f) Cálculo da parede equivalente:

$$R_t = R_{eq} = R_{\text{reboco}} + R_{\text{cer.eq.}} + R_{\text{ar.eq.}} + R_{\text{cer.eq.}} + R_{\text{reboco}} = 2xR_{\text{reboco}} + 2xR_{\text{cer.eq.}} + R_{\text{ar.eq.}}$$

$$R_t = 2x \frac{e_{\text{reboco}}}{\lambda_{\text{reboco}}} + 2x \frac{e_{\text{cer.eq.}}}{\lambda_{\text{cerâmica}}} + R_{\text{ar.eq.}}$$

Como $R_t = 0,2278 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ e a câmara de ar adotada para a parede equivalente tem espessura superior a 5 cm, portanto $R_{\text{ar.eq.}} = 0,17 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005, p. 11):

$$0,2278 = 2x \frac{0,025}{1,15} + 2x \frac{e_{\text{cer.eq.}}}{0,9} + 0,17$$

$$0,2278 = 0,04348 + 2,2222 \times e_{\text{cer.eq.}} + 0,17$$

$$e_{\text{cer.eq.}} = 0,0064 \text{ m}$$

$$C_T = C_{eq} = C_{\text{reboco}} + C_{\text{cer.eq.}} + C_{\text{ar}} + C_{\text{cer.eq.}} + C_{\text{reboco}} = 2xC_{\text{reboco}} + 2xC_{\text{cer.eq.}} + C_{\text{ar}}$$

Desprezando-se novamente a capacidade térmica do ar:

$$C_T = 2x C_{\text{reboco}} + 2x C_{\text{cer.eq.}} = 2x(e.c.r)_{\text{reboco}} + 2x(e.c.r)_{\text{cer.eq.}}$$

Como $C_T = 162 \text{ kJ}/(\text{m}^2.\text{K})$ e $e_{\text{cer.eq.}} = 0,0064 \text{ m}$

$$162 = 2 \times 0,025 \times 1 \times 2000 + 2 \times 0,0064 \times 0,92 \times \rho_{\text{cer.eq.}}$$

$$162 = 100 + 0,01186 \times \rho_{\text{cer.eq.}}$$

$$\rho_{\text{cer.eq.}} = 5229 \text{ kg/m}^3$$

Os parâmetros a configurar no *EnergyPlus* para esta parede equivalente são, portanto:

- uma camada de reboco com 0,025 m de espessura e demais dados da ABNT NBR 15220-2:2005 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005);
- uma camada cerâmica com 0,0064 m de espessura, densidade de 5229 kg/m³ e demais dados da ABNT NBR 15220-2:2005 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005);
- uma camada de ar com resistência térmica de 0,17 m².K/W;
- uma camada cerâmica igual à anterior;
- uma camada de reboco igual à anterior.

Esses parâmetros foram transcritos para a Tabela 11.

A.2 Paredes externas do modelo 2

Dimensões do tijolo: 14 cm x 19 cm x 29 cm.

$$\rho_{\text{cerâmica}} = 1600 \text{ kg/m}^3$$

$$\lambda_{\text{cerâmica}} = 0,9 \text{ W}/(\text{m.K})$$

$$C_{\text{cerâmica}} = 0,92 \text{ kJ}/(\text{kg.K})$$

$$\rho_{\text{argamassa}} = \rho_{\text{reboco}} = 2000 \text{ kg/m}^3$$

$$\lambda_{\text{argamassa}} = \lambda_{\text{reboco}} = 1,15 \text{ W}/(\text{m.K})$$

$$C_{\text{argamassa}} = C_{\text{reboco}} = 1 \text{ kJ}/(\text{kg.K})$$

$$\rho_{\text{EPS}} = 35 \text{ kg/m}^3$$

$$\lambda_{\text{EPS}} = 0,04 \text{ W}/(\text{m.K})$$

$$C_{\text{EPS}} = 1,42 \text{ kJ}/(\text{kg.K})$$

$$R_{\text{ar}} = 0,16 \text{ m}^2.\text{K/W}$$

A Figura A.3 contém a representação e dimensões dessa seção de parede, e a Figura A.4 mostra a parede equivalente em camadas homogêneas.

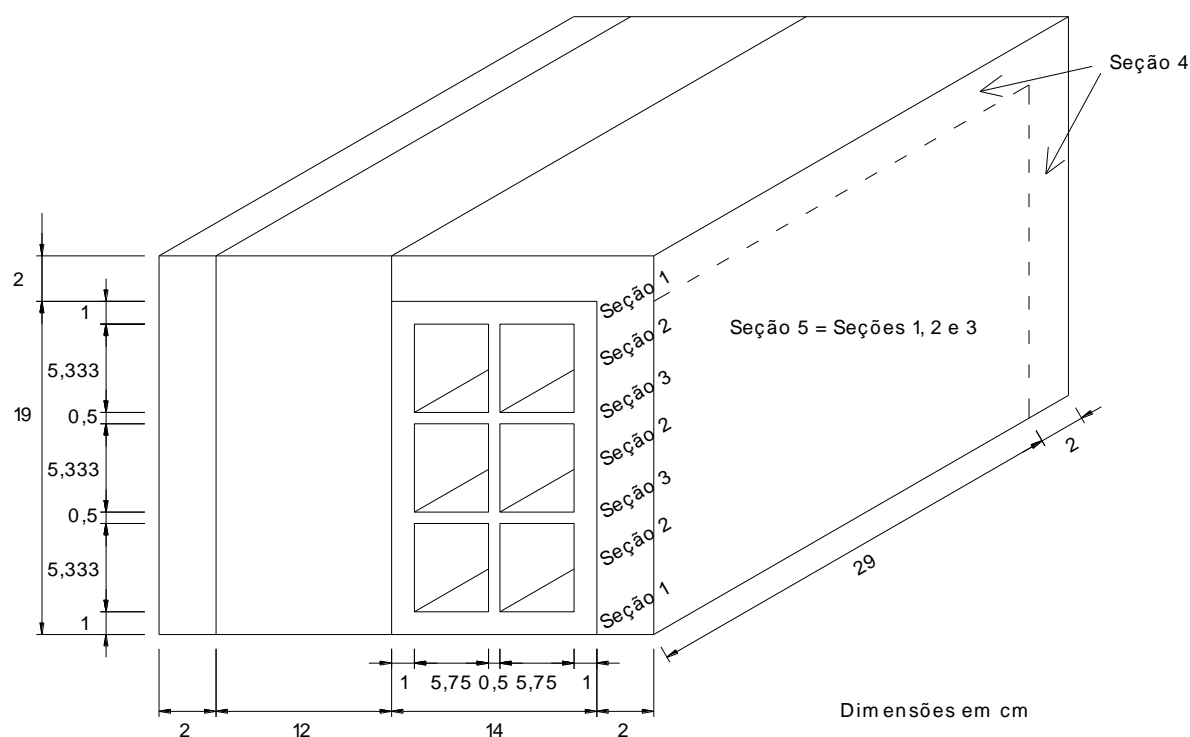


Figura A.3 – Desenho de corte de parede de tijolos cerâmicos e EPS, rebocados em ambas as faces, representando as paredes externas do modelo 2. Vista em perspectiva com indicação das seções delimitadas para cálculo dos parâmetros térmicos.

Fonte: elaboração própria (2019).

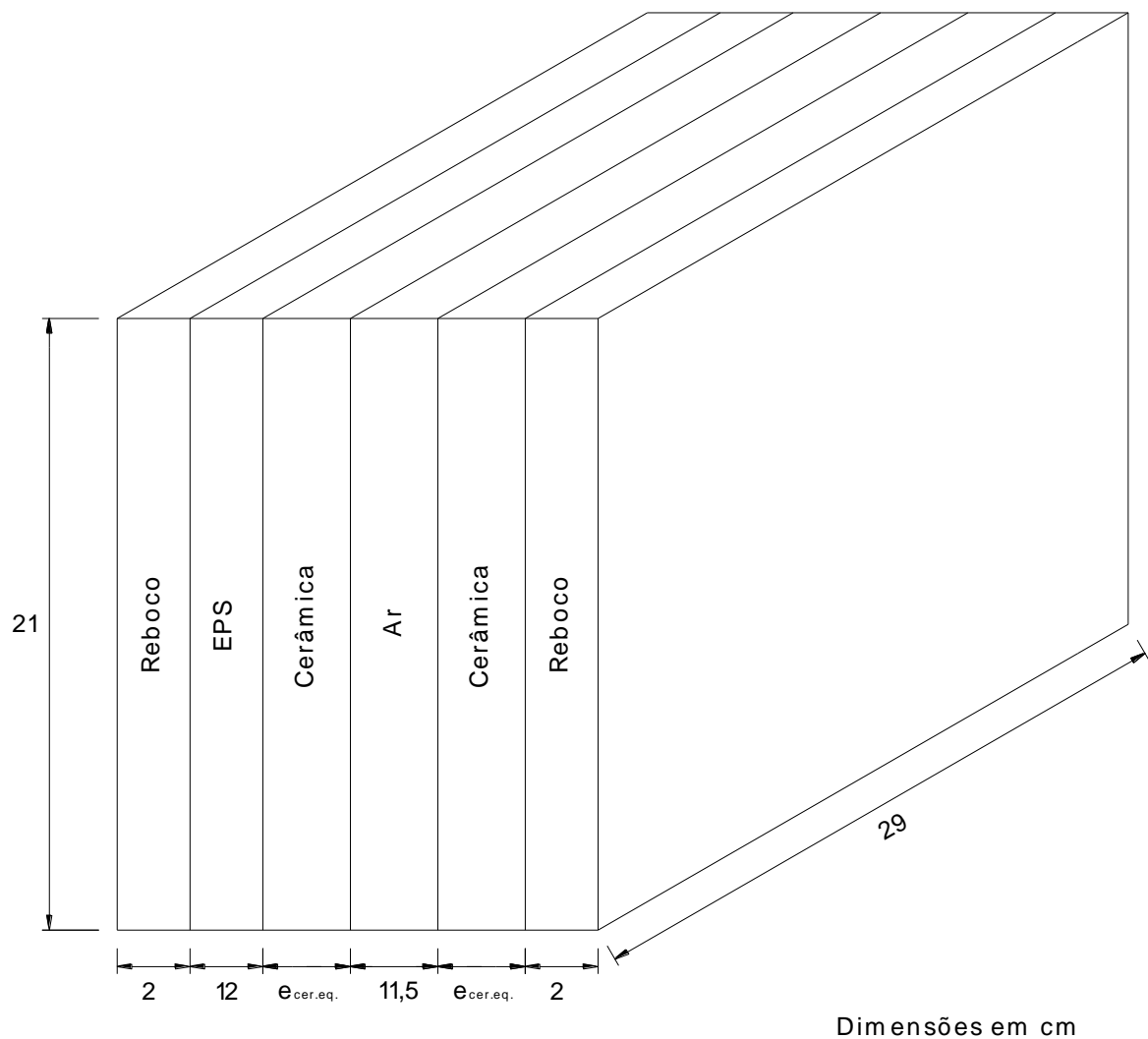


Figura A.4 – Desenho de corte de parede composta por camadas homogêneas, equivalente à da Figura A.3.

Fonte: elaboração própria (2019).

Seguem-se os cálculos para obtenção dos parâmetros equivalentes:

a) Resistência térmica do tijolo (R_{tijolo}):

Seção 1 (cerâmica):

$$A_1 = 0,01 \times 0,29 = 0,0029 \text{ m}^2$$

$$R_1 = \frac{e_{\text{cerâmica}}}{\lambda_{\text{cerâmica}}} = \frac{0,14}{0,9} = 0,1555 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

Seção 2 (cerâmica + câmara de ar + cerâmica + câmara de ar + cerâmica):

$$A_2 = 0,05333 \times 0,29 = 0,01547 \text{ m}^2$$

$$R_2 = \frac{e_{\text{cerâmica}}}{\lambda_{\text{cerâmica}}} + R_{\text{ar}} + \frac{e_{\text{cerâmica}}}{\lambda_{\text{cerâmica}}} + R_{\text{ar}} + \frac{e_{\text{cerâmica}}}{\lambda_{\text{cerâmica}}}$$

$$R_2 = \frac{0,01}{0,9} + 0,16 + \frac{0,005}{0,9} + 0,16 + \frac{0,01}{0,9} = 0,3478 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

Seção 3 (cerâmica):

$$A_3 = 0,005 \times 0,29 = 0,00145 \text{ m}^2$$

$$R_3 = \frac{e_{\text{cerâmica}}}{\lambda_{\text{cerâmica}}} = \frac{0,14}{0,9} = 0,1555 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

Portanto, a resistência do tijolo será:

$$R_{\text{tijolo}} = \frac{2xA_1 + 3xA_2 + 2xA_3}{\frac{2xA_1}{R_1} + \frac{3xA_2}{R_2} + \frac{2xA_3}{R_3}} = \frac{2 \times 0,0029 + 3 \times 0,0112375 + 2 \times 0,00145}{\frac{2 \times 0,0029}{0,1555} + \frac{3 \times 0,0112375}{0,3478} + \frac{2 \times 0,00145}{0,1555}} = \frac{0,0424}{0,1529}$$

$$R_{\text{tijolo}} = 0,2773 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

b) Resistência térmica da parede (R_t):

Seção 4 (reboco + argamassa + EPS + reboco):

$$A_4 = 0,02 \times 0,29 + 0,02 \times 0,21 = 0,01 \text{ m}^2$$

$$R_4 = \frac{e_{\text{reboco}}}{\lambda_{\text{reboco}}} + \frac{e_{\text{argamassa}}}{\lambda_{\text{argamassa}}} + \frac{e_{\text{EPS}}}{\lambda_{\text{EPS}}} + \frac{e_{\text{reboco}}}{\lambda_{\text{reboco}}} = \frac{0,02}{1,15} + \frac{0,14}{1,15} + \frac{0,12}{0,04} + \frac{0,02}{1,15} = 3,1565 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

Seção 5 (reboco + tijolo + EPS + reboco):

$$A_5 = 0,19 \times 0,29 = 0,0551 \text{ m}^2$$

$$R_5 = \frac{e_{\text{reboco}}}{\lambda_{\text{reboco}}} + R_{\text{tijolo}} + \frac{e_{\text{EPS}}}{\lambda_{\text{EPS}}} + \frac{e_{\text{reboco}}}{\lambda_{\text{reboco}}} = \frac{0,02}{1,15} + 0,2773 + \frac{0,12}{0,04} + \frac{0,02}{1,15} = 3,3121 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

Portanto, a resistência da parede será:

$$R_t = \frac{A_4 + A_5}{\frac{A_4}{R_4} + \frac{A_5}{R_5}} = \frac{0,01 + 0,0551}{\frac{0,01}{3,1565} + \frac{0,0551}{3,3121}} = \frac{0,0651}{0,0198} = 3,2872 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

c) Resistência térmica total:

$$R_T = R_{\text{si}} + R_t + R_{\text{se}} = 0,13 + 3,2872 + 0,04 = 3,4572 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

d) Transmitância térmica:

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{3,4572} = 0,29 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

e) Capacidade térmica da parede:

Seção 1 (reboco + cerâmica + EPS + reboco):

$$C_{T1} = \sum_{i=1}^4 e_i \cdot c_i \cdot \rho_i = (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{reboco}} + (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{cerâmica}} + (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{EPS}} + (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{reboco}}$$

$$C_{T1} = 0,02 \times 1 \times 2000 + 0,14 \times 0,92 \times 1600 + 0,12 \times 1,42 \times 35 + 0,02 \times 1 \times 2000$$

$$C_{T1} = 292 \text{ kJ/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

Seção 2 (reboco + cerâmica + câmara de ar + cerâmica + câmara de ar + cerâmica)

+ EPS + reboco):

Desprezando-se as parcelas das câmaras de ar, devido à densidade muito baixa desse elemento, restam seis parcelas.

$$C_{T2} = \sum_{i=1}^6 e_i \cdot c_i \cdot \rho_i$$

$$C_{T2} = (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{reboco}} + (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{cerâmica}} + (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{cerâmica}} + (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{cerâmica}} + (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{EPS}} + (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{reboco}}$$

$$C_{T2} = 0,02 \times 1 \times 2000 + 0,01 \times 0,92 \times 1600 + 0,005 \times 0,92 \times 1600 + 0,01 \times 0,92 \times 1600 + 0,12 \times 1,42 \times 35 + 0,02 \times 1 \times 2000 = 123 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Seção 3 (reboco + cerâmica + EPS + reboco):

$$C_{T3} = \sum_{i=1}^4 e_i \cdot c_i \cdot \rho_i = (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{reboco}} + (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{cerâmica}} + (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{EPS}} + (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{reboco}}$$

$$C_{T3} = 0,02 \times 1 \times 2000 + 0,14 \times 0,92 \times 1600 + 0,12 \times 1,42 \times 35 + 0,02 \times 1 \times 2000 = 292 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Seção 4 (reboco + argamassa + EPS + reboco):

$$C_{T4} = \sum_{i=1}^4 e_i \cdot c_i \cdot \rho_i = (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{reboco}} + (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{argamassa}} + (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{EPS}} + (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{reboco}}$$

$$C_{T4} = 0,02 \times 1 \times 2000 + 0,14 \times 1 \times 2000 + 0,12 \times 1,42 \times 35 + 0,02 \times 1 \times 2000 = 366 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Portanto, a capacidade térmica da parede será:

$$C_T = \frac{2xA_1 + 3xA_2 + 2xA_3 + A_4}{\frac{2xA_1}{C_{T1}} + \frac{3xA_2}{C_{T2}} + \frac{2xA_3}{C_{T3}} + \frac{A_4}{C_{T4}}} = \frac{2 \times 0,0029 + 3 \times 0,01547 + 2 \times 0,00145 + 0,01}{\frac{2 \times 0,0029}{292} + \frac{3 \times 0,01547}{123} + \frac{2 \times 0,00145}{292} + \frac{0,01}{366}}$$

$$C_T = \frac{0,06511}{0,000434} = 150 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

f) Cálculo da parede equivalente:

$$R_t = R_{eq} = R_{\text{reboco}} + R_{\text{EPS}} + R_{\text{cer.eq.}} + R_{\text{ar.eq.}} + R_{\text{cer.eq.}} + R_{\text{reboco}} = 2 \times R_{\text{reboco}} + R_{\text{EPS}} + 2 \times R_{\text{cer.eq.}} + R_{\text{ar.eq.}}$$

$$R_t = 2 \times \frac{e_{\text{reboco}}}{\lambda_{\text{reboco}}} + \frac{e_{\text{EPS}}}{\lambda_{\text{EPS}}} + 2 \times \frac{e_{\text{cer.eq.}}}{\lambda_{\text{cerâmica}}} + R_{\text{ar.eq.}}$$

Como $R_t = 3,2872 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ e a câmara de ar adotada para a parede equivalente tem espessura superior a 5 cm, portanto $R_{\text{ar.eq.}} = 0,17 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005, p. 11):

$$3,2872 = 2x \frac{0,02}{1,15} + \frac{0,12}{0,04} + 2x \frac{e_{cer.eq.}}{0,9} + 0,17$$

$$3,2872 = 0,03478 + 3 + 2,2222 \times e_{cer.eq.} + 0,17$$

$$e_{cer.eq.} = 0,037 \text{ m}$$

$$C_T = C_{eq} = C_{reboco} + C_{EPS} + C_{cer.eq.} + C_{ar.eq.} + C_{cer.eq.} + C_{reboco} = 2xC_{reboco} + C_{EPS} + 2xC_{cer.eq.} + C_{ar.eq.}$$

Desprezando-se novamente a capacidade térmica do ar:

$$C_T = 2xC_{reboco} + C_{EPS} + 2xC_{cer.eq.} = 2x(e.c.r)_{reboco} + C_{EPS} + 2x(e.c.r)_{cer.eq.}$$

Como $C_T = 150 \text{ kJ}/(\text{m}^2.\text{K})$ e $e_{cer.eq.} = 0,037 \text{ m}$

$$150 = 2 \times 0,02 \times 1 \times 2000 + 0,12 \times 1,42 \times 35 + 2 \times 0,037 \times 0,92 \times \rho_{cer.eq.}$$

$$150 = 80 + 5,964 + 0,0682 \times \rho_{cer.eq.}$$

$$\rho_{cer.eq.} = 941 \text{ kg/m}^3$$

Os parâmetros a configurar no *EnergyPlus* para esta parede equivalente são, portanto:

- uma camada de reboco com 0,02 m de espessura e demais dados da ABNT NBR 15220-2:2005 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005);
- uma camada de EPS com 0,12 m de espessura e demais dados da ABNT NBR 15220-2:2005 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005);
- uma camada cerâmica com 0,037 m de espessura, densidade de 941 kg/m³ e demais dados da ABNT NBR 15220-2:2005 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005);
- uma camada de ar com resistência térmica de 0,17 m².K/W;
- uma camada cerâmica igual à anterior;
- uma camada de reboco igual à anterior.

Esses parâmetros foram transcritos para a Tabela 12.

A.3 Paredes internas do modelo 2

Dimensões do tijolo: 5,3 cm x 11 cm x 24 cm.

$$\rho_{cerâmica} = 1600 \text{ kg/m}^3$$

$$\lambda_{cerâmica} = 0,9 \text{ W}/(\text{m.K})$$

$$C_{cerâmica} = 0,92 \text{ kJ}/(\text{kg.K})$$

$$\rho_{argamassa} = \rho_{reboco} = 2000 \text{ kg/m}^3$$

$$\lambda_{argamassa} = \lambda_{reboco} = 1,15 \text{ W}/(\text{m.K})$$

$$C_{\text{argamassa}} = C_{\text{reboco}} = 1 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

$$R_{\text{ar}} = 0,16 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$$

A Figura A.5 contém a representação e dimensões dessa seção de parede, e a Figura A.6 mostra a parede equivalente em camadas homogêneas.

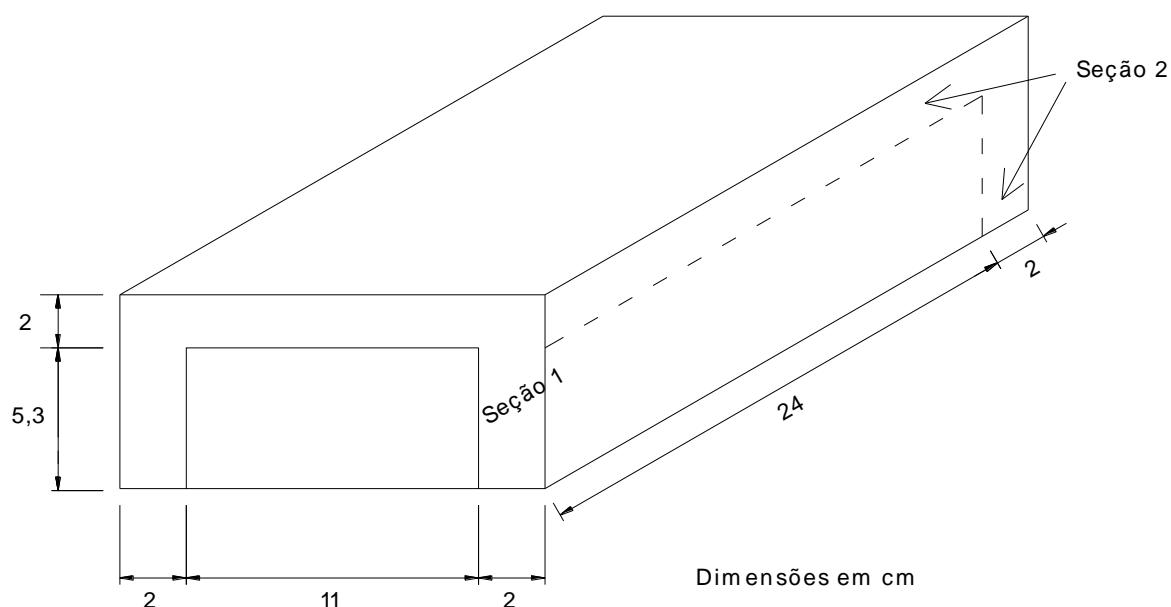


Figura A.5 – Desenho de corte de parede de tijolos cerâmicos rebocados em ambas as faces, utilizada nas paredes internas do modelo 2. Vista em perspectiva com indicação das seções delimitadas para cálculo dos parâmetros térmicos.

Fonte: elaboração própria (2019).

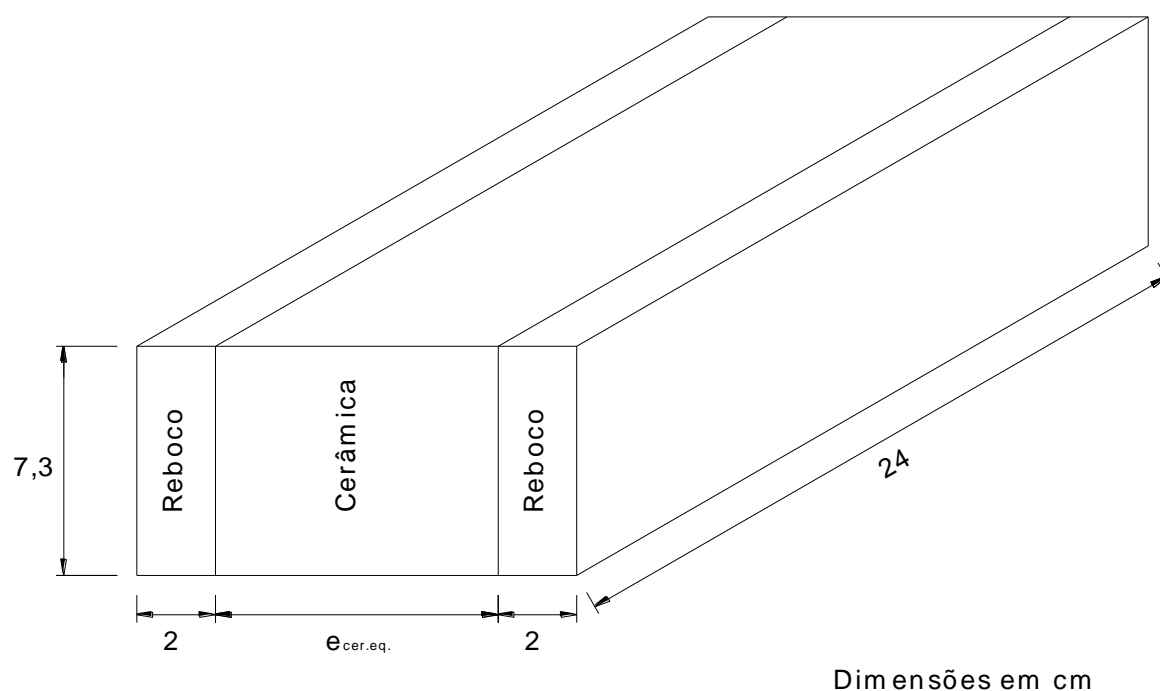


Figura A.6 – Desenho de corte de parede composta por camadas homogêneas, equivalente à da Figura A.5.

Fonte: elaboração própria (2019).

Seguem-se os cálculos para obtenção dos parâmetros equivalentes:

a) Resistência térmica da parede (R_t):

Seção 1 (reboco + tijolo + reboco):

$$A_1 = 0,053 \times 0,24 = 0,01272 \text{ m}^2$$

$$R_1 = \frac{e_{\text{reboco}}}{\lambda_{\text{reboco}}} + \frac{e_{\text{cerâmica}}}{\lambda_{\text{cerâmica}}} + \frac{e_{\text{reboco}}}{\lambda_{\text{reboco}}} = \frac{0,02}{1,15} + \frac{0,11}{0,9} + \frac{0,02}{1,15} = 0,157 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

Seção 2 (reboco + argamassa + reboco):

$$A_2 = 0,02 \times 0,24 + 0,02 \times 0,073 = 0,00626 \text{ m}^2$$

$$R_2 = \frac{e_{\text{reboco}}}{\lambda_{\text{reboco}}} + \frac{e_{\text{argamassa}}}{\lambda_{\text{argamassa}}} + \frac{e_{\text{reboco}}}{\lambda_{\text{reboco}}} = \frac{0,02}{1,15} + \frac{0,11}{1,15} + \frac{0,02}{1,15} = 0,1304 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

Portanto, a resistência da parede será:

$$R_t = \frac{A_1 + A_2}{\frac{A_1}{R_1} + \frac{A_2}{R_2}} = \frac{0,01272 + 0,00626}{\frac{0,01272}{0,157} + \frac{0,00626}{0,1304}} = \frac{0,01898}{0,129} = 0,1471 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

b) Resistência térmica total:

$$R_T = R_{si} + R_t + R_{se} = 0,13 + 0,1471 + 0,04 = 0,3171 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

c) Transmitância térmica:

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{0,3171} = 3,15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

d) Capacidade térmica da parede:

Seção 1 (reboco + tijolo + reboco):

$$C_{T1} = \sum_{i=1}^3 e_i \cdot c_i \cdot \rho_i = (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{reboco}} + (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{cerâmica}} + (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{reboco}}$$

$$C_{T1} = 0,02 \times 1 \times 2000 + 0,11 \times 0,92 \times 1600 + 0,02 \times 1 \times 2000 = 242 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Seção 2 (reboco + argamassa + reboco):

$$C_{T2} = \sum_{i=1}^3 e_i \cdot c_i \cdot \rho_i = (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{reboco}} + (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{argamassa}} + (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{reboco}}$$

$$C_{T2} = 0,02 \times 1 \times 2000 + 0,11 \times 1 \times 2000 + 0,02 \times 1 \times 2000 = 300 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Portanto, a capacidade térmica da parede será:

$$C_T = \frac{A_1 + A_2}{\frac{A_1}{C_{T1}} + \frac{A_2}{C_{T2}}} = \frac{0,01272 + 0,00626}{\frac{0,01272}{242} + \frac{0,00626}{300}} = \frac{0,01898}{0,00007343} = 258 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

e) Cálculo da parede equivalente:

$$R_t = R_{eq} = R_{\text{reboco}} + R_{\text{cer.eq.}} + R_{\text{reboco}} = 2 \times R_{\text{reboco}} + R_{\text{cer.eq.}}$$

$$R_t = 2x \frac{e_{\text{reboco}}}{\lambda_{\text{reboco}}} + \frac{e_{\text{cer.eq.}}}{\lambda_{\text{cerâmica}}}$$

$$\text{Como } R_t = 0,1471 \text{ m}^2.\text{K/W}$$

$$0,1471 = 2x \frac{0,02}{1,15} + \frac{e_{\text{cer.eq.}}}{0,9}$$

$$0,1471 = 0,03478 + 1,1111 \times e_{\text{cer.eq.}}$$

$$e_{\text{cer.eq.}} = 0,101 \text{ m}$$

$$C_T = C_{\text{eq}} = C_{\text{reboco}} + C_{\text{cer.eq.}} + C_{\text{reboco}} = 2x C_{\text{reboco}} + C_{\text{cer.eq.}}$$

$$C_T = 2x(e.c.r)_{\text{reboco}} + (e.c.r)_{\text{cer.eq.}}$$

$$\text{Como } C_t = 258 \text{ kJ}/(\text{m}^2.\text{K}) \text{ e } e_{\text{cer.eq.}} = 0,101 \text{ m}$$

$$258 = 2 \times 0,02 \times 1 \times 2000 + 0,101 \times 0,92 \times \rho_{\text{cer.eq.}}$$

$$258 = 80 + 0,09292 \times \rho_{\text{cer.eq.}}$$

$$\rho_{\text{cer.eq.}} = 1916 \text{ kg/m}^3$$

Os parâmetros a configurar no *EnergyPlus* para esta parede equivalente são, portanto:

- uma camada de reboco com 0,02 m de espessura e demais dados da ABNT NBR 15220-2:2005 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005);
- uma camada cerâmica com 0,101 m de espessura, densidade de 1916 kg/m³ e demais dados da ABNT NBR 15220-2:2005 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005);
- uma camada de reboco igual à anterior.

Esses parâmetros foram transcritos para a Tabela 12.

A.4 Pré-laje do modelo 1

Dimensões da vigota: 10 cm (largura) x 9 cm (altura).

Dimensões do bloco cerâmico 8 furos: 19 cm x 9 cm x 30 cm.

$$\rho_{\text{concreto}} = 2200 \text{ kg/m}^3$$

$$\lambda_{\text{concreto}} = 1,75 \text{ W}/(\text{m.K})$$

$$C_{\text{concreto}} = 1 \text{ kJ}/(\text{kg.K})$$

$$\rho_{\text{cerâmica}} = 1600 \text{ kg/m}^3$$

$$\lambda_{\text{cerâmica}} = 0,9 \text{ W}/(\text{m.K})$$

$$C_{\text{cerâmica}} = 0,92 \text{ kJ}/(\text{kg.K})$$

$$\rho_{\text{reboco}} = 2000 \text{ kg/m}^3$$

$$\lambda_{\text{reboco}} = 1,15 \text{ W/(m.K)}$$

$$C_{\text{reboco}} = 1 \text{ kJ/(kg.K)}$$

$$R_{\text{ar}} = 0,14 \text{ m}^2.\text{K/W} \text{ (ascendente)}$$

$$R_{\text{ar}} = 0,21 \text{ m}^2.\text{K/W} \text{ (descendente)}$$

A Figura A.7 contém a representação e dimensões dessa seção de laje, a Figura A.8 é a representação simplificada adotada para o cálculo e a Figura A.9 mostra a laje equivalente em camadas homogêneas. O telhado e a câmara de ar entre ele e a laje somente entram no cálculo de transmitância e capacidade térmica da cobertura.

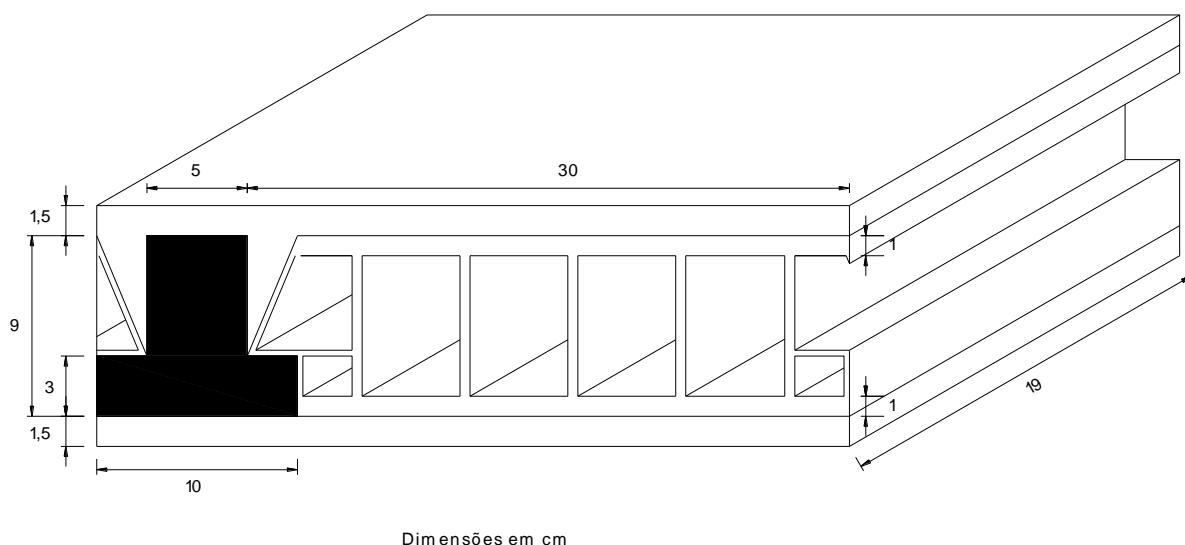


Figura A.7 – Desenho de corte de laje de concreto pré-fabricado com blocos cerâmicos, rebocada em ambas as faces, utilizada no modelo 1. Vista em perspectiva com formato original dos elementos.
Fonte: elaboração própria (2019).

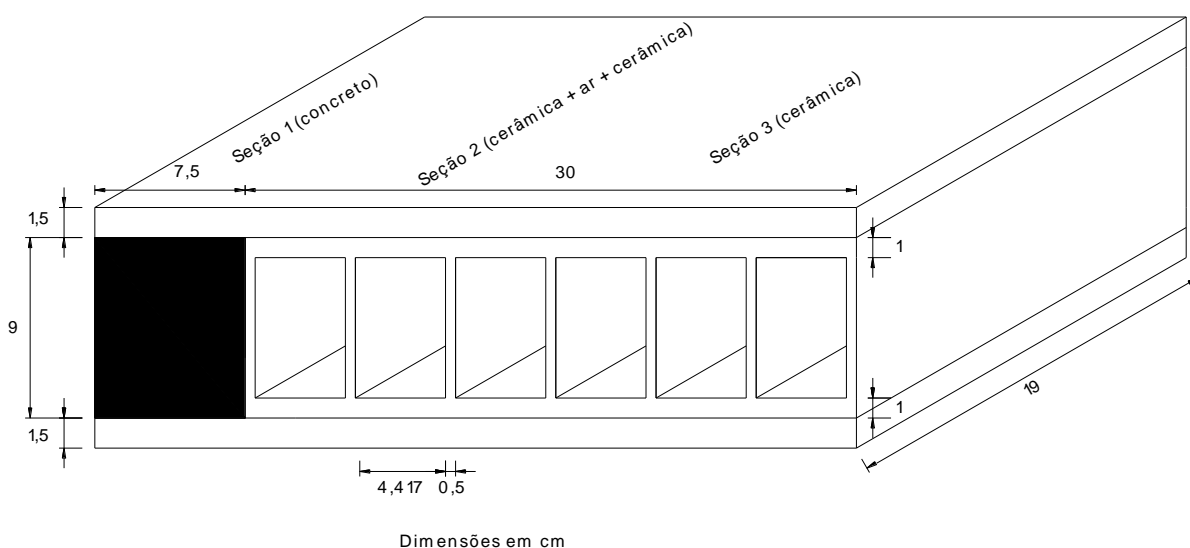


Figura A.8 – Laje de concreto pré-fabricado com blocos cerâmicos, rebocada em ambas as faces, utilizada no modelo 1. Vista em perspectiva com formato simplificado e indicação das seções delimitadas para cálculo dos parâmetros térmicos.
Fonte: elaboração própria (2019).

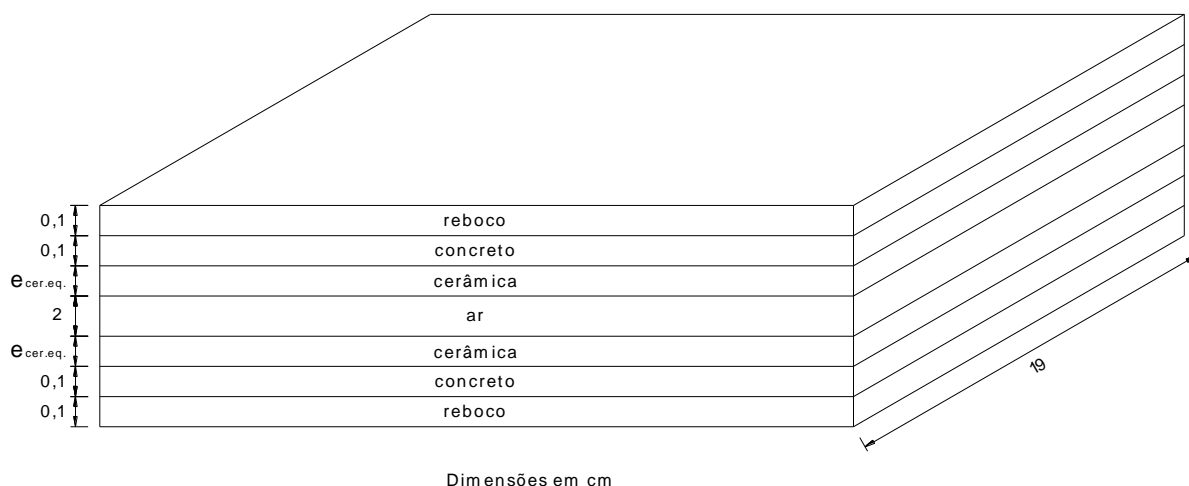


Figura A.9 – Laje composta por camadas homogêneas, equivalente à da Figura A.8.
Fonte: elaboração própria (2019).

O formato irregular da vigota (“T” invertido) e dos apoios do bloco foi simplificado de forma a considerar o concreto com seção retangular de 7,5 cm de largura por 9 cm de altura e o bloco composto por 6 furos iguais.

Seguem-se os cálculos para obtenção dos parâmetros equivalentes:

a) Resistência térmica da laje (R_{laje}):

Seção 1 (concreto):

$$A_1 = 0,075 \times 0,19 = 0,01425 \text{ m}^2$$

$$R_1 = \frac{e_{\text{concreto}}}{\lambda_{\text{concreto}}} = \frac{0,09}{1,75} = 0,0514 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

Seção 2 (cerâmica + câmara de ar + cerâmica):

$$A_2 = 0,04417 \times 0,19 = 0,0083923 \text{ m}^2$$

- condição de inverno:

$$R_{2(\text{inverno})} = \frac{e_{\text{cerâmica}}}{\lambda_{\text{cerâmica}}} + R_{\text{ar(ascendente)}} + \frac{e_{\text{cerâmica}}}{\lambda_{\text{cerâmica}}}$$

$$R_{2(\text{inverno})} = \frac{0,01}{0,9} + 0,14 + \frac{0,01}{0,9} = 0,1622 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

- condição de verão:

$$R_{2(\text{verão})} = \frac{e_{\text{cerâmica}}}{\lambda_{\text{cerâmica}}} + R_{\text{ar(descendente)}} + \frac{e_{\text{cerâmica}}}{\lambda_{\text{cerâmica}}}$$

$$R_{2(\text{verão})} = \frac{0,01}{0,9} + 0,21 + \frac{0,01}{0,9} = 0,2322 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

Seção 3 (cerâmica):

$$A_3 = 0,005 \times 0,19 = 0,00095 \text{ m}^2$$

$$R_3 = \frac{e_{\text{cerâmica}}}{\lambda_{\text{cerâmica}}} = \frac{0,09}{0,9} = 0,1 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

Portanto, a resistência da laje será:

- condição de inverno:

$$R_{\text{laje(inverno)}} = \frac{A_1 + 6xA_2 + 7xA_3}{\frac{A_1}{R_1} + \frac{6xA_2}{R_{2(\text{inverno})}} + \frac{7xA_3}{R_3}} = \frac{0,01425 + 6 \times 0,0083923 + 7 \times 0,00095}{\frac{0,01425}{0,0514} + \frac{6 \times 0,0083923}{0,1622} + \frac{7 \times 0,00095}{0,1}}$$

$$R_{\text{laje(inverno)}} = \frac{0,07125}{0,65418} = 0,1089 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

- condição de verão:

$$R_{\text{laje(verão)}} = \frac{A_1 + 6xA_2 + 7xA_3}{\frac{A_1}{R_1} + \frac{6xA_2}{R_{2(\text{verão})}} + \frac{7xA_3}{R_3}} = \frac{0,01425 + 6 \times 0,0083923 + 7 \times 0,00095}{\frac{0,01425}{0,0514} + \frac{6 \times 0,0083923}{0,2322} + \frac{7 \times 0,00095}{0,1}}$$

$$R_{\text{laje(verão)}} = \frac{0,07125}{0,56059} = 0,1271 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

b) Resistência térmica da cobertura laje + rebocos + ar + telhado (R_t):

- condição de inverno:

$$R_{t(\text{inverno})} = \frac{e_{\text{reboco}}}{\lambda_{\text{reboco}}} + R_{\text{laje(inverno)}} + \frac{e_{\text{reboco}}}{\lambda_{\text{reboco}}} + R_{\text{ar(ascendente)}} + \frac{e_{\text{fibrocimento}}}{\lambda_{\text{fibrocimento}}}$$

$$R_{t(\text{inverno})} = \frac{0,015}{1,15} + 0,1089 + \frac{0,015}{1,15} + 0,14 + \frac{0,006}{0,65}$$

$$R_{t(\text{inverno})} = 0,2842 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

- condição de verão:

$$R_{t(\text{verão})} = \frac{e_{\text{reboco}}}{\lambda_{\text{reboco}}} + R_{\text{laje(verão)}} + \frac{e_{\text{reboco}}}{\lambda_{\text{reboco}}} + R_{\text{ar(descendente)}} + \frac{e_{\text{fibrocimento}}}{\lambda_{\text{fibrocimento}}}$$

$$R_{t(\text{verão})} = \frac{0,015}{1,15} + 0,1271 + \frac{0,015}{1,15} + 0,21 + \frac{0,006}{0,65}$$

$$R_{t(\text{verão})} = 0,3724 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

c) Resistência térmica total:

- condição de inverno:

$$R_{T(\text{inverno})} = R_{\text{si(ascendente)}} + R_{t(\text{inverno})} + R_{\text{se(ascendente)}}$$

$$R_{T(\text{inverno})} = 0,1 + 0,2842 + 0,04 = 0,4242 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

- condição de verão:

$$R_{T(\text{verão})} = R_{\text{si(descendente)}} + R_{t(\text{verão})} + R_{\text{se(descendente)}}$$

$$R_{T(\text{verão})} = 0,17 + 0,3724 + 0,04 = 0,5824 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

d) Transmitância térmica:

- condição de inverno:

$$U_{\text{inverno}} = \frac{1}{R_{T(\text{inverno})}} = \frac{1}{0,4242} = 2,36 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

- condição de verão:

$$U_{\text{verão}} = \frac{1}{R_{T(\text{verão})}} = \frac{1}{0,5824} = 1,72 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

e) Capacidade térmica do conjunto da laje:

Seção 1 (reboco + concreto + reboco):

$$C_{T1} = \sum_{i=1}^3 e_i \cdot c_i \cdot \rho_i = (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{reboco}} + (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{concreto}} + (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{reboco}}$$

$$C_{T1} = 0,015 \times 1 \times 2000 + 0,09 \times 1 \times 2200 + 0,015 \times 1 \times 2000 = 258 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Seção 2 (reboco + cerâmica + câmara de ar + cerâmica + reboco):

Desprezando-se a parcela da câmara de ar, devido à densidade muito baixa desse elemento, restam quatro parcelas.

$$C_{T2} = \sum_{i=1}^4 e_i \cdot c_i \cdot \rho_i$$

$$C_{T2} = (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{reboco}} + (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{cerâmica}} + (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{cerâmica}} + (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{reboco}}$$

$$C_{T2} = 0,015 \times 1 \times 2000 + 0,01 \times 0,92 \times 1600 + 0,01 \times 0,92 \times 1600 + 0,015 \times 1 \times 2000 = 89 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Seção 3 (reboco + cerâmica + reboco):

$$C_{T3} = \sum_{i=1}^3 e_i \cdot c_i \cdot \rho_i = (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{reboco}} + (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{cerâmica}} + (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{reboco}}$$

$$C_{T3} = 0,015 \times 1 \times 2000 + 0,09 \times 0,92 \times 1600 + 0,015 \times 1 \times 2000 = 192 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Portanto, a capacidade térmica do conjunto será:

$$C_t = \frac{A_1 + 6xA_2 + 7xA_3}{\frac{A_1}{C_{T1}} + \frac{6xA_2}{C_{T2}} + \frac{7xA_3}{C_{T3}}} = \frac{0,01425 + 6 \times 0,0083923 + 7 \times 0,00095}{\frac{0,01425}{258} + \frac{6 \times 0,0083923}{89} + \frac{7 \times 0,00095}{192}}$$

$$C_t = \frac{0,07125}{0,0006556} = 109 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

f) Capacidade térmica da cobertura laje + rebocos + telhado (desprezando a câmara de ar):

$$C_T = C_t + (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{fibrocimento}} = 109 + 0,006 \times 0,84 \times 1700 = 118 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

g) Cálculo do conjunto equivalente laje + rebocos:

$$R_t = R_{eq} = R_{\text{reboco.eq.}} + R_{\text{concr.eq.}} + R_{\text{cer.eq.}} + R_{\text{ar.eq.}} + R_{\text{cer.eq.}} + R_{\text{concr.eq.}} + R_{\text{reboco.eq.}}$$

$$R_t = 2 \times R_{\text{reboco.eq.}} + 2 \times R_{\text{cer.eq.}} + 2 \times R_{\text{concr.eq.}} + R_{\text{ar}}$$

$$R_t = 2x \frac{e_{\text{reboco.eq.}}}{\lambda_{\text{reboco}}} + 2x \frac{e_{\text{cer.eq.}}}{\lambda_{\text{cerâmica}}} + 2x \frac{e_{\text{concr.eq.}}}{\lambda_{\text{concreto}}} + R_{\text{ar}}$$

- condição de inverno:

Como $R_{t(\text{inverno})} = 0,135 \text{ m}^2.\text{K/W}$

$$0,135 = 2x \frac{0,001}{1,15} + 2x \frac{e_{\text{cer.eq.}}}{0,9} + 2x \frac{0,001}{1,75} + 0,13$$

$$0,135 = 0,001739 + 2,2222 \times e_{\text{cer.eq.}} + 0,001143 + 0,13$$

$$e_{\text{cer.eq.}(\text{inverno})} = 0,00095 \text{ m}$$

$$C_t = C_{\text{eq}} = C_{\text{reboco.eq.}} + C_{\text{cer.eq.}} + C_{\text{concr.eq.}} + C_{\text{ar}} + C_{\text{cer.eq.}} + C_{\text{concr.eq.}} + C_{\text{reboco.eq.}}$$

$$C_t = 2xC_{\text{reboco.eq.}} + 2xC_{\text{cer.eq.}} + 2xC_{\text{concr.eq.}} + C_{\text{ar}}$$

Desprezando-se novamente a capacidade térmica do ar:

$$C_t = 2xC_{\text{reboco.eq.}} + 2xC_{\text{cer.eq.}} + 2xC_{\text{concr.eq.}}$$

$$C_t = 2x(e.c.\rho)_{\text{reboco.eq.}} + 2x(e.c.\rho)_{\text{cer.eq.}} + 2x(e.c.\rho)_{\text{concr.eq.}}$$

Como $C_t = 109 \text{ kJ}/(\text{m}^2.\text{K})$ e $e_{\text{cer.eq.}(\text{inverno})} = 0,00095 \text{ m}$

$$109 = 2 \times 0,001 \times 1 \times 2000 + 2 \times 0,00095 \times 0,92 \times \rho_{\text{cer.eq.}} + 2 \times 0,001 \times 1 \times 2200$$

$$109 = 4 + 0,00175 \times \rho_{\text{cer.eq.}} + 4,4$$

$$\rho_{\text{cer.eq.}(\text{inverno})} = 57551 \text{ kg/m}^3$$

- condição de verão:

Como $R_{t(\text{verão})} = 0,1532 \text{ m}^2.\text{K/W}$

$$0,1532 = 2x \frac{0,001}{1,15} + 2x \frac{e_{\text{cer.eq.}}}{0,9} + 2x \frac{0,001}{1,75} + 0,15$$

$$0,1532 = 0,001739 + 2,2222 \times e_{\text{cer.eq.}} + 0,001143 + 0,15$$

$$e_{\text{cer.eq.}(\text{verão})} = 0,000143 \text{ m}$$

$$C_t = C_{\text{eq}} = C_{\text{reboco.eq.}} + C_{\text{cer.eq.}} + C_{\text{concr.eq.}} + C_{\text{ar}} + C_{\text{cer.eq.}} + C_{\text{concr.eq.}} + C_{\text{reboco.eq.}}$$

$$C_t = 2xC_{\text{reboco.eq.}} + 2xC_{\text{cer.eq.}} + 2xC_{\text{concr.eq.}} + C_{\text{ar}}$$

Desprezando-se novamente a capacidade térmica do ar:

$$C_t = 2xC_{\text{reboco.eq.}} + 2xC_{\text{cer.eq.}} + 2xC_{\text{concr.eq.}}$$

$$C_t = 2x(e.c.\rho)_{\text{reboco.eq.}} + 2x(e.c.\rho)_{\text{cer.eq.}} + 2x(e.c.\rho)_{\text{concr.eq.}}$$

Como $C_t = 109 \text{ kJ}/(\text{m}^2.\text{K})$ e $e_{\text{cer.eq.}(\text{verão})} = 0,000143 \text{ m}$

$$109 = 2 \times 0,001 \times 1 \times 2000 + 2 \times 0,0001431 \times 0,92 \times \rho_{\text{cer.eq.}} + 2 \times 0,001 \times 1 \times 2200$$

$$109 = 4 + 0,0002633 \times \rho_{\text{cer.eq.}} + 4,4$$

$$\rho_{\text{cer.eq.}(\text{verão})} = 382053 \text{ kg/m}^3$$

Os parâmetros a configurar no *EnergyPlus* para esta laje equivalente são, portanto,

para o inverno:

- uma camada de fibrocimento com 0,008 m de espessura e demais dados da ABNT NBR 15220-2:2005 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005);
- uma camada de ar com resistência térmica de $0,14 \text{ m}^2.\text{K/W}$;
- uma camada de reboco com 0,001 m de espessura e demais dados da ABNT NBR 15220-2:2005 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005);
- uma camada cerâmica com 0,00095 m de espessura, densidade de 57551 kg/m^3 e demais dados da ABNT NBR 15220-2:2005 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005);
- uma camada de concreto com 0,001 m de espessura e demais dados da ABNT NBR 15220-2:2005 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005);
- uma camada de ar com resistência térmica de $0,13 \text{ m}^2.\text{K/W}$;
- uma camada de concreto igual à anterior;
- uma camada cerâmica igual à anterior;
- uma camada de reboco igual à anterior.

E para o verão:

- uma camada de fibrocimento com 0,008 m de espessura e demais dados da ABNT NBR 15220-2:2005 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005);
- uma camada de ar com resistência térmica de $0,21 \text{ m}^2.\text{K/W}$;
- uma camada de reboco com 0,001 m de espessura e demais dados da ABNT NBR 15220-2:2005 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005);
- uma camada cerâmica com 0,000143 m de espessura, densidade de 382053 kg/m^3 e demais dados da ABNT NBR 15220-2:2005 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005);
- uma camada de concreto com 0,001 cm de espessura e demais dados da ABNT NBR 15220-2:2005 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005);
- uma camada de ar com resistência térmica de $0,15 \text{ m}^2.\text{K/W}$;
- uma camada de concreto igual à anterior;
- uma camada cerâmica igual à anterior;
- uma camada de reboco igual à anterior.

Esses parâmetros foram transcritos para a Tabela 11.

A.5 Portas (todas)

$e = 0,03 \text{ m}$

$$\rho = 800 \text{ kg/m}^3$$

$$\lambda = 0,29 \text{ W/(m.K)}$$

$$c = 1,34 \text{ kJ/(kg.K)}$$

$$R = \frac{e}{\lambda} = \frac{0,03}{0,29} = 0,103 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

$$U = \frac{1}{R} = \frac{1}{0,103} = 9,67 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

$$C_T = e \cdot c \cdot \rho = 0,03 \times 1,34 \times 800 = 32 \text{ kJ/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

Esses parâmetros foram transcritos para a Tabela 11 e Tabela 12.

A.6 Pisos do modelo 1 – banheiro e cozinha

$$e_{\text{cerâmica}} = 0,005 \text{ m}$$

$$\rho_{\text{cerâmica}} = 1600 \text{ kg/m}^3$$

$$\lambda_{\text{cerâmica}} = 0,9 \text{ W/(m.K)}$$

$$c_{\text{cerâmica}} = 0,92 \text{ kJ/(kg.K)}$$

$$e_{\text{argamassa}} = 0,02 \text{ m}$$

$$\rho_{\text{argamassa}} = 2000 \text{ kg/m}^3$$

$$\lambda_{\text{argamassa}} = 1,15 \text{ W/(m.K)}$$

$$c_{\text{argamassa}} = 1 \text{ kJ/(kg.K)}$$

$$e_{\text{concreto}} = 0,1 \text{ m}$$

$$\rho_{\text{concreto}} = 2200 \text{ kg/m}^3$$

$$\lambda_{\text{concreto}} = 1,75 \text{ W/(m.K)}$$

$$c_{\text{concreto}} = 1 \text{ kJ/(kg.K)}$$

$$R = \frac{e_{\text{cerâmica}}}{\lambda_{\text{cerâmica}}} + \frac{e_{\text{argamassa}}}{\lambda_{\text{argamassa}}} + \frac{e_{\text{concreto}}}{\lambda_{\text{concreto}}} = \frac{0,005}{0,9} + \frac{0,02}{1,15} + \frac{0,1}{1,75} = 0,08 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

$$U = \frac{1}{R} = \frac{1}{0,08} = 12,49 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

$$C_T = (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{cerâmica}} + (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{argamassa}} + (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{concreto}}$$

$$C_T = 0,005 \times 0,92 \times 1600 + 0,02 \times 1 \times 2000 + 0,1 \times 1 \times 2200 = 267 \text{ kJ/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

Os parâmetros a configurar no *EnergyPlus* para este piso são, portanto:

- uma camada de cerâmica com 0,005 m de espessura e demais dados da ABNT NBR 15220-2:2005 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005);
- uma camada de argamassa com 0,02 m de espessura e demais dados da ABNT

NBR 15220-2:2005 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005);
- uma camada de concreto com 0,1 m de espessura e demais dados da ABNT NBR 15220-2:2005 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005).

Esses parâmetros foram transcritos para a Tabela 11.

A.7 Pisos do modelo 1 – demais cômodos

$$e_{\text{madeira}} = 0,011 \text{ m}$$

$$\rho_{\text{madeira}} = 800 \text{ kg/m}^3$$

$$\lambda_{\text{madeira}} = 0,29 \text{ W/(m.K)}$$

$$C_{\text{madeira}} = 1,34 \text{ kJ/(kg.K)}$$

$$e_{\text{concreto}} = 0,1 \text{ m}$$

$$\rho_{\text{concreto}} = 2200 \text{ kg/m}^3$$

$$\lambda_{\text{concreto}} = 1,75 \text{ W/(m.K)}$$

$$C_{\text{concreto}} = 1 \text{ kJ/(kg.K)}$$

$$R = \frac{e_{\text{madeira}}}{\lambda_{\text{madeira}}} + \frac{e_{\text{concreto}}}{\lambda_{\text{concreto}}} = \frac{0,011}{0,29} + \frac{0,1}{1,75} = 0,0951 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

$$U = \frac{1}{R} = \frac{1}{0,0951} = 10,52 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

$$C_T = (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{madeira}} + (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{concreto}} = 0,011 \times 1,34 \times 800 + 0,1 \times 1 \times 2200$$

$$C_T = 232 \text{ kJ/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

Os parâmetros a configurar no *EnergyPlus* para este piso são, portanto:

- uma camada de madeira com 0,011 m de espessura e demais dados da ABNT NBR 15220-2:2005 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005);
- uma camada de concreto com 0,1 m de espessura e demais dados da ABNT NBR 15220-2:2005 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005).

Esses parâmetros foram transcritos para a Tabela 11.

A.8 Pisos do modelo 2

$$e_{\text{cerâmica}} = 0,005 \text{ m}$$

$$\rho_{\text{cerâmica}} = 1600 \text{ kg/m}^3$$

$$\lambda_{\text{cerâmica}} = 0,9 \text{ W/(m.K)}$$

$$C_{\text{cerâmica}} = 0,92 \text{ kJ/(kg.K)}$$

$$e_{\text{argamassa}} = 0,02 \text{ m}$$

$$\rho_{\text{argamassa}} = 2000 \text{ kg/m}^3$$

$$\lambda_{\text{argamassa}} = 1,15 \text{ W/(m.K)}$$

$$c_{\text{argamassa}} = 1 \text{ kJ/(kg.K)}$$

$$e_{\text{EPS}} = 0,01 \text{ m}$$

$$\rho_{\text{EPS}} = 35 \text{ kg/m}^3$$

$$\lambda_{\text{EPS}} = 0,04 \text{ W/(m.K)}$$

$$c_{\text{EPS}} = 1,42 \text{ kJ/(kg.K)}$$

$$e_{\text{concreto}} = 0,1 \text{ m}$$

$$\rho_{\text{concreto}} = 2200 \text{ kg/m}^3$$

$$\lambda_{\text{concreto}} = 1,75 \text{ W/(m.K)}$$

$$c_{\text{concreto}} = 1 \text{ kJ/(kg.K)}$$

$$R = \frac{e_{\text{cerâmica}}}{\lambda_{\text{cerâmica}}} + \frac{e_{\text{argamassa}}}{\lambda_{\text{argamassa}}} + \frac{e_{\text{EPS}}}{\lambda_{\text{EPS}}} + \frac{e_{\text{concreto}}}{\lambda_{\text{concreto}}} = \frac{0,005}{0,9} + \frac{0,02}{1,15} + \frac{0,01}{0,04} + \frac{0,1}{1,75}$$

$$= 0,3301 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

$$U = \frac{1}{R} = \frac{1}{0,3301} = 3,03 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

$$C_T = (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{cerâmica}} + (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{argamassa}} + (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{EPS}} + (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{concreto}}$$

$$C_T = 0,005 \times 0,92 \times 1600 + 0,02 \times 1 \times 2000 + 0,01 \times 1,42 \times 35 + 0,1 \times 1 \times 2200$$

$$C_T = 268 \text{ kJ/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

Os parâmetros a configurar no *EnergyPlus* para este piso são, portanto:

- uma camada de cerâmica com 0,005 m de espessura e demais dados da ABNT NBR 15220-2:2005 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005);
- uma camada de argamassa com 0,02 m de espessura e demais dados da ABNT NBR 15220-2:2005 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005);
- uma camada de EPS com 0,01 m de espessura e demais dados da ABNT NBR 15220-2:2005 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005);
- uma camada de concreto com 0,1 m de espessura e demais dados da ABNT NBR 15220-2:2005 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005).

Esses parâmetros foram transcritos para a Tabela 12.

A.9 Cobertura do modelo 2

$$e_{\text{fibrocimento}} = 0,008 \text{ m}$$

$$\rho_{\text{fibrocimento}} = 1700 \text{ kg/m}^3$$

$$\lambda_{\text{fibrocimento}} = 0,65 \text{ W/(m.K)}$$

$$C_{\text{fibrocimento}} = 0,84 \text{ kJ/(kg.K)}$$

$$e_{\text{EPS}} = 0,12 \text{ m}$$

$$\rho_{\text{EPS}} = 35 \text{ kg/m}^3$$

$$\lambda_{\text{EPS}} = 0,04 \text{ W/(m.K)}$$

$$C_{\text{EPS}} = 1,42 \text{ kJ/(kg.K)}$$

$$e_{\text{madeira}} = 0,005 \text{ m}$$

$$\rho_{\text{madeira}} = 800 \text{ kg/m}^3$$

$$\lambda_{\text{madeira}} = 0,29 \text{ W/(m.K)}$$

$$C_{\text{madeira}} = 1,34 \text{ kJ/(kg.K)}$$

$$R_{\text{ar}} = 0,14 \text{ m}^2.\text{K/W} \text{ (ascendente)}$$

$$R_{\text{ar}} = 0,21 \text{ m}^2.\text{K/W} \text{ (descendente)}$$

- condição de inverno:

$$R_{t(\text{inverno})} = \frac{e_{\text{fibrocimento}}}{\lambda_{\text{fibrocimento}}} + R_{\text{ar(ascendente)}} + \frac{e_{\text{EPS}}}{\lambda_{\text{EPS}}} + \frac{e_{\text{madeira}}}{\lambda_{\text{madeira}}}$$

$$R_{t(\text{inverno})} = \frac{0,008}{0,65} + 0,14 + \frac{0,12}{0,04} + \frac{0,005}{0,29} = 3,1695 \text{ m}^2.\text{K/W}$$

- condição de verão:

$$R_{t(\text{verão})} = \frac{e_{\text{fibrocimento}}}{\lambda_{\text{fibrocimento}}} + R_{\text{ar(descendente)}} + \frac{e_{\text{EPS}}}{\lambda_{\text{EPS}}} + \frac{e_{\text{madeira}}}{\lambda_{\text{madeira}}}$$

$$R_{t(\text{verão})} = \frac{0,008}{0,65} + 0,21 + \frac{0,12}{0,04} + \frac{0,005}{0,29} = 3,2395 \text{ m}^2.\text{K/W}$$

Resistência térmica total:

- condição de inverno:

$$R_{T(\text{inverno})} = R_{\text{si(ascendente)}} + R_{t(\text{inverno})} + R_{\text{se(ascendente)}}$$

$$R_{T(\text{inverno})} = 0,1 + 3,1695 + 0,04 = 3,3095 \text{ m}^2.\text{K/W}$$

- condição de verão:

$$R_{T(\text{verão})} = R_{\text{si(descendente)}} + R_{t(\text{verão})} + R_{\text{se(descendente)}}$$

$$R_{T(\text{verão})} = 0,17 + 3,2395 + 0,04 = 3,4495 \text{ m}^2.\text{K/W}$$

Transmitância térmica:

- condição de inverno:

$$U_{\text{inverno}} = \frac{1}{R_{T(\text{inverno})}} = \frac{1}{3,3095} = 0,3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

- condição de verão:

$$U_{\text{verão}} = \frac{1}{R_{T(\text{verão})}} = \frac{1}{3,4495} = 0,29 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Capacidade térmica:

$$C_T = \sum_{i=1}^3 e_i \cdot c_i \cdot \rho_i = (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{fibrocimento}} + (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{EPS}} + (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{madeira}}$$

$$C_T = 0,008 \times 0,84 \times 1700 + 0,12 \times 1,42 \times 35 + 0,005 \times 1,34 \times 800 = 23 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Os parâmetros a configurar no *EnergyPlus* para esta cobertura são, portanto, para o inverno:

- uma camada de fibrocimento com 0,008 m de espessura e demais dados da ABNT NBR 15220-2:2005 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005);
- uma camada de ar com resistência térmica de 0,14 m².K/W;
- uma camada de EPS com 0,12 m de espessura e demais dados da ABNT NBR 15220-2:2005 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005);
- uma camada de madeira com 0,005 m de espessura e demais dados da ABNT NBR 15220-2:2005 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005);

E para o verão:

- uma camada de fibrocimento com 0,008 m de espessura e demais dados da ABNT NBR 15220-2:2005 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005);
- uma camada de ar com resistência térmica de 0,21 m².K/W;
- uma camada de EPS com 0,12 m de espessura e demais dados da ABNT NBR 15220-2:2005 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005);
- uma camada de madeira com 0,005 m de espessura e demais dados da ABNT NBR 15220-2:2005 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005);

Esses parâmetros foram transcritos para a Tabela 12.

Anexos

Anexo A – Energia incorporada em materiais de construção brasileiros

Materiais	EI (MJ/kg)	EI (MJ/m³)	Desperdício (%)	Densidade (kg/m³)
Aço - chapa galvanizada	33,8	265330		7850
Aço - chapa dobrada	30	235500		7850
Aço - laminado CA 50A	30	235500	10	7850
Aço - reciclado	12,5			
Acrílico	80			
Água	0,02	20		1000
Alumínio lingote	98,2	265140		2700
Alumínio anodizado	210	567000		2700
Alumínio reciclado - extrudado	17,3			
Alumínio reciclado - anodizado	42,9			
Areia	0,05	75,75	50	1515
Argamassa - mistura	2,1	3906	40	1860
Asfalto	51	107865		2115
Batente - madeira aparelhada	3,5	2100		600
Borracha natural - latex	69	63480		920
Borracha sintética	135	160650		1190
Brita	0,15	247,5	40	1650
Cal virgem	3	4500	50	1500
Carpete	50		15	
Cera	52			
Cerâmica - azulejo	6,2	12400		2000
Cerâmica - bloco de 8 furos	2,9	4060	15	1400
Cerâmica - branca	25	52075	5	2000
Cerâmica - piso esmaltado	5	10000		2000
Cerâmica – revest, biqueima	6,2	12400		2000
Cerâmica – revest, monoqueima	5,1	10200	15	2000
Cerâmica porcelanato	13	27300	15	2100
Cerâmica - refratária	32,4			
Cerâmica - telha	5,4	10260		1900
Chapa de compensado	8	4400	15	550
Chumbo lingote	21	238140		11340
Cimento Portland	4,2	8190	40	1950
Cobre	75	669975		8933
Concreto armado	3,1			
Concreto bloco	1	2000	15	2000
Concreto simples	1,2	2760	10	2300
Dobradiça - ferro	40	314800		7870
Fechaduras	55	467500		8500
Ferro fundido	32,8	246000		7500
Fibra de vidro	24	768		32
Fibrocimento - telha	6	11520	10	1920

Materiais	EI (MJ/kg)	EI (MJ/m³)	Desperdício (%)	Densidade (kg/m³)
Fio termoplástico	83	201690	25	2430
Gesso	4	3200		800
Gesso acartonado	6,1			
Granito - aparelhada	2	5400		2700
Lã mineral	19	2090		110
Latão	80	682400		8530
Madeira - aparelhada seca forno	3,5	2100	15	600
Madeira - aparelhada seca ar livre	0,5	300	15	600
Madeira - laminada colada	7,5	4875	15	650
Madeira - MDF	9	9000	15	1000
Mármore	1	2680		2680
Marmorite	0,48			
Palha	0,24	31,2		130
Papel	18,54	17242,2		930
Papel kraft	37,7			
Papel de parede	36,4			
Placa de gesso	4,5	4500	35	1000
Poliamida - nylon	125	143750		1150
Poliestireno expandido	112	6160		55
Polietileno de alta densidade	95	90250		950
Polipropileno	83,8	92180		1100
Poliuretano - espuma	74	2590		35
Porta - madeira aparelhada	3,5	2275		650
Prata	128,2	1346100		10500
Selante - formaldeído	80	120000		1500
Solo-cimento - bloco	0,6	1020		1700
Solvente - tolueno	67,9	74690		1100
Telha de vidro	23,13	55512		2400
Tinta acrílica	61	79300	15	1300
Tinta óleo	98,1	127530	15	1300
Tinta PVA latex	65	84500	15	1300
Torneiras e registros	95			
Tubo - PVC	80	104000	17	1300
Tubo de ferro galvanizado	33,8			
Vermiculita	1,37	167,14		122
Vidro plano	18,5	46250	5	2500
Vidro - blindex	26,2			
Vinil	47			
Zinco	51	364140		7140

Fonte: Tavares (2006, p. 193-194).

Anexo B – Quantitativo parcial de materiais do modelo 2

Materiais	Quant.	Unid.
Lastro de brita (radier)	3,58	m ³
Armadura de tela de aço CA 60 (radier)	51,09	m ²
Concreto C25 (radier)	5,11	m ³
Armadura de aço CA 60 (cintas de amarração)	6,59	kg
Concreto preparado na obra (cintas de amarração)	1,68	m ³
Alvenaria de vedação - paredes externas	74,76	m ²
Alvenaria de vedação - paredes internas	29,67	m ²
Calha de chapa de aço galvanizado	18,12	m
Isolamento térmico do piso	51,08	m ²
Isolamento térmico das paredes	74,76	m ²
Isolamento térmico da cobertura	51,08	m ²
Chapisco – externo	83,68	m ²
Emboço - externo	83,68	m ²
Reboco - externo	83,68	m ²
Chapisco - interno	138,06	m ²
Emboço - interno	138,06	m ²
Reboco - interno	138,06	m ²
Pintura com tinta látex acrílica - paredes externas	83,68	m ²
Pintura com tinta látex PVA - paredes internas	138,06	m ²
Pintura com verniz - esquadrias de madeira	15,54	m ²

Fonte: adaptação de Dalbem (2018, p. 63)

