

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS**

**Faculdade de Arquitetura e Urbanismo**

**Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo**



Dissertação

**Obtenção de Desempenho NZEB em Edificações Residenciais  
Multifamiliares de Interesse Social no Sul do Brasil, utilizando  
Algoritmos Genéticos**

**Camila Rosa Vaz**

Pelotas, 2022

**Camila Rosa Vaz**

**Obtenção de Desempenho NZEB em Edificações Residenciais  
Multifamiliares de Interesse Social no Sul do Brasil, utilizando  
Algoritmos Genéticos**

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

Linha de Pesquisa: Conforto e Sustentabilidade do Ambiente Construído.

Orientador: Prof. Dr. Antonio César Silveira Baptista da Silva

Coorientador: Prof. Dr. Romeu Vicente

Pelotas, 2022

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas  
Catalogação na Publicação

V393o Vaz, Camila Rosa

Obtenção de desempenho nZEB em edificações residenciais multifamiliares de interesse social no Sul do Brasil, utilizando algoritmos genéticos / Camila Rosa Vaz ; Antonio César Silveira Baptista da Silva, orientador ; Romeu Vicente, coorientador. — Pelotas, 2022.

169 f.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas, 2022.

1. Eficiência energética. 2. Conforto térmico. 3. Edifícios nZEB. 4. Habitações de interesse social. 5. Simulação computacional. I. Silva, Antonio César Silveira Baptista da, orient. II. Vicente, Romeu, coorient. III. Título.

CDD : 621.321

**Camila Rosa Vaz**

**Obtenção de Desempenho NZEB em Edificações Residenciais Multifamiliares de Interesse Social no Sul do Brasil, utilizando Algoritmos Genéticos**

Dissertação apresentada 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: 18 de março de 2022.

Banca examinadora:

**Prof. Dr. Antônio César Silveira Baptista da Silva (orientador)**

Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Santa Catarina

**Prof. Dr. Romeu Vicente (coorientador)**

Doutor em Engenharia Civil pela Universidade de Aveiro

**Prof. Dr. Roberto Lamberts**

Doutor em Engenharia Civil pela University of Leeds

**Prof. Dr. Fernando Simon Westphal**

Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Santa Catarina

**Prof. Dr. Eduardo Grala da Cunha**

Doutor em Arquitetura pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de  
Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES)  
- Código de financiamento 001.

## **Agradecimentos**

O desfecho desta dissertação de mestrado é um momento de muita satisfação e alegria, por esta razão, desejo expressar os meus sinceros agradecimentos.

Ao professor Antônio César Silveira Baptista da Silva, meu orientador, pela competência científica, paciência, disponibilidade, bem como pelo conselhos, críticas e sugestões.

Aos professores Romeu Vicente, meu coorientador, e Eduardo Grala pela competência científica, gentileza, acessibilidade, bem como pelas sugestões à elaboração deste trabalho.

Ao colega Rodrigo Karini Leitzke pela disponibilidade, atenção, cortesia e toda ajuda que foi essencial ao longo da construção deste estudo.

À minha família pela compreensão das minhas ausências, motivação, incentivo e toda ajuda nas quais foram fundamentais durante este processo.

Aos colegas e amigos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a realização deste trabalho, porém, não tiveram aqui seu nome mencionado.

À Universidade Federal de Pelotas (UFPel) por oferecer uma pós-graduação de qualidade e à CAPES pela concessão do recurso financeiro.

Por fim, agradeço aos membros da banca, pelas importantes contribuições para o aprimoramento da pesquisa.

## Resumo

VAZ, Camila Rosa. **Análise de desempenho NZEB em edificações multifamiliares de interesse social no sul do Brasil**. 2021. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) — Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2021.

As edificações são responsáveis mundialmente por 30% à 40% do consumo de energia primária e destas edificações mais de 50% são residenciais (IEA, 2020), fazendo com que a busca pela sustentabilidade esteja cada vez mais presente nas metas da construção civil. Neste contexto, surgem os edifícios NZEB, com necessidades de energia quase nulas e com elevado nível de eficiência energética, tanto por seu reduzido consumo de energia em relação a edifícios convencionais, quanto pela produção de energia local que compensam as necessidades energéticas. As regulamentações de eficiência energética no cenário mundial estão em um patamar mais elevado do que em nosso país, indicando um caminho a ser seguido para a evolução dos regulamentos brasileiros. Frente a um elevado déficit habitacional, este trabalho apresenta uma análise de viabilidade técnica e financeira do conceito NZEB para o uso residencial multifamiliar de interesse social no contexto climático do sul do Brasil através de simulações computacionais, utilizando o software *EnergyPlus* e um Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo responsável por realizar a otimização do modelo, quanto às propriedades térmicas do envelope e orientação solar de uma edificação de 4 pavimentos. Os resultados da otimização do envelope apontam a viabilidade técnica para atender mais de 50% da demanda de energia, obtendo uma edificação NZEB, com investimentos que possibilitam viabilidade financeira e tempo de retorno na ordem de 5 anos.

**Palavras-chave:** Eficiência energética; conforto térmico; edifícios NZEB; habitações de interesse social; simulação computacional; otimização multiobjetivo; zona bioclimática 2.

## Abstract

VAZ, Camila Rosa. **Analysis of NZEB Performance in Residential Buildings Multifamily of Social Interest in Southern Brazil**. 2021. Dissertation (Master Degree in Arquitetura e Urbanismo) — Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2021.

Buildings are responsible worldwide for between 30% and 40% of primary energy consumption and of these buildings more than 50% are residential (IEA, 2020), searching for sustainability is increasingly present in the goals of civil construction. In this context, NZEB buildings appear with almost zero energy needs, which are, therefore, buildings with a high level of energy efficiency, both for their reduced energy consumption concerning conventional buildings and for the existence of energy production systems. that compensate for energy needs. In a global view, energy efficiency regulations are at a higher level than in our country, and thus indicate a path to be followed for the evolution of Brazilian regulations. In front of a high housing deficit, this work presents a technical and economic feasibility analysis of implementing the NZEB concept for the multifamily residential use of social interest in the climatic context of southern Brazil using the Energy Plus software and a Multi-objective Evolutionary Algorithm responsible for performing the optimization of the model concerning to thermal properties of the envelope and solar orientation of a four-floor building. The results point to the technical feasibility to meet more than 50% of the energy demand, obtaining an NZEB building, with investments that allow financial viability and payback time in the order of 5 years.

**Keywords:** Energy efficiency; thermal comfort; NZEB; social interest housing; computational simulation; multi-objective optimization; bioclimatic zone2.

## Lista de Figuras

Figura 1 – MIT Solar House I a IV .....	24
Figura 2 – Exemplos de edifícios residenciais NZEB .....	26
Figura 3 – Distribuição do uso de energia elétrica no Brasil.....	38
Figura 4 – Estrutura do consumo residencial de energia elétrica por uso final.....	39
Figura 5 – Zonas Bioclimáticas Brasileiras .....	42
Figura 6 – Trajetória do sol ao longo do dia e estações no hemisfério sul.....	52
Figura 7 – Fluxograma simplificado do método do presente estudo .....	55
Figura 8 – Implantação do PAR Marcílio Dias .....	58
Figura 9 – Planta-baixa do apartamento PAR Marcílio Dias .....	59
Figura 10 – Implantação do PAR Regente.....	59
Figura 11 – Planta-baixa do PAR Regente .....	60
Figura 12 – Implantação do PAR Porto.....	60
Figura 13 – Planta-baixa do apartamento PAR Porto.....	61
Figura 14 – Implantação do PAR Solar das Palmeiras .....	61
Figura 15 – Planta-baixa do apartamento PAR Solar das Palmeiras I.....	62
Figura 16 – Planta-baixa do apartamento PAR Solar das Palmeiras II.....	62
Figura 17 – Implantação do PAR Marcílio Dias com destaque ao setor modelado...64	
Figura 18 – Planta baixa do PAR Marcílio Dias.....	64
Figura 19 – Modelagem do PAR Marcílio Dias .....	65
Figura 20 – Modelagem do PAR Marcílio Dias .....	65
Figura 21 – Modelagem do PAR Marcílio Dias .....	65

Figura 22 – Modelagem do PAR Marcílio Dias .....	66
Figura 23 – Ocupação nos dias de semana.....	66
Figura 24 – Ocupação nos finais de semana.....	67
Figura 25 – Iluminação nos dias de semana.....	67
Figura 26 – Iluminação nos finais de semana.....	67
Figura 27 – Cálculo da distância de aglomerações - NSGA-II .....	73
Figura 28 – Módulo JKM410M – 6RL3 - 410 W do Jinko Solar.....	77
Figura 29 – Gráfico de Radiações incidentes sobre a cobertura à 6° ao Norte .....	78
Figura 30 – Gráfico de Radiações incidentes sobre a cobertura à 14° ao Norte .....	78
Figura 31 – Gráfico de Radiações incidentes sobre a cobertura à 14° ao Sul .....	79
Figura 32 – Gráfico do somatório de troca de calor sensível – Caso Base.....	81
Figura 33 – Gráfico do somatório de troca de calor sensível – Caso 1 .....	84
Figura 34 – Curva de Pareto para o Caso 1 .....	85
Figura 35 – Fachada Sul com ênfase ao apartamento analisado.....	86
Figura 36 – Fachada Norte com ênfase ao apartamento analisado.....	86
Figura 37 – Gráfico comparativo do consumo termoenergético.....	87
Figura 38 – Fachada Sul com ênfase ao apartamento analisado .....	88
Figura 39 – Fachada Norte com ênfase ao apartamento analisado.....	88
Figura 40 – Gráfico comparativo do consumo termoenergético.....	88
Figura 41 – Proposta de cobertura para o PAR Marcílio Dias.....	89
Figura 42 – Fachada principal do PAR Marcílio Dias, com módulos FV.....	89

Figura 43 – Fachada lateral do PAR Marcílio Dias.....	90
Figura 44 – Gráfico da energia média gerada pelo sistema proposto .....	91
Figura 45 – Gráfico da energia termoenergética consumida e a energia gerada ...	91
Figura 46 – Gráfico do somatório de troca de calor sensível – Caso 2 .....	96
Figura 47 – Curva de Pareto para o Caso 2 .....	97
Figura 48 – Fachada Sul com ênfase ao apartamento analisado .....	98
Figura 49 – Fachada Norte com ênfase ao apartamento analisado.....	98
Figura 50 – Gráfico comparativo do consumo termoenergético.....	98
Figura 51 – Fachada Sul com ênfase ao apartamento analisado .....	99
Figura 52 – Fachada Norte com ênfase ao apartamento analisado.....	99
Figura 53 – Gráfico comparativo do consumo termoenergético.....	100
Figura 54 – Proposta de cobertura para o PAR Marcílio Dias.....	100
Figura 55 – Fachada sul do PAR Marcílio Dias, com módulos FV.....	101
Figura 56 – Fachada norte do PAR Marcílio Dias, com módulos FV.....	101
Figura 57 – Fachada lateral do PAR Marcílio Dias.....	101
Figura 58 – Gráfico da energia média gerada pelo sistema proposto .....	103
Figura 59 – Gráfico do somatório de troca de calor sensível – Caso 3.....	108
Figura 60 – Curva de Pareto para o Caso 3 .....	109
Figura 61 – Gráfico comparativo do consumo termoenergético.....	110
Figura 62 – Gráfico do somatório de troca de calor sensível – Caso 4.....	115

Figura 63 – Curva de Pareto para o Caso 4 .....	116
Figura 64 – Gráfico comparativo do consumo termoenergético.....	117
Figura 65 – Gráfico do somatório de troca de calor sensível – Caso 5.....	122
Figura 66 – Curva de Pareto para o Caso 5 .....	123
Figura 67 – Gráfico comparativo do consumo termoenergético.....	124

## Lista de Tabelas

Tabela 1 – Comparativo do consumo energético das edificações res. NZEB.....	27
Tabela 2 – Componentes encontrados em cada tipo de parede observada .....	50
Tabela 3 – Características construtivas do PAR Marcílio Dias .....	63
Tabela 4 – Sistemas construtivos avaliados .....	70
Tabela 5 – Composições dos sistemas construtivos avaliados .....	71
Tabela 6 – Variáveis utilizadas e seus limites inferior e superior .....	72
Tabela 7 – Dimensões e parâmetros elétricos do módulo fotovoltaico .....	77
Tabela 8 – Quantitativo da condição inicial.....	82
Tabela 9 – Sistema construtivo do Caso 1.....	82
Tabela 10 – Resultados para o Caso 1 em comparação com o Caso Base .....	83
Tabela 11 – Geração de energia fotovoltaica do sistema proposto.....	90
Tabela 12 – Quantitativo do Caso 1 .....	92
Tabela 13 – Dados preliminares para a Análise do Investimento.....	93
Tabela 14 – Análise do Investimento.....	93
Tabela 15 – Sistema construtivo do Caso 2 .....	94
Tabela 16 – Resultados para o Caso 2 em comparação com o Caso Base .....	95
Tabela 17 – Geração de energia fotovoltaica do sistema proposto.....	102
Tabela 18 – Geração de energia fotovoltaica do sistema proposto.....	102
Tabela 19 – Quantitativo do Caso 2.....	104
Tabela 20 – Insumos necessário para a execução do concreto moldado in loco ...	104

Tabela 21 – Composição da parede de concreto moldada in loco por m <sup>2</sup> . .....	105
Tabela 22 – Composição da laje de concreto moldada in loco por m <sup>2</sup> . .....	105
Tabela 23 – Dados preliminares para a Análise do Investimento.....	105
Tabela 24 – Análise do Investimento .....	105
Tabela 25 – Sistema construtivo do Caso 3.....	106
Tabela 26 – Resultados para o Caso 3.....	107
Tabela 27 – Quantitativo do Caso 3.....	111
Tabela 28 – Composição da parede de concreto moldada in loco por m <sup>2</sup> .....	111
Tabela 29 – Dados preliminares para a Análise do Investimento.....	112
Tabela 30 – Análise do Investimento .....	112
Tabela 31 – Sistema construtivo do Caso 4 .....	113
Tabela 32 – Resultados para o Caso 4.....	114
Tabela 33 – Quantitativo do Caso 4.....	118
Tabela 34 – Composição da parede de concreto moldada in loco por m <sup>2</sup> . .....	118
Tabela 35 – Composição da laje de concreto moldada in loco por m <sup>2</sup> .....	118
Tabela 36 – Dados preliminares para a Análise do Investimento.....	119
Tabela 37 – Análise do Investimento .....	119
Tabela 38 – Sistema construtivo do Caso 5.....	120
Tabela 39 – Resultados para o Caso 5.....	121
Tabela 40 – Quantitativo do Caso 5.....	125
Tabela 41 – Composição da parede de concreto moldada in loco por m <sup>2</sup> . .....	125

Tabela 42 – Composição da laje de concreto moldada in loco por m <sup>2</sup> .....	126
Tabela 43 – Dados preliminares para a Análise do Investimento.....	126
Tabela 44 – Análise do Investimento .....	126
Tabela 45 – Comparação entre os resultados ótimos de cada Caso .....	129
Tabela 46 – Comparativos dos preços totais médios .....	130
Tabela 47 – Comparativos dos dados de cada Caso .....	130
Tabela 48 – Comparativos dos preços totais médios .....	131

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
1.1. Apresentação do tema .....	13
1.2. Problema de pesquisa.....	16
1.3. Justificativa. ....	16
1.4. Objetivos.....	17
1.4.1. Objetivo Geral.....	17
1.4.2. Objetivos Específicos .....	17
1.5. Estrutura do Trabalho.....	17
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>19</b>
2.1. Contexto mundial.....	19
2.1.1. Cenário histórico.....	19
2.1.2. Edifícios NZEB.....	22
2.1.3. O standard <i>Passivhaus</i> .....	28
2.1.4. O projeto <i>Passiv-On</i> .....	33
2.1.4.1. Exemplos de aplicação do projeto <i>Passiv-On</i> .....	35
2.2. Contexto brasileiro.....	37
2.2.1. Consumo de energia das edificações brasileiras.....	38
2.2.2. Políticas, programas e regulamentações energéticas .....	40
2.2.3. Edifícios NZEB no Brasil .....	44
2.3. Energia solar fotovoltaica .....	46
2.3.1. Sistema fotovoltaico .....	46
2.4. Habitações de interesse social.....	47
2.5. Eficiência energética na arquitetura .....	48
2.6. Influência das propriedades térmicas do envelope.....	49
2.7. Simulação Computacional.....	52

2.7.1. O software <i>EnergyPlus</i> .....	52
2.7.2. Algoritmos Genéticos .....	53
2.5.2.1. Algoritmos Evolutivos Multiobjetivos .....	53
2.5.2.2. Otimização Multiobjetivo .....	54
<b>3. MÉTODO.....</b>	<b>55</b>
3.1. Estrutura geral da pesquisa.....	56
3.2. Definição do Caso base .....	57
3.3. Modelagem do Caso base e definição dos dados de entrada.....	63
3.4. Definição dos sistemas construtivos avaliados .....	69
3.5. Definição das variáveis consideradas .....	72
3.6. Otimização das propriedades térmicas do envelope .....	72
3.6.1. Dimensionamento da população .....	74
3.7. Avaliação do desempenho termoenergético .....	75
3.8. Cálculo da geração de energia fotovoltaica .....	75
3.9. Análise de viabilidade econômica .....	79
<b>4. RESULTADOS.....</b>	<b>81</b>
4.1 Caso Base .....	81
4.1.1 Consumo de energia .....	81
4.1.2 Custo da envoltória.....	82
4.2. Caso 1.....	82
4.2.1 Orientação solar .....	86
4.2.2 Capacidade de geração do sistema proposto para o Caso 1.....	89
4.2.3 Custo da envoltoria para o Caso 1 .....	92

4.3. Caso 2.....	94
4.3.1 Orientação solar.....	97
4.3.2 Capacidade de geração do sistema proposto para o Caso 2... ..	100
4.3.3 Custo da envoltoria para o Caso 2.....	103
4.4. Caso 3.....	106
4.4.1 Capacidade de geração do sistema proposto para o Caso 3... ..	110
4.4.2 Custo da envoltoria para o Caso 3.....	111
4.5. Caso 4.....	113
4.5.1 Capacidade de geração do sistema proposto para o Caso 4 ..	117
4.5.2 Custo da envoltoria para o Caso 4.....	117
4.6. Caso 5.....	120
4.6.1 Capacidade de geração do sistema proposto para o Caso 5 ..	124
4.6.2 Custo da envoltoria para o Caso 5.....	124
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>125</b>
<b>6. CONCLUSÕES .....</b>	<b>131</b>
<b>7. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>133</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>134</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Apresentação do tema

“O aumento do consumo de energia, a inconsequente extração de recursos naturais e a crescente produção de rejeitos trazem a ideia de que, além de insustentável, o atual modelo de desenvolvimento também é indesejável, sob critérios da preservação ambiental” (BRASIL, 2011, p. 69).

Por isso, atualmente, muitos esforços estão sendo empregados para promover a ampliação do uso de energias renováveis na matriz energética e, assim, obter um novo método de desenvolvimento, capaz de fomentar o progresso humano em todo planeta, por tempo indeterminado (HEMPEL, 2008).

A busca pela sustentabilidade está cada vez mais presente nos setores da sociedade, entres eles a construção civil. Surge, assim, o conceito de construção sustentável, que envolve a interdisciplinaridade de três aspectos nas edificações: o meio-ambiente, a economia e a cultura (MEBRATU, 1998; GAUZIN-MULLER, 2002; SZABÓ, 2005).

Isso se deve ao fato de que a indústria da construção civil possui grande impacto no meio ambiente e requer um alto gasto energético (FERREIRA et al, 2009). O setor é responsável globalmente por aproximadamente 40% do consumo de energia e emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (*Global Status Report for Buildings and Construction*, 2020).

Segundo o Balanço Energético Nacional de 2019, as edificações brasileiras representaram 52% do consumo de energia elétrica, sendo o setor residencial o maior consumidor, responsável por 26,1%, seguido pelo setor comercial, com 17,4%, e o setor público, com 8,5% (EPE, 2020).

Portanto, é de extrema importância buscar alternativas mais eficientes de geração de energia para as edificações, além de hábitos dos usuários, de forma a auxiliar na redução deste impacto, pois o consumo racional de energia é fundamental para prover a sustentabilidade em qualquer contexto (EDWARDS, 2005). O presente estudo focará nas edificações residenciais, pois como visto anteriormente representam o maior consumidor de energia elétrica no país.

De acordo com Ruas (2002), a construção de edificações com características adequadas ao clima é de fundamental importância para a

obtenção de ambientes que atendam as expectativas quanto ao conforto térmico e racionalização de energia com sistemas de ventilação, refrigeração e aquecimento. Sabendo que, conforme a *American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers – ASHRAE*, o conforto térmico é definido como o estado mental que expressa a satisfação humana com o ambiente térmico que o circunda.

Em muitos casos, as edificações são projetadas principalmente em função de tendências estéticas ou exigências técnicas de produção, sem a preocupação em adequar o ambiente às características e limitações do homem. Este é um problema relevante, pois o desconforto causado por calor ou frio reduz a performance humana. Deste modo, o conforto térmico é um dos principais objetivos do ser humano nas suas edificações. Para isso, é importante levar em consideração o tipo de clima de cada região. O Brasil, devido ao vasto território, possui oito zonas bioclimáticas, de forma que cada região precisa respeitar as recomendações específicas de conforto térmico na projeção do edifício, como enfatizado nas normas NBR 15.220 (ABNT 2005), NBR 15.575 (ABNT 2013) e NBR 16.401-2 (ABNT 2008).

Nesse quadro, se insere o conceito de Arquitetura Bioclimática, que busca por meio de seus próprios elementos, a execução de edificações adaptadas às condições climáticas, a fim de garantir a qualidade do ambiente construído.

A partir de 2001, foi estabelecida uma política efetiva de eficiência energética para as edificações, com a promulgação da Lei 10.295, que estabeleceu indicadores técnicos e regulamentos específicos, assim como em 2010 foi publicado o RTQ-R, Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (BRASIL, 2010).

Em alguns países, as regulamentações de eficiência energética estão em um patamar mais elevado, indicando um caminho a ser seguido para a evolução dos regulamentos brasileiros. Assim, é possível citar as edificações com consumo de energia próximo de zero (NZEB- *Nearly Zero Energy Buildings*), com necessidades energéticas quase nulas, visando um elevado nível de eficiência energética, tanto por seu reduzido consumo energético em relação a edifícios convencionais, quanto pela existência de sistemas de produção de energia local que compensam essas necessidades, permitindo verificar-se um balanço,

relativo ao consumo anual de energia nos edifícios, próximo a zero (BALLARINI *et al.* 2019, KURNITSKI *et al.* 2011).

Em 2010, a União Europeia (UE) publicou diretivas exigindo que todos os edifícios construídos a partir de janeiro de 2021 tenham um balanço energético perto de zero, ou seja, construções NZEB. Entretanto, cabe ressaltar que essas estratégias relacionadas ao desempenho energético ainda não são padronizadas ou normatizadas por qualquer órgão certificador reconhecido pela maior parte dos países, pois cada região do planeta apresenta índices distintos, como irradiação solar, temperatura, umidade relativa e incidência e direção preponderante de ventos, fatores estes que podem influenciar na determinação da melhor metodologia a ser utilizada para se chegar à NZEB (PLESS e TORCELLINI, 2010; LABORDA, 2015).

Entre as formas possíveis de geração de energia para as edificações NZEB, destaca-se o uso da tecnologia fotovoltaica, que vem crescendo exponencialmente quando comparada a outras fontes renováveis de energia, devido às diversas possibilidades de aplicação e de integração com a envoltória da edificação. No Brasil, em função do grande potencial de produção de energia solar e exorbitante quantidade de radiação predominante durante a maior parte do ano, a tecnologia ganha ainda mais destaque (CABRAL, VIEIRA, 2012).

Nesse contexto, o objetivo do presente estudo é analisar a implementação do conceito NZEB para o uso residencial multifamiliar de interesse social no contexto climático do sul do Brasil, mais especificamente para a zona bioclimática 2 (ZB2), considerando as propriedades térmicas do envelope que melhor atendem à obtenção de uma edificação NZEB e sua geração de energia, através da tecnologia fotovoltaica.

Cabe destacar que, em todos os âmbitos da avaliação de desempenho térmico e redução de energia em edificações residenciais, talvez o das Habitações de Interesse Social seja um dos mais importantes, já que seus usuários, na maioria das vezes, não dispõem de recursos financeiros para arcar com uma climatização artificial para compensar o desconforto térmico. Quando são tratadas Habitações de Interesse Social, o baixo custo é fator determinante para a viabilização dos empreendimentos, o que acaba acarretando, em alguns casos, o uso de tecnologias construtivas e materiais inadequados no que se

refere à resistência, manutenção e propriedades térmicas. Os usos destes materiais inadequados agravam ainda mais os problemas de conforto térmico nessas habitações, segundo Curcio (2011). Por isso, os projetos a serem avaliados na condição de casos-base são Habitações de Interesse Social (HIS).

## **1.2 Problema de Pesquisa**

O déficit habitacional brasileiro, segundo o Instituto de Pesquisas Econômicas Aplicadas (IPEA, 2019), é de 7,9 milhões de moradias em todo o país, correspondente a 14,9% do total de domicílios. Este número evidencia a necessidade de um grande volume de habitações que precisam ser construídas.

Numa tentativa de solucionar o déficit habitacional, os programas sociais lançados pelos governos federal e estadual proporcionaram à população a aquisição de residências caracterizadas pelas dimensões mínimas, materiais de baixa qualidade e implantações impessoais com numerosas casas em série, revelando a desconsideração das diversidades climática, cultural, socioeconômica e tecnológica existentes num país de território tão vasto, segundo Bonduki, (2011).

Dessa forma, o problema de pesquisa se dá na obtenção de uma análise do desempenho NZEB em edificações destinadas à HIS no sul do Brasil, considerando as propriedades térmicas do envelope que melhor atendem à obtenção de uma edificação NZEB e sua geração de energia, através da tecnologia fotovoltaica.

## **1.3 Justificativa**

Pode-se concluir, pelos fatos apresentados, que soluções devem ser reformuladas para a problemática habitacional brasileira na busca do aumento da qualidade nas edificações populares em termos de conforto e sustentabilidade, mantendo sua viabilidade econômica para produtores e consumidores.

Assim, o presente estudo contribuirá para a comunidade acadêmica e para os profissionais da área da construção civil em geral, servindo como base para discussões e ampliações de estudos para o desenvolvimento de projetos de HIS mais eficientes, preocupados com o conforto térmico, e levando em

consideração a eficiência energética, propondo o alcance do desempenho NZEB e buscando um equilíbrio entre a qualidade do ambiente construído, o baixo consumo energético e a geração própria de energia, por meio da tecnologia FV.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo Geral**

O objetivo geral do presente estudo é apresentar uma análise da viabilidade do conceito NZEB para o uso residencial multifamiliar de interesse social no contexto climático do sul do Brasil, mais especificamente na zona bioclimática 2 (ZB2).

### **1.4.2 Objetivos Específicos**

Os objetivos específicos relevantes deste trabalho são:

- Estabelecer o projeto padrão de HIS no sul do Brasil (condição de Caso Base);
- Avaliar indicadores de desempenho termoenergético do projeto padrão;
- Determinar as propriedades térmicas do envelope que melhor atendem à obtenção de uma edificação NZEB de uso residencial multifamiliar e interesse social na ZB2;
- Caracterizar a importância da qualidade do projeto para atingir o conceito NZEB;
- Realizar uma viabilidade econômica dos Casos estudados.

## **1.5 Estrutura do trabalho**

O trabalho foi estruturado em cinco capítulos, onde, o primeiro apresenta uma breve introdução acerca do tema principal, o problema de pesquisa, a justificativa para realização do estudo, o objetivo geral e os específicos e a estrutura do trabalho.

No segundo capítulo é apresentada a revisão de literatura, abordando temas referentes ao consumo energético mundial e brasileiro, assim como o contexto histórico das edificações NZEB, *Passivhaus*, *Passiv-On* e Habitações

de Interesse Social.

No terceiro capítulo é apresentada a metodologia aplicada ao estudo. Dividida em quatro etapas, que são organizadas da seguinte forma:

- Etapa 1: Definição do projeto a ser avaliado na condição de Caso Base;
- Etapa 2: Avaliação do desempenho termoenergético do Caso Base, através da modelagem e configuração dos modelos numéricos;
- Etapa 3: Otimização das propriedades térmicas do envelope, por meio da definição das variáveis ótimas, a fim de determinar as propriedades térmicas do envelope que melhor atendem à obtenção de uma edificação NZEB;
- Etapa 4: Realização do equilíbrio entre a eficiência e a geração de energia fotovoltaica.

No quarto capítulo são apresentados e discutidos os resultados. Por fim, o quinto e último capítulo versa sobre a conclusão, assim como as considerações finais, delimitações encontradas no trabalho e propostas de continuidade.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Contexto mundial

#### 2.1.1 Cenário histórico

Ao longo da história, o homem desenvolveu sucessivas atividades que permitiram ter acesso a quantidades de energia cada vez maiores, para possibilitar atender às demandas, também, cada vez maiores, sem grande preocupação e ações para sua preservação. Com o desenvolvimento socioeconômico da humanidade, tem existido uma tendência crescente para o uso de reservas naturais como o petróleo, carvão ou o gás natural.

A sociedade tornou-se consumidora intensiva de energia e atualmente enfrenta dois problemas relacionados entre si: o iminente esgotamento dos recursos de combustíveis fósseis e as preocupações ambientais com a emissão de gases do efeito estufa, devido a queima desses combustíveis. Juntamente com estes fatores, somam-se as razões econômicas e os riscos de dependência geoestratégica de produtores de petróleo e gás natural em regiões instáveis. Fazendo com que, se torne tema central da atualidade a diversificação destas fontes de energia, preferencialmente por outras não poluentes. Em função disso, pode-se afirmar que a manutenção dos padrões de vida da sociedade depende da capacidade de se construir sistemas energéticos ambientalmente sustentáveis (DA CUNHA, 2015; LABORDA, 2015).

A primeira conferência mundial para debater este tema ocorreu entre 5 e 16 de junho de 1972, em Estocolmo, por iniciativa das Nações Unidas (PÉREZ-LOMBARD et al., 2009. p.2).

Em 1992, as Nações Unidas organizaram uma nova conferência, no Rio de Janeiro, com o objetivo de criar uma agenda para a mudança, um plano de ação para alterar a situação mundial, e assinar um tratado (UNFCCC – *United Nations Framework Convention on Climate Change*) com o comprometimento dos países por esta causa, tendo, no entanto, responsabilidades diferentes em função do seu nível de desenvolvimento econômico (PÉREZ-LOMBARD et al., 2009).

Na Europa, a *European Council Directive 93/76/CEE*, de 1993, definiu a certificação em eficiência energética como uma das bases para a redução da

emissão de CO<sub>2</sub> na atmosfera. Era não obrigatória e não teve muita repercussão entre os estados da União Europeia (PÉREZ-LOMBARD *et al.*, 2009).

Um dos protocolos consequentes do tratado UNFCCC foi o de Quioto, este protocolo internacional foi adotado em 11 de dezembro de 1997, na cidade de Quioto, no Japão, entrou em vigor no ano 2005, e foi assinado por 55 países, com o objetivo de limitar e monitorar as emissões de gases de efeito estufa, no período de 2008 a 2012, foi reduzido em pelo menos 5%, as emissões registradas do ano 1990 (ADENE 2014).

Este cenário exige que o setor das edificações adote novas práticas e técnicas na construção e que se disponibilizem instrumentos financeiros para apostar em novas tecnologias (DA CUNHA, 2015; IEA, 2016).

Um impulso importante foi dado em 2002, com a criação do regulamento *Energy Performance of Buildings Directive* (EPBD), pela União Europeia (LEIPZIGER, 2013). Segundo Pérez-Lombard *et al.* (2009), essa diretiva, chamada 2002/91/EC, foi melhorada em relação àquela de 1993, mas também, não muito clara, deixou algumas definições em aberto. Ela exigia a certificação de edificações, mas não continha a definição exata do que seria a eficiência energética de edifícios e nem a forma precisa de como realizar as medições, criando dúvidas para sua implementação. Para Leipziger (2013), apesar disso foi bem-sucedida no aspecto de ter sido seguida pela criação de classificações energéticas em 31 países europeus.

Em 2007, foi publicada a norma europeia EN 15217, a qual detalhou meios de expressar a eficiência energética e como deveriam ser feitas as certificações nas edificações (PÉREZ-LOMBARD *et al.*, 2009).

Nesta conjuntura, começam a surgir políticas para a disseminação do conceito ZEB – *Zero Energy Buildings*. Em 2010, a União Europeia publicou a diretiva 2010/31/EU - EPBD, estabelecendo que os estados membros deviam garantir que, em 31 de dezembro de 2018, as novas edificações públicas fossem NZEB, e a partir de 31 de dezembro de 2020 essa regra valeria para todas as novas edificações. Em seu contexto, busca obter maior eficiência energética nas cidades e reduzir a emissão de gases de efeito estufa na atmosfera (EPBD, 2010).

Cabe salientar que, edificações nZEB, possuem um consumo líquido de

energia próximo (*nearly*) de zero, identificados pelo “n” minúsculo na sigla (VOSS, 2011; TORCELLINI, 2006). Enquanto, as edificações de consumo energético líquido nulo NZEB, cujo “N” maiúsculo identifica “*net*”, se diferenciam dos nZEB, segundo Torcellini *et al.* (2006).

A Diretiva Desempenho Energético de Edificações da União Europeia estabelece conceitos e princípios para obtenção de consumo líquido próximo de zero (nZEB), ao invés de nulo (NZEB) (Parlamento Europeu; Conselho da UE, 2010).

Dessa forma, a norma europeia tem conduzido os países europeus a adotarem definições NZEB e a formarem políticas nacionais para sua implementação (ENTRANZE, 2008).

No Brasil, na Portaria nº 309, de 6 de setembro de 2022, aprovou as Instruções Normativas e os Requisitos de Avaliação da Conformidade para a Eficiência Energética das Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas e Residenciais - Consolidado. É conceituado NZEB: Edificação de energia quase zero e por isso no presente trabalho foi adotado esse termo.

O estabelecido pela Diretiva EPBD dispõe que os Estados-Membros elaborem planos nacionais para aumentar o número de NZEBs, os quais devem incluir: um indicador numérico de energia primária, objetivos intermédios, medidas políticas, financeiras e de outros tipos para apoiar a implementação de NZEBs, incluindo medidas nacionais e requisitos a respeito da utilização de fontes de energia renováveis (EUROPEAN COMMISSION, 2013; VEIGA, 2015).

Cada Estado-Membro deve estabelecer a sua própria definição de NZEB dispondo, pelo menos, de um valor limite para o indicador numérico de utilização de energia primária. Uma definição de NZEB pode adicionar em paralelo outros indicadores de desempenho energético, sendo, no entanto, sempre obrigatório estabelecer o indicador de energia primária (VEIGA, 2015).

A fim de estabelecer os valores de referência para os indicadores de desempenho energético, o Estado-Membro deve considerar (REHVA, 2013) (VEIGA, 2015):

- Nível de consumo de energia primária técnica e razoavelmente alcançável, que significa a comparação com os valores de referência nacionais para cada tipo de edifício;
- Porcentagem de energia primária coberta por fontes de energia renovável;
- Incentivos financeiros disponíveis para utilização de

energias renováveis ou medidas de eficiência energética; • Implicações em termos de custos e nível de ambição da definição.

Segundo a reformulação do EPBD (2010), os Estados-Membros devem definir edifícios de referência caracterizados e representativos pela sua funcionalidade e localização geográfica, atendendo inclusive às condições climáticas internas e externas. Os indicadores de desempenho energético dos edifícios de referência devem ser calculados com base num quadro de metodologia definido de forma clara, o qual deve incluir (REHVA, 2013):

- Definição das fronteiras do sistema a considerar, ou seja, quais os fluxos energéticos que devem ser considerados no balanço energético;
- Conjunto de dados climáticos de referência numa base anual (os quais são utilizados para determinar a procura e a geração de energia dos edifícios de referência);
- Conjunto de dados referentes aos padrões de conforto e sistemas técnicos utilizados no edifício, de forma a avaliar as necessidades de energia final dos edifícios de referência. O conjunto de dados de referência é utilizado para determinar o desempenho energético na fase de projeto (VEIGA, 2015).

### **2.1.2 Edifícios NZEB**

Para definir qualquer construção como NZEB (com energia próxima de zero), importa quantificar e especificar os fluxos energéticos considerados, essa especificação constitui a referência fundamental para os indicadores energéticos. Tipicamente, as necessidades de energia dos edifícios incluem aquecimento, resfriamento, ventilação, iluminação e outros equipamentos. A energia fornecida aos edifícios pode ser elétrica, térmica de redes urbanas de distribuição de calor e frio, bem como, combustíveis de origem renovável ou de origem não renovável. A energia líquida fornecida é a energia total da rede menos a energia entregue (exportada) à rede. A energia de origem renovável produzida localmente é a energia produzida a partir de fontes renováveis (KURNITSKI, 2013).

Freitas *et al.* (2013) apontam que “as tecnologias existentes aliadas a estratégias e soluções de projeto podem fazer com que o edifício atinja o conceito NZEB.” Ou seja, uma construção eficiente, que no final do ciclo de um ano possa

ser capaz de gerar tanta energia quanto sua necessidade de consumo. Essas edificações possuem um desempenho energético elevado com o mínimo consumo de energia (DA CUNHA, 2015).

A fim de comunicar às partes interessadas sobre as características de sustentabilidade de edifícios, foram criados sistemas de etiquetagem e certificação.

Parker (2009) realizou uma revisão sobre casas de baixa energia nos Estados Unidos, onde três fases podem ser notadas. Casas solares ativas nas décadas de 1950 e 1960, casas solares passivas nas décadas de 1960 e 1970, culminando nas casas super isoladas, a partir da segunda metade da década de 1970. Sabendo que, na energia solar ativa há um processo de transformação de energia, por meio de painéis fotovoltaicos, onde é transformada em energia elétrica ou através de painéis solares, é transformada em energia térmica. Cabe também salientar que, a energia solar passiva utiliza técnicas que permitem que a energia solar seja aproveitada diretamente sem ter que transformá-la.

A primeira referência do uso da denominação edifício de energia zero encontrada na revisão ocorreu em 1975 na Dinamarca com a *Nullenergihuset* (Casa de Energia Zero). A Casa de Energia Zero foi um edifício residencial de pesquisa construído pela Universidade Técnica da Dinamarca (ESBENSEN e KORSGAARD, 1977; SEIFERT, 2008). Cabe salientar ainda que, a Dinamarca foi o país pioneiro na criação de uma classificação de eficiência energética, primeiro para edifícios comerciais (1992) e depois para edificações residenciais (1993) (LEIPZIGER, 2013).

Segundo Charron e Athienitis (2006) o primeiro edifício de energia zero, encontrado na revisão, conectado à rede, foi na data de 1980. A casa *Carlise*, nos Estados Unidos, utilizava um sistema fotovoltaico de 7,5 kWp de potência e 14 m<sup>2</sup> de coletores solares.

A adoção destas tecnologias foi lenta no início. Segundo Shurcliff (1986) em 1973 existiam somente cerca de trinta casas solares, sendo que a maioria era do tipo ativo. No entanto, em 1986 já existiam mais de cinquenta mil casas solares do tipo solar passivo. Destacando que, na energia solar passiva, o objetivo é aproveitar a luz solar direta, sem outra forma de energia.

Entre 1958-1959, foi construída a *Solar House IV*. A estratégia utilizava

60m<sup>2</sup> de coletores solares ativos, conforme citado anteriormente, que com a energia coletada, supriam 57% das necessidades energéticas de aquecimento de calefação e aquecimento de água. Nessa época os esforços concentravam-se em criar casas solares ativas. A Figura 1 apresenta das quatro Solar Houses.



Figura 1 - MIT Solar House I a IV. Fonte: Parker (2009).

Os sistemas ativos solares, são caros e complexos e por isso foram abandonados a favor de sistemas solares passivos, devido crise energética da década 1970 (PARKER, 2009).

Em 1976, uma equipe de simulação de desempenho energético em edificações desenvolveu um projeto chamado *Lo-Cal House*, baseados em simulações de desempenho de energia. A equipe era liderada pelo professor Wayne Schick, no *Small Homes Council* da universidade de Illinois em Urbana (EUA). O projeto foi pensado para o clima de *Madison, Wisconsin*, localizado no hemisfério norte e nunca foi construído, mas revelou-se inspirador para futuros projetos. O projeto desta casa apresentava níveis de isolamento térmico elevados para a prática da época (resistência térmica de 18,8 K.m<sup>2</sup>/W, 5,4 K.m<sup>2</sup>/W e 3,6 K.m<sup>2</sup>/W para cobertura, paredes e piso, respectivamente). Apresentava também alto grau de estanqueidade, ganhos solares passivos com a maior área da zona envidraçada na fachada sul e ventilação providenciada por um recuperador de calor, segundo Parker (2009).

O conjunto destas estratégias foi chamado de casa super isolada, sendo creditada ao professor Wayne Schick a criação do termo (HOLLADAY, 2010). Fornecendo o arcabouço teórico para a norma *Passivhaus* e R2000. No entanto, segundo Shurcliff (1986) trabalhando de forma independente, no estado de Nova York, Richard Bentley, na cidade de *Tupper Lake*, e *Bruce Brownell*, na cidade de *Edinburgh*, construíram casas baseadas nos mesmos princípios em meados da década de 1970. Adicionalmente, no Alaska, Edward McGrath também construiu casas super isoladas. Em todos os casos, os construtores reportaram reduções

no consumo energético com reduzidos custos incrementais.

Outro exemplo inclui a “*Vagn Korsgaard Zero Energy House*” na Dinamarca (ESBENSEN e KORSGAARD, 1977) que possuía coletores solares e depósitos de água para armazenamento, concebidos para aquecimento do ambiente e água quente sanitária, usada para fins de banheiros, chuveiros e usos de limpeza como máquina de lavar louça, roupa e etc. Assim como, a “*Saskatchewan Conservation House*” (BESANT et al., 1979), como citada acima.

Em 1979 a *Leger Superinsulated House* foi construída em *East Pepperell, Massachusetts* e influenciou a construção de mais habitações super isoladas nos Estados Unidos (PARKER, 2009; SHURCLIFF, 1986a).

O projeto “*Philips Experimental House Project*” de 1984, localizado na Alemanha, foi elaborado com contornos diferentes, mas igualmente importantes na evolução do conceito, possui construção em madeira com elevados níveis de isolamento, janelas com vidro duplo de baixa emissividade, sistema de ventilação com recuperação de calor com 90% de eficiência, assim como, pré-aquecimento e pré-resfriamento do ar através de trocas térmicas com o solo. As necessidades de aquecimento foram estimadas em 20/30 kWh/(m<sup>2</sup>a) correspondendo a um valor aproximado ao de uma *Passivhaus* (STEINMÜLLER, 2008).

Por volta dos anos 2000, houve um edifício de energia zero solar pré-fabricado construído no Japão, a Casa de Energia Zero, que apresentava um sistema de geração fotovoltaica com potência de 10 kWp, sistemas de ar condicionado e água quente doméstica através de bombas de calor para maior eficiência. O isolamento térmico foi duplicado em relação à prática de mercado japonesa da época. Segundo Isamu (2000), este edifício ultrapassava a marca de edifício de energia zero, gerando mais energia que a consumia em um ano.

Em 2001, nos Estados Unidos um projeto de demonstração na zona de Washington DC, tentava a alcançar a marca edifício de energia zero, segundo Parker (2009). O *Solar Patriot House* ou *Hathaway House* foi construído para mostrar o potencial de edificações eficientes num clima misto.

Essas tentativas iniciais apontavam estratégias para um balanço nulo do ponto de vista térmico e não energético. Embora não exista nenhuma abordagem exata para a concepção e realização de edifícios de balanço energético nulo, existe um consenso que esta meta pode ser alcançada na sequência da

implementação de design passivo (AELENEI *et al.*, 2012; AELENEI *et al.*, 2013).

Assim, estratégias bioclimáticas promovem as condições do clima local a interagirem positivamente com o edifício, ajudando a criar as condições de conforto térmico adequadas a cada espaço. Usando dispositivos construtivos integrados nas construções, cujo objetivo é o de contribuir para o seu aquecimento ou resfriamento natural, que a maior parte dos edifícios de balanço energético nulo são hoje concebidos (GONÇALVES & GRAÇA, 2004).

O tema NZEB tem sido muito abordado, visando a partilha de conhecimentos, experiências e manifestando a necessidade de convergência de conceitos e metodologias comuns. O grupo de trabalho Task SHC 40 – ECBS Annex 52 “Towards Net Zero Energy Solar Buildings” da Agência Intencional de Energia (AIE), elaborou um relatório em 2014 sobre 30 edifícios de elevado desempenho energético compatíveis com NZEB em climas distintos, onde se descrevem as soluções técnicas, custos de construção, metas de desempenho energético e monitoramento de desempenho real (ECB Annex 52, 2014). O resultado pretendido pelo grupo de trabalho é o de apoiar a transformação do conceito NZEB de uma ideia para uma realidade prática no mercado.

Na Figura 2, se apresentam NZEBs corretamente dimensionadas, para o caso particular de edificações residenciais, em climas que o aquecimento e o resfriamento são predominantes, assim como na Tabela 1, um quadro comparativo do consumo energético destas edificações residenciais NZEB, ambos disponíveis pela base de dados da AIE, SHC Task 40 ECBCS Annex 52.



Figura 2 - Exemplos de edifícios residenciais NZEB com necessidades de aquecimento e resfriamento. Fonte: ECB Annex 52, (2014).

Tabela 1 – Comparativo do balanço energético das edificações residenciais NZEB.

Localidade	Nome do projeto	Arquiteto	Balanço de Energia (kWh/m <sup>2</sup> . ano)	Classificação climática de Köppen
Taastrup, Dinamarca	Energy Flex House	Henning Larsens Architects	28	Cfb (clima temperado oceânico)
Córsega, França	Le Charpak	Villa & Battesti	11	Csa (clima de verão seco)
Ancona, Itália	Leaf House	MEP	74	Cfa (clima subtropical úmido)
Údine, Itália	Casa Zero Energy	Arnaldo Savorelli	17	Cfa (clima subtropical úmido)
Barcelona, Espanha	Lima	J. Sabate, C. Peters, H. Espe	57	Csa (clima de verão seco)

Fonte: ECB Annex 52, (2014). Adaptado pela autora.

O primeiro exemplo é o *EnergyFlexHouse*, na Dinamarca, edifício de baixa energia com aquecimento solar, bombas de calor e energia fotovoltaica, em operação desde 2009. Na qual, a produção de energia fotovoltaica torna a energia da edificação neutra. Janelas estrategicamente posicionadas fornecem luz solar e energia solar passiva. A ventilação natural controlada e o sombreamento solar aumentam o conforto. Consiste em 2 casas unifamiliares de dois andares, cada uma com uma área bruta aquecida de 216 m<sup>2</sup>. O *EnergyFlexFamily* é um laboratório vivo, seu foco tem sido a obtenção anual de neutralidade energética, bom conforto interno e utilização da luz do dia, segundo ECB Annex 52, (2014).

Como segundo exemplo, é apresentado o edifício *Le Charpak*, concluído em 2011 na França, para atender a um critério de desempenho energético de 11 kWh/m<sup>2</sup>.ano. Para isso, são monitoradas as condições externas, o consumo de energia e as condições ambientais internas. Um sistema de água solar é usado para aquecimento ambiente e de água. A estrutura principal deste edifício é de concreto, no entanto, as fachadas ao leste e oeste são construídas a partir de estofado de celulose com painéis de fibra de madeira em ambos os lados. O edifício

possui sombreamento e ventilação noturna natural, assim como paredes, piso e teto de alta massa térmica, conforme ECB Annex 52, (2014).

Outro projeto citado é o *Leaf House* concluído em 2008, na Itália, que é uma habitação rural italiana, autônoma e sustentável, onde todos os recursos são explorados. Suas principais características incluem fachadas principais voltadas para as orientações norte e sul, paredes delimitadoras de alta massa térmica, superfícies envidraçadas na fachada sul, forma compacta, para aumentar seu desempenho térmico e um grande painel fotovoltaico (ECB Annex 52, 2014).

Também na Itália, desde 2010, a Casa Zero Energy, é uma habitação bioclimática com baixo consumo energético, na qual a energia renovável fornece a maioria de suas demandas. Sua construção é isolada, sua forma e orientação foram otimizadas para maximizar os ganhos de calor solar e ventilação natural. Possui vários elementos naturais, como plantas e árvores, para permitir a entrada da luz do sol e mitigar a brisa do lado norte, de acordo com ECB Annex 52, (2014).

Como último exemplo do relatório ECB Annex 52, para edificações residenciais NZEB, com necessidades de aquecimento e resfriamento, tem-se a edificação Lima, ainda em teste, em Barcelona na Espanha, elaborado para minimizar as cargas de aquecimento e resfriamento, com projeto compacto, altos níveis de isolamento, massa térmica, fachada de ventilação e proteção solar, com finalidade de ter um alto padrão de construção de baixo impacto.

### **2.1.3 O standard *Passivhaus***

A partir do cenário NZEB, com a intenção de certificação e o estabelecimento de certos parâmetros, surgiu o conceito *Passivhaus*, que é muito disseminado na Europa, com objetivo de desenvolver princípios construtivos de edificações com baixo consumo energético, através da estanqueidade, controle de ventilação, isolamento, pontes térmicas e esquadrias de elevado desempenho.

O *standard Passivhaus* é um conceito de construção que possui o objetivo de proporcionar uma edificação com conforto e qualidade do ar interior com consumo mínimo de energia. Foi desenvolvido por Bo Adamson e Wolfgang Feist, em 1988, na Alemanha. O primeiro protótipo foi construído em 1991, na cidade alemã Darmstadt. A construção foi monitorada de modo a verificar seu

desempenho e com isso registrou-se uma economia de 90% no consumo de energia, em comparação à construção tradicional (PASSIPEDIA, 2018).

A norma é apontada como uma das soluções de referência, em particular no caso habitacional. Sendo reconhecida internacionalmente por ser a base para edificações NZEB, exigidas na UE (WASSOUF, 2014). A *Passivhaus* é um conceito construtivo que define um padrão que é, eficiente sob o ponto de vista energético, confortável e ecológico. Trata-se de uma norma que assenta no desempenho dos edifícios e que obriga ao cumprimento de requisitos muito objetivos. A *Passivhaus* é o mais elevado padrão de eficiência energética a nível mundial: a economia de energia atinge 75% em comparação com edifícios convencionais. Sua eficiência em climas frios já foi comprovada, os autores afirmam que sua aplicação fornece um ambiente interior muito confortável e saudável, com custos de investimento razoáveis na Europa (PASSIPEDIA, 2018b).

Segundo o *PassivHausInstitute*, os critérios mínimos para uma edificação ser considerada *Passivhaus* são:

- A demanda de aquecimento não pode ultrapassar 15 kWh/m<sup>2</sup>ano;
- O sobreaquecimento não pode ultrapassar 10% das horas do ano à temperatura de 25°C;
- A demanda de energia primária não pode exceder 120 kWh/m<sup>2</sup>ano;
- Deve-se evitar as pontes térmicas;
- Apresentar um índice de 0,6 na renovação do ar ambiente por hora (PHPP, 2006).

Dessa forma, para garantir os padrões *Passivhaus* é necessário definir soluções através de estratégias solares passivas, sendo elas, de acordo com Weizsäcker *et al.*, (2009):

- Sempre que possível os edifícios devem ter uma forma compacta, para reduzir a sua área de exposição, e possuir cerca de 75% de envidraçados orientados ao sul (hemisfério norte);
- Garantir níveis adequados de isolamento térmico nos elementos construtivos da envoltória;
- Aplicação de esquadrias com elevado desempenho térmico;
- Demanda de refrigeração não pode ultrapassar 15 kWh/m<sup>2</sup>ano;
- Sistema de ventilação com recuperação do calor: o sistema deve ter uma eficiência superior a 75% para garantir a qualidade do ar interno e o conforto dos usuários;
- Sistemas eficientes para geração de calor/frio: em adição ao recuperador de calor ou pequena bomba de calor.

O primeiro passo para atingir a meta do balanço energético nulo é diminuir as necessidades de energia através da implementação de medidas de eficiência

energética, o que por sua vez começa pela integração do design solar passivo e continua com a utilização de sistemas energeticamente eficientes conduzindo a consumos menores, através da otimização dos recursos disponíveis, mantendo a quantidade do valor energético. O segundo passo é a produção de energia através de sistemas de captação das energias renováveis, segundo Weizsäcker *et al.*, (2009). A *Passivhaus* possui experiência assimilada e por isso, tem ganho adeptos por toda a Europa, havendo já registros de construções no Japão e na Coreia do Sul, sendo que a maior parte se encontra na Alemanha, Áustria e Suíça. Em termos globais, um edifício *Passivhaus* é um edifício com um clima interno confortável mantido sem sistemas ativos de aquecimento ou resfriamento (FEIST, 2006a, 2011; PASSIVE ON, 2007a; SCHNIEDERS, 2009).

Assim, o sucesso da norma *Passivhaus* na redução do consumo energético de climatização em climas frios desencadeou uma busca de aplicação deste modelo a outros climas. Especificamente, existem esforços para a adaptação e adoção da norma *Passivhaus* no contexto tropical e no território brasileiro (LAUSTSEN, 2011; PASSIPEDIA, 2013).

Para climas quentes não existe uma norma equivalente à *Passivhaus*, que inclua um sistema tão completo e comprovado em campo.

A adoção de modelos concebidos para climas frios em contextos tropicais nem sempre é aconselhável, já que o isolamento térmico pode provocar o sobreaquecimento até em climas frios, como no contexto europeu, segundo Jelle *et al.*, (2010), Badescu *et al.*, (2011); McLeod *et al.*, (2013); Mlakar; Štrancar, (2011); *Passive On*, (2007a); Schnieders, (2009), podendo causar assim, problemas maiores em climas quentes.

Além das dúvidas da adequação do modelo super isolado para climas quentes, no Brasil, é necessário, também, analisar a adequação deste modelo nas regiões brasileiras onde o desconforto por frio predomina. As temperaturas do ar, em tais regiões, seriam consideradas amenas em termos europeus, comparando-se às condições climáticas do Sul da Europa, mas com cargas radiantes mais intensas. Para tais regiões, o modelo *Passivhaus* ainda não tem especificações comprovadas em campo. Não está claro, portanto, que o modelo super isolado é necessário ou o mais adequado para as condições climáticas de frio brasileiras.

De Freitas, (2013) definiu que nos climas mais amenos, como no Brasil, atender aos princípios da certificação *Passivhaus* torna-se mais difícil, considerando as condições de conforto no verão, para evitar o superaquecimento do edifício. A viabilidade da concepção de um projeto segundo os requisitos *Passivhaus* é conseguida adaptando o conceito para o nosso clima, utilizando requisitos e valores menos exigentes de transmitância térmica da envoltória opaca e fechamentos transparentes e realizando algumas alterações no sistema construtivo e equipamentos, como o uso de sistema de ventilação com recuperação de calor e sistema construtivo com baixa transmitância térmica, diferente de uma construção convencional.

Em 2014, Tubelo, Rodrigues e Gillott, compararam o regulamento brasileiro, RTQ-R, com o standard *Passivhaus*, destacaram a natureza diferente dos requisitos e metas das normas adotadas, além dos benefícios e restrições de ambos. Foi desenvolvida uma revisão comparativa do RTQ-R e da certificação *Passivhaus*, como forma de realizar um debate mais amplo sobre as normas de construção, diante das atuais necessidades dos governos para aumentar a eficiência energética.

Em 2016 foi realizado na Universidade Federal de Pelotas o congresso “Casa Passiva Brasil” com o objetivo de explorar a possibilidade de adaptação do sistema *Passivhaus* à realidade do clima brasileiro, todas as apresentações ficaram à disposição na página da Universidade e foram utilizadas como ponto de partida do trabalho (DALBEM *et al.*,2015).

De acordo com Dalbem *et al.* (2017), ainda existem desafios para a implantação do conceito *PassivHaus* no Brasil, como encontrar soluções construtivas e componentes que atendam às exigências da certificação. Também existe a necessidade de novos estudos a fim de analisar a integração do sistema de ventilação mecânica com ventilação natural ao longo dos diferentes períodos no ano, com o objetivo de reduzir o consumo para resfriamento, já que um recuperador de calor como prevê o *standard* torna o investimento alto e dificulta sua implantação.

Em 2018, a primeira *PassivHaus* da América Latina foi inaugurada em Natal, estado do Rio Grande do Norte no Brasil, localizada no Centro de Educação e Tecnologias SENAI Flávio Azevedo, ainda em fase de testes, a

intenção é ser usada como laboratório e ambiente para cursos dentro da parceria entre o Sistema FIERN e o Governo Alemão. A edificação é dividida em quatro cômodos (sala, quarto, cozinha e banheiro), e possui 80m<sup>2</sup> de área construída (SUSTENTARQUI). Contudo, fica o questionamento se em Natal seria adequado adotar uma norma destinada ao clima frio para uma residência localizada no clima tropical úmido (classificação climática de Köppen - A<sub>w</sub>), que tem grandes chances de apresentar sobreaquecimento na aplicação deste standard, em função das características do clima local.

Vettorazzi (2019) adaptou estratégias do conceito *Passivhaus* a residências unifamiliares da Região Sul do Brasil, verificando qual o seu desempenho termoenergético e identificando quais as implicações no projeto arquitetônico. O estudo de caso foi constituído por três edificações residenciais unifamiliares, construídas com estratégias passivas básicas nas Zonas Bioclimáticas ZB<sub>1</sub>, ZB<sub>2</sub> e ZB<sub>3</sub> da Região Sul-Brasileira. Sendo realizada a avaliação termoenergética das edificações através da classificação do nível de eficiência energética da envoltória segundo os Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R). Foram determinadas as estratégias do conceito *Passivhaus* e verificado o desempenho termoenergético para cada uma das edificações em estudo, através de simulações computacionais. Assim, foram otimizadas as dimensões dos elementos de controle solar, as dimensões das janelas, com e sem a otimização das estratégias *Passivhaus* das Edificações Referenciais. Como resultado, foi verificada a utilização do conceito *Passivhaus* há uma redução entre 55,1% e 83,5% no consumo energético e entre 73,7% e 86,2% no desconforto térmico numa base anual de conforto entre os 20-26°C. Porém, com o conceito *Passivhaus* combinado com a otimização das dimensões das janelas e dos elementos de controle solar, obteve-se um desempenho termoenergético superior, com reduções do consumo energético, com relação à climatização, entre 75,1% a 91,3% e do desconforto térmico entre 89,1% a 92,7%, embora haja maior interferência no projeto arquitetônico. Sem a adoção das estratégias do conceito *Passivhaus* e otimizando-se apenas as dimensões das janelas e sombreamentos das edificações referenciais, conseguiu-se uma melhoria no desempenho termoenergético relativamente baixa, com redução entre 5,3% e

10,9% do consumo energético e entre 5,8% e 8,7% do desconforto térmico. Contudo, nesse último caso, os resultados revelaram alterações significativas na definição das dimensões das janelas e dos elementos de controle solar externos. Conclui-se que, para as edificações das Zonas Bioclimáticas ZB<sub>1</sub>, ZB<sub>2</sub> e ZB<sub>3</sub> da Região Sul do Brasil que já possuem estratégias passivas básicas na sua concepção projetual, é possível utilizar o conceito *Passivhaus* sem interferir nas dimensões de janelas e nos elementos de controle solar externos, obtendo-se um desempenho termoenergético superior ao exigido pelo conceito *Passivhaus* para climas quentes (*Passiv-On*).

Cabe destacar que, Vettorazzi (2019) adotou o conceito *Passivhaus* com ventilação mecânica através de um recuperador de calor, assim como, altos níveis de isolamento térmico da envoltória e estanqueidade do ar. Dessa forma, é possível identificar a necessidade de estudos sobre a possibilidade da obtenção de resultados semelhantes para o desempenho termoenergético, sem o cumprimento dos preceitos da *Passivhaus*. Já que Dalbem (2018) aponta que no Brasil, para uma HIS, o sistema de ventilação mecânica com recuperador de calor equivale a aproximadamente 50% do investimento adicional de uma edificação *PassivHaus*, com custo real de R\$ 22.640,07, aliado a um generalizado ceticismo sobre a necessidade de uma edificação muito estanque e a obrigatoriedade de uma ventilação mecânica no país.

#### **2.1.4 O projeto *Passiv-On***

Houve a iniciativa de expandir o conceito *Passivhaus* para outro tipo de clima. Dessa forma, surgiu o *Passiv-On* que é um projeto de investigação e disseminação, que tem por objetivo promover casas passivas em regiões, onde o consumo de energia para climatização do espaço interno não resulta somente da procura de casas aquecidas no inverno, mas também, e em alguns casos mais significativamente, em conseguir edificações com clima mais ameno no verão. Entre 2005 e 2007, o projeto *Passiv-on* foi desenvolvido, promovido e coordenado pelo grupo de pesquisa *Efficiency Research Group*, do politécnico de Milão, que estudou a aplicabilidade do standard *Passivhaus* nos climas do Sul da Europa (*Passive-On Project*, 2018).

Segundo o projeto *Passiv-On* (2007b), dependendo das condições

climáticas e do projeto de construção, a necessidade do nível de isolamento térmico pode variar.

Os principais requisitos do conceito *Passiv-On* são: • Necessidades anuais de aquecimento e resfriamento inferiores a 15 kWh/(m<sup>2</sup>.ano); • Estanqueidade ao ar, verificada por um teste de pressurização de acordo com a norma EN 13829 não superior a 0.6 Rph (Rotações por hora à 50 Pa de pressurização). • Consumos de energia primária para aquecimento, resfriamento, aquecimento de águas sanitárias e gastos elétricos devem ser inferiores a 120 kWh/(m<sup>2</sup>.ano); • Temperatura interior do edifício mínima de 20°C no inverno e máxima de 26°C no verão; • Temperatura excessiva, acima dos 26°C, não pode ocorrer em mais do que 10% do tempo (*Passiv-On*, 2007).

É importante salientar, que as diferenças dos conceitos da norma para os países do Centro/Norte e países do Sul da Europa, centram-se na introdução do valor limite para as necessidades de resfriamento de 15 kWh/(m<sup>2</sup>.ano) e na introdução de um critério de conforto de temperatura no verão (a temperatura operativa dos espaços permanece entre a faixa de conforto definida na norma EN 15251, ou abaixo dos 26 °C, se existir um sistema principal de resfriamento ativo) (*Passiv-On*, 2007).

Nesse contexto, foram apresentados exemplos de aplicação do *Passiv-On*, nos cinco países parceiros: França, Espanha, Portugal, Itália e o Reino Unido, sob condições climáticas e socioeconômicas distintas daqueles originais de aplicação na Alemanha (*Passiv-On*, 2007).

A análise do desempenho das propostas foi efetuada com um programa de simulação em regime dinâmico. Essa análise procurou explorar os limites das necessidades de aquecimento e resfriamento para as localizações e a aplicabilidade da norma proposta (*Passiv-On*, 2007).

Percebeu-se que as cargas de aquecimento são relativamente baixas na maioria dos países do sul da Europa e em geral são inferiores ao limite de 15kWh/m<sup>2</sup>.ano. Porém, são reduzidas comparativamente aos consumos energéticos de outros equipamentos como o aquecimento de água e iluminação. Em alguns casos considera-se as cargas de resfriamento, no entanto, elas podem ser obtidas totalmente com estratégias passivas (*Passiv-On*, 2007).

Isto levou a uma grande quantidade de soluções de desenho refletidas

nas propostas nacionais a serem descritas. Estas mostram que é possível projetar casas confortáveis de baixo consumo energético se forem adaptadas a uma série de soluções apropriadas que podem evitar o uso de sistemas ativos de resfriamento em muitas localizações (*Passiv-On*, 2007).

#### **2.1.4.1 Exemplos de aplicação do projeto *Passiv-On***

No Reino Unido houve uma proposta unifamiliar com dois pavimentos, um espaço ao norte que atua como antecâmara de entrada, e um ao sul como estufa, assim como, ventilação natural, com controle automatizado de janelas, além da ventilação no topo do espaço da escada - efeito chaminé (*Passiv-On*, 2007). A estratégia ambiental do projeto prevê combinar a ventilação natural com uma grande capacidade térmica interna. As necessidades deste projeto foram estimadas em 13,8 kWh/m<sup>2</sup>.ano cumprindo assim, o limite da norma *Passivhaus* de 15 kWh/m<sup>2</sup>.ano. O custo extra comparado com uma habitação típica é de 49 £/m<sup>2</sup> com um tempo de retorno do investimento de 19 anos (*Passiv-On*, 2007). Contudo, cabe destacar, que para o contexto brasileiro, tanto o valor, como o período de retorno, acabam sendo acima do praticado para investimentos imobiliários.

O projeto espanhol também é residencial, com uma área útil total de 100 m<sup>2</sup>, que considera a orientação solar predominante das fachadas ao sul, com maior área envidraçada (cerca de 50%), aumentando assim, a área de captação solar e diminuindo as necessidades energéticas de aquecimento (*Passiv-On*, 2007), considera também ventilação noturna. O projeto atinge uma redução de energia de 76% se comparado a uma habitação típica (*Passiv-On*, 2007). O custo acrescido da proposta espanhola é cerca de 25 €/m<sup>2</sup>, representando um acréscimo de 5% em relação aos custos típicos de construção (*Passiv-On* 2007).

A proposta portuguesa também é residencial unifamiliar, com área útil total de 110 m<sup>2</sup>. Os três maiores aspectos relevantes são: relação com o sol, ventilação e forte inércia térmica para controlar as variações de temperatura. A radiação solar é capturada diretamente (janelas) e indiretamente (sistemas solares térmicos), grandes janelas são orientadas principalmente para o sul aumentando os ganhos solares durante o inverno. Como proteção solar foram previstos dispositivos de sombreamento nas janelas ao sul, para reduzir a

incidência do sol no verão e persianas em todas as janelas (*Passiv-On*, 2007). É usado um sistema solar térmico, que se estende para o aquecimento do ambiente. As necessidades anuais de aquecimento foram estimadas em 16,9 kWh/m<sup>2</sup>.ano, das quais 11 kWh/m<sup>2</sup>.ano são fornecidas pelo sistema de painéis fotovoltaicos. Assim como, as necessidades de resfriamento foram 3,7 kWh/m<sup>2</sup>.ano. A soma de ambas é de 9,6 kWh/m<sup>2</sup>.ano (*Passiv-On*, 2007). O custo extra da proposta em Portugal é de 57 €/m<sup>2</sup> com um período de retorno do investimento de 12 anos (*Passiv-On*, 2007).

A residência italiana é desenvolvida com base nas soluções de projeto do conceito *Passivhaus* alemão, com elevados níveis de isolamento, inexistência de pontes térmicas e ventilação ativa com recuperação de calor, pois estes são propícios para grande parte da Itália, que possui invernos severos (*Passiv-On*, 2007). Estas soluções podem ser integradas com medidas adicionais para proporcionar uma estratégia passiva efetiva para o resfriamento no verão. Assim, a proposta italiana adota estratégias tradicionais como o sombreamento através de beirais no telhado ou persianas, reduzindo o ganho solar através das janelas. Mais ainda, adota uma estratégia de ventilação natural noturna, podendo ser complementada com sistemas ativos de resfriamento, usando uma bomba de calor reversível de baixo consumo, em dias mais quentes (*Passiv-On*, 2007). Ao utilizar uma estrutura isolada, proporciona uma base efetiva para usar o resfriamento do ar durante a noite, nas estações quentes. No período noturno, o ar atravessa o edifício pelo efeito do vento e das diferenças de pressão, ou ainda, pelo sistema ativo de ventilação (*Passiv-On*, 2007). Há uma economia de energia na ordem dos 924 €/ano, que resulta num tempo de retorno do investimento de cerca de 12 anos (*Passiv-On*, 2007).

O clima no norte da França é bastante semelhante ao da Alemanha, embora um pouco mais ameno devido à influência do Oceano Atlântico. Assim, leva em consideração os conceitos *Passivhaus*. A proposta residencial possui dois andares, é orientada para o sul e analisa dois casos de estudos para climas Mediterrâneos do sul da França, Nice e Carpentras, ambas com classificação climática de Köppen igual a Csa (*Passiv-On*, 2007).

Diante desses exemplos, foi possível perceber que é viável a aplicação de estratégias passivas em diferentes climas e contextos, desde que sejam

respeitadas suas características locais.

Schnieders *et al.* (2015) mostraram, através de simulação dinâmica higrotérmica, que é possível realizar casas passivas residenciais em todas as zonas climáticas relevantes do mundo, representado por Ecaterimburgo, Tóquio, Xangai, Las Vegas, Abu Dhabi e Cingapura. Os autores afirmam que, a demanda anual de energia resultante para condicionamento do espaço de casas passivas é 75 a 95% menor do que a de um edifício tradicional. Para climas com frio intenso ( $-20^{\circ}\text{C}$  a  $-10^{\circ}\text{C}$  no inverno) é necessário usar um excelente isolamento com 50 cm de espessura. Enquanto que, para climas quentes, o isolamento térmico e a espessura podem ser reduzidos para menos de 20 cm, aliado a cor de tinta altamente refletiva (85%) para as superfícies externas, associadas a vidros móveis simples para sombreamento. Dessa forma, Schnieders *et al.* concluíram que os detalhes da construção de casas passivas dependem do clima local, da forma, orientação do *layout* do edifício, situação de sombreamento, dentre outros. Portanto, é necessário determinar a qualidade do componente em cada caso individualmente.

## 2.2 Contexto brasileiro

O Brasil encontra-se em situação privilegiada quando se trata de fontes de energia, pois enquanto o mundo supre apenas 18,2% de suas necessidades a partir de fontes renováveis (SAWIN; RUTOVITZ; SVERRISSON, 2018), o país se insere nesse contexto de forma bastante diversa, com 63,52% de sua oferta interna de energia a partir da geração hidráulica (IEA, *INTERNATIONAL ENERGY AGENCY*, 2021).

Contudo, as usinas hidrelétricas, mesmo fornecendo energia limpa e renovável, apresentam altos impactos sociais e ambientais através das inundações e possível deslocamento de pessoas. Assim como, por serem fontes de energia centralizadas, demandam grande investimento em linhas de transmissão e de distribuição devido a distância entre o local de geração de energia até os centros urbanos (MORISHITA, 2011).

Além disso, não se pode afirmar que há estabilidade nesta condição de oferta de energia renovável, tanto pela perspectiva de crescimento da demanda energética, quanto pela inserção recente de usinas movidas a combustíveis

fósseis na matriz energética nacional (PEREIRA *et al.*, 2012). Assim como, a dependência de apenas uma fonte renovável majoritária é preocupante, no caso de um colapso neste sistema, o país inteiro sofre com a falta de energia.

Sendo assim, é necessário expandir outros meios de energias renováveis que tragam maior segurança, diminuam o custo e principalmente não causem impactos ambientais (FERNANDES e HADDAD, 2019).

Conforme o Balanço Energético Nacional (BEN) de 2020, as edificações representam 52% do consumo de energia elétrica, sendo o setor residencial o maior consumidor, responsável por 26,1%, seguido do setor comercial, com 17,4%, e do setor público, com 8,5% (EPE, 2020). Como é visto na Figura 3.

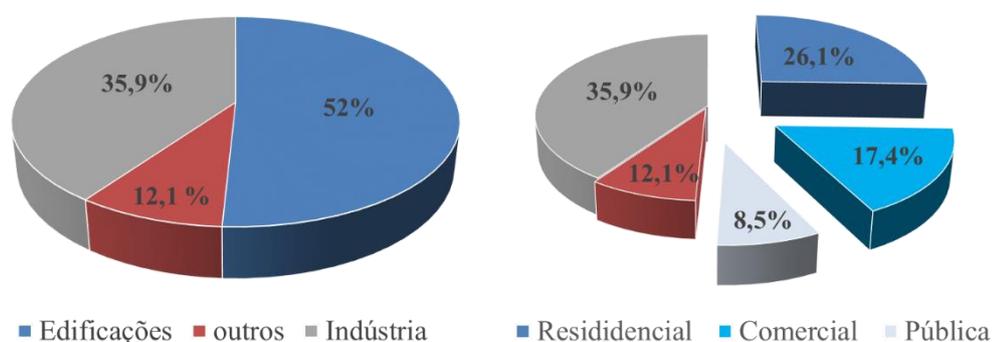


Figura 3 – Distribuição do uso de energia elétrica no Brasil. Fonte: Adaptado de EPE, 2020.

É possível perceber que os edifícios representam uma grande parte do mercado no consumo de energia brasileira, logo uma forma de reduzir a demanda energética passa por tornar este setor mais eficiente, ou seja, é necessário reformular e desenvolver o parque edificado para torná-lo eficiente (GOLDEMBERG e LUCON 2007). O setor residencial vem sendo pesquisado globalmente devido à relevante participação e ao crescimento do consumo de energia elétrica. Portanto, o presente estudo focará nas edificações residenciais, pois como visto, representam o maior consumidor de energia elétrica no país.

### 2.2.1 Consumo de energia das edificações brasileiras

No Brasil, o consumo de energia elétrica pelo setor residencial em 2019 foi de 141.929 GWh, equivalente a 29,4% do consumo total de energia, um aumento de 69,7% em relação ao ano 2000 (EPE, 2019). O setor apresenta alta dependência da rede de fornecimento, uma vez que 99,5% dos domicílios utilizam a energia elétrica proveniente das concessionárias, sendo apenas

0,12% do consumo gerado no próprio domicílio (SIQUEIRA; CORDEIRO JUNIOR; CASTELAR, 2006; ELETROBRAS, 2019). Diante dessa dependência, análises de sensibilidade do consumo por sazonalidade, tarifa e renda familiar são frequentes na literatura. A sensibilidade do consumo do setor à sazonalidade e as variações climáticas foi observada por alguns estudos, sendo verificada a ampliação do uso do ar-condicionado e do ventilador, principalmente nas regiões de clima quente e no verão, e do uso de aquecedores em regiões de clima frio (OLIVEIRA; SILVEIRA; BRAGA, 2000; ALMEIDA; SCHAEFFER; LA ROVERE, 2001; GHISI; GOSCH; LAMBERTS, 2007; ELETROBRAS, 2019).

Na Figura 4 é possível visualizar a estrutura de consumo residencial de energia elétrica por uso final, por categoria de equipamento e por região geográfica no Brasil, nos anos de 2005 e 2019.

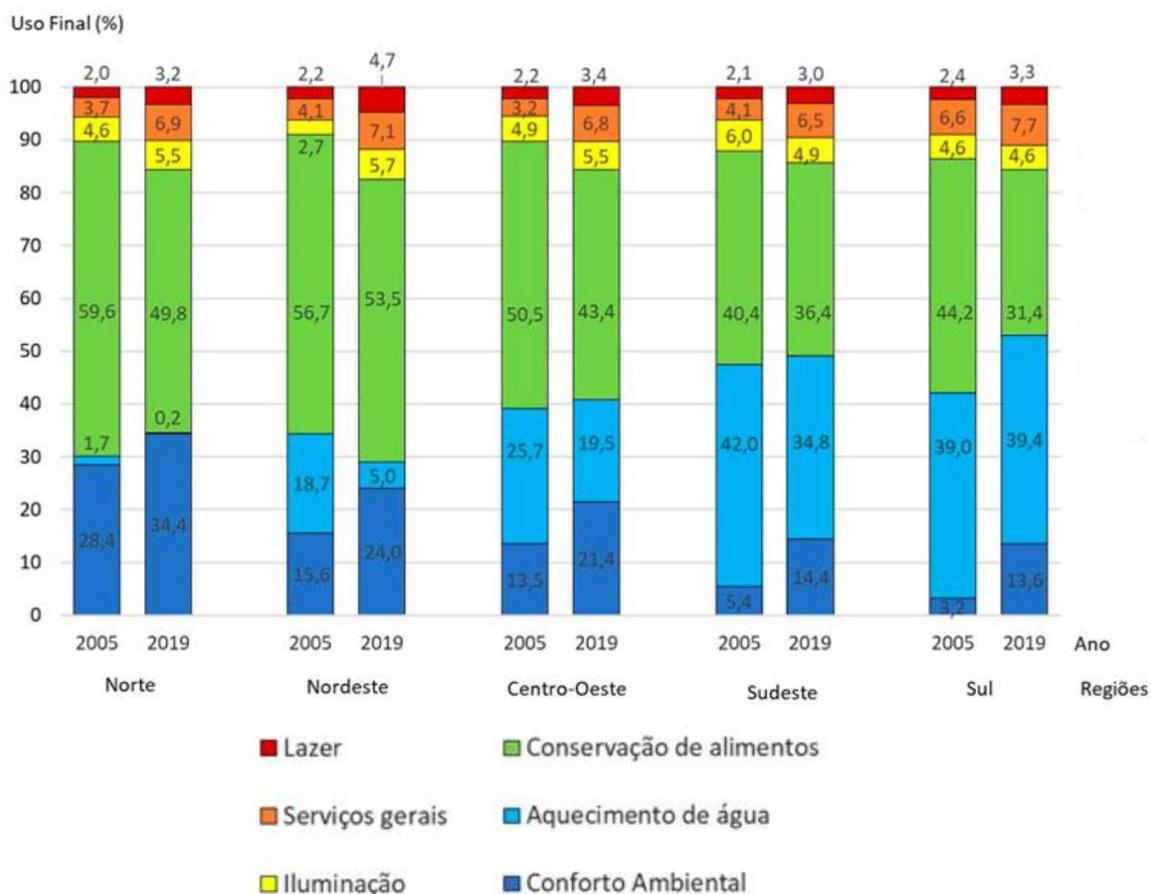


Figura 4 – Estrutura de consumo residencial de energia elétrica por uso final, por categoria de equipamento e por região geográfica, ano 2005 e ano 2019 (%).

Fonte: Adaptado de ELETROBRAS, 2019 apud ABRAHÃO e SOUZA, 2021.

Através da Figura 4, é possível perceber que os principais usos finais foram destinados à conservação de alimentos e aquecimento de água (geladeira e chuveiro elétrico), dessa forma, fica nítida a necessidade da geração de energia local, também considerada neste estudo, aliada à escolha das melhores propriedades térmicas do envelope no desempenho térmico de edificações.

Cabe destacar que, a categoria conforto ambiental apresentou relevante crescimento entre 2005 e 2019, principalmente nas regiões Sul, Sudeste. Houve aumento do consumo de ar condicionado entre 2005 e 2019. Este aumento está associado à melhora da condição econômica das famílias e demonstra uma demanda reprimida que não só não é maior por restrição financeira. Com o aumento do consumo de climatização, percentualmente, há uma aparente redução do consumo destinado à conservação de alimentos, mas que, entretanto, representa um consumo praticamente constante, assim como o aquecimento de água, a ser suportado pelas famílias. Já o consumo dos ventiladores dobrou em todas as regiões, menos na região Sul onde cresceu aproximadamente 10 vezes. O uso do ar-condicionado apresentou maior frequência nos domicílios principalmente à noite, entre 19h e 7h (ELETROBRAS, 2019). Nesse sentido, é relevante a consideração da introdução da métrica sazonal e de níveis de consumo mais restritivos para etiquetagem de eficiência energética dos equipamentos de ar condicionado, conforme indicado por Costa *et al.* (2019).

O consumo de energia elétrica do setor residencial brasileiro estimado para o ano 2019 mostrou um crescimento significativo em todas as regiões, sendo considerados alguns dos motivos: a expansão do acesso à energia elétrica, a ampliação do número de domicílios e a mudança de cultura com a ampliação da posse e de modalidades de equipamentos por domicílio, entre outros.

A estrutura regional se mostrou dinâmica, o que indica que a análise de consumo médio para o Brasil pode não retratar as singularidades regionais. Nesse sentido, indica-se que um detalhamento regional para as políticas energéticas poderia potencializar os resultados, especialmente no que tange aos sistemas de aquecimento de água e ao uso de aparelhos de ar condicionado, em expansão no país (ABRAHÃO e SOUZA, 2021).

### **2.2.2 Políticas, Programas e Regulamentações Energéticas**

As primeiras medidas relacionadas à conservação e ao uso racional de energia no Brasil surgiram em 1984, no Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE), pelo Instituto Nacional de Metrologia Qualidade e Tecnologia (INMETRO).

Em meados dos anos 2000, os parâmetros estabelecidos para as edificações, baseavam-se apenas nos códigos de obras, de caráter determinístico, que apresenta suas prescrições baseados apenas em frações segundo área e uso de ambientes, desconsiderando o caráter dos materiais, influência da orientação solar e contexto climático da implantação (MORENO, 2013). Neste cenário, combinado com a crise energética de 2001, causada por fatores como pouco investimento, aumento do consumo em anos anteriores e falta de chuva, foi introduzida a Lei 10.295, a Lei de Eficiência Energética.

Em abril de 2002, passou a existir um programa que aborda parcialmente o incentivo governamental para utilização de energias renováveis, de caráter voluntário a Lei 10.438, que veio a estabelecer o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica. Já em 2003, foi elaborada a Etiqueta de Eficiência Energética em Edificações, Procel Edifica, tratando-se de um sistema de avaliação de desempenho energético de edifícios que faz parte do Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE). O Procel Edifica desenvolve e favorece projetos na área de conservação de energia de edificações residenciais, comerciais, de serviços e públicas, através de pesquisas e apoio à produção de novas tecnologias, materiais e sistemas construtivos, bem como de equipamentos eficientes, para serem utilizados nas edificações (BRASIL, 2011).

Para atingir os objetivos propostos, em 2005, o grupo GT-Edificações criou a Secretaria Técnica de Edifícios (ST-Edificações), envolveu especialistas discutindo os aspectos técnicos, questões relacionadas aos requisitos e indicadores de eficiência energética. A Eletrobras/Procel Edifica coordena o grupo. O INMETRO, além de integrar o ST-Edificações, criou o Comitê Técnico de Edifícios envolvendo mais parceiros industriais (CT-Edificações) que discute e define o processo de obtenção da etiqueta, sendo um selo específico para eficiência energética o PROCEL-Edificações (CARLO & LAMBERTS, 2010).

Paralelamente a esta iniciativa focada na questão energética, foram desenvolvidos os primeiros padrões de desempenho térmico para edifícios em 2005, a NBR 15.220 que trata do desempenho térmico de edificações (ABNT, 2003). A principal contribuição dessa norma foi definir zonas bioclimáticas brasileiras indicando os limites das propriedades térmicas dos componentes da edificação (FOSSATI, 2016).

O país foi então dividido em 8 zonas bioclimáticas, devido a sua extensão territorial com área de 8,5 milhões de km<sup>2</sup> que refletem condições climáticas distintas. Entretanto, os materiais e sistemas construtivos empregados na envoltória das edificações não refletem esta diversidade. Nestas 8 zonas bioclimáticas brasileiras, Z1 e Z2 representam a regiões mais frias e Z7 e Z8 as regiões mais quentes do país. A Figura 5 mostra a distribuição das zonas bioclimáticas no mapa (FOSSATI, 2016).

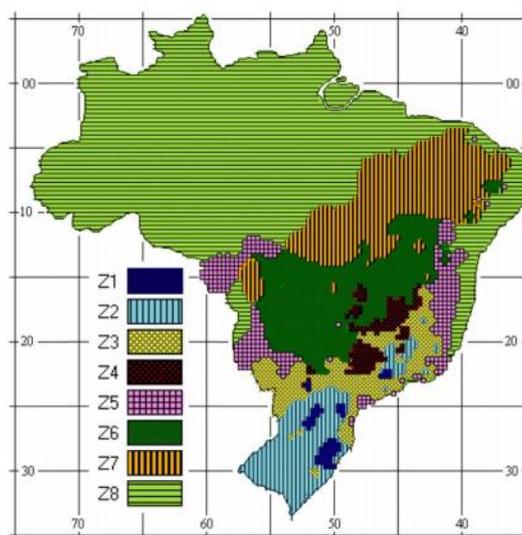


Figura 5 - Zonas Bioclimáticas Brasileiras. Fonte: NBR 15220-3 apud FOSSATI, 2016.

A importância do zoneamento bioclimático brasileiro para a arquitetura está nas suas estratégias, orientações e diretrizes construtivas para a concepção de um projeto adaptado ao local, levando em conta a diversidade climática do país, com o objetivo de estabelecer critérios para proporcionar conforto térmico nas edificações habitacionais (ABNT, 2005). Atualmente, estão sendo desenvolvidos estudos para revisar a legislação brasileira de zoneamento bioclimático após a disponibilidade de mais de 400 arquivos climáticos, que ampliam a base existente.

Em 2009, foi lançado o Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (RTQ-C), que entrou em vigor em 2010 (BRASIL, 2010), assim como a Avaliação de Requisitos e Conformidade para estas tipologias (BRASIL, 2013), onde etiquetas que mostram o desempenho dos edifícios em termos de eficiência energética são concedidas. Também no ano de 2010 o Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais

(RTQ-R) foi criado (BRASIL, 2010). Estes regulamentos estipulam limites das propriedades térmicas dos componentes e apresentam critérios de classificação das edificações em uma escala que varia de “A” (maior eficiência) até “E”, menor.

Embora a etiquetagem seja atualmente realizada de forma voluntária é a base para edifícios residenciais, comerciais e de serviços. O requisito se tornou obrigatório em julho de 2014 para edifícios da administração pública federal, sendo exigido a Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) no nível “A” para projetos e prédios públicos federais novos ou que recebem *retrofit*. O reconhecimento anual dos edifícios mais eficientes (Selo Procel) também começou a ser concedido apenas a edifícios comerciais, públicos e de serviços em 2014 e está em estudo para edifícios residenciais (BRASIL, 2010).

O PROCEL Edifica desenvolve e favorece projetos na área de conservação de energia de edificações residenciais, comerciais, de serviços e públicas, através de pesquisas e apoio à produção de novas tecnologias, materiais e sistemas construtivos, bem como, de equipamentos eficientes, para serem utilizados nas edificações (BRASIL, 2011c). A etiquetagem de eficiência energética de edifícios é um passo necessário em direção às edificações eficientes, energética e termicamente, contribuindo ainda com a qualidade do ambiente construído, de acordo com Caldeira (2011).

Assim, é possível observar que o Brasil entrou recentemente no campo da normalização e no estabelecimento de regulamentos para garantir edifícios com melhor desempenho e maior eficiência.

Em 2013, foi aprovado o primeiro padrão brasileiro de desempenho térmico mínimo, com foco em edifícios residenciais, a NBR 15.575 (ABNT, 2013), tendo sido amplamente criticada (SORGATO et al., 2014; SILVA et al., 2014, SOARES, 2014).

Um avanço significativo em relação as edificações NZEB, foi que, em 2019, a Eletrobras lançou chamada pública PROCEL Edifica – NZEB Brasil para a seleção de projetos de edificações NZEB, com alta eficiência energética e geração distribuída associada, de fonte renovável, para alcançar um balanço anual energético próximo à zero (ELETROBRAS, 2019), utilizando o método da INI-C (Instrução Normativa do Inmetro), na época ainda em consulta pública.

Em 2021, o novo método de avaliação de edificações comerciais,

denominado INI-C (Instrução Normativa do Inmetro), desenvolvido pelo Centro Brasileiro de Eficiência Energética (CB3E), foi publicado (INMETRO, 2021). A proposta surgiu após constatações de limitações do RTQ-C. Enquanto isso, o novo método de avaliação de edificações residenciais, denominado INI-R, apesar de já ter passado por consulta pública, ainda aguardava publicação.

Ambos os métodos utilizam o conceito de energia primária e possibilitam identificar o consumo de energia anual por área, o percentual de economia de energia em relação à edificação de referência e ainda contabilizar a geração local de energia no balanço de desempenho energético do edifício, abrindo possibilidades de avaliar se uma edificação é NZEB.

Recentemente, foi publicada a Portaria nº 309, de 6 de setembro de 2022, que aprova as Instruções Normativas e os Requisitos de Avaliação da Conformidade para a Eficiência Energética das Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas e Residenciais – Consolidado.

Nesta Portaria, no Anexo D são apresentados os procedimentos para determinação do potencial de geração local de energia renovável e as condições de avaliação de Edificações de Energia Quase Zero (NZEBs) e Edificações de Energia Positiva (EEPs). Esta Portaria define edificação NZEB em seu Anexo, conforme segue:

#### **4.38 Edificação de energia quase zero – NZEB**

Edificação energeticamente eficiente cuja geração de energia renovável produzida nos limites da edificação ou do lote em que a edificação está inserida supre 50% ou mais de sua demanda anual de energia. (INMETRO, 2022)

Como edificação energeticamente eficiente a Portaria estabelece que, para fins de ser considerada NZEB, as edificações têm que obter classificação geral A, sem considerar a geração local de energia.

Como não está no escopo deste trabalho calcular a classificação geral da edificação, esta será considerada uma edificação de energia quase zero - NZEB se a geração de energia renovável produzida nos limites da edificação ou do lote em que a edificação está inserida supre 50% ou mais de sua demanda anual de energia.

Mesmo considerando os avanços ocorridos em relação ao desenvolvimento de regulamentos de eficiência energética e no que diz respeito as edificações NZEB, alguns países desenvolvidos estão em um patamar mais

elevado, indicando um caminho a ser seguido pelo Brasil, no sentido de investimentos e implementação de políticas públicas para a evolução das medidas de eficiência energética, especialmente no que diz respeito as edificações, visto que, o país não apresenta ainda legal ou mandatoriamente nenhum dispositivo normativo de incentivo para utilização de energia renovável que utilize o conceito de NZEB.

### **2.2.3 Edifícios NZEB no Brasil**

Pacheco, Ghisi e Lamberts (2013) apresentaram fatores a considerar na proposição de estratégias para obtenção de edifícios de energia zero no Brasil. Os fatores são embasados em revisão da bibliografia. A literatura mostra que o sucesso das transições de matriz energética depende da eficácia de políticas de apoio governamentais. Mostra também que o atual interesse por edifícios de energia zero decorre de políticas de promoção de edifícios de energia zero nos EUA e União Europeia. Por isso, edifícios de energia zero devem ser promovidos pela sua capacidade de auxiliar uma transição de matriz energética de sucesso.

Em 2016, foi realizado um estudo por Ferrador *et al.*, na qual é feita uma descrição, por meio de levantamento bibliográfico da eficiência energética de edificações, um panorama e perspectivas das certificações no Brasil e no mundo. A análise dos textos mostrou que a preocupação com este tema existe. Governos e sociedade ao redor do mundo estão buscando soluções para atenuar o consumo de energia, selos e certificações tem sido criados, inclusive no Brasil. No futuro, poderão ser desenvolvidas novas legislações para tornar obrigatórios certos métodos ou procedimentos, ou novidades de mercado pelo peso que a eficiência energética pode ganhar nas transações imobiliárias.

Em Dutra (2019) foi identificado se uma unidade habitacional típica brasileira é capaz de cumprir objetivos de baixo consumo energético estabelecidos para a Europa. O método utilizado foi o experimental, através de um estudo de caso com um modelo de residência unifamiliar representativo de habitações brasileiras. Foi realizada simulação de consumo e geração de energia no programa *EnergyPlus*, para comparação com metas NZEB. Os resultados indicam que, mesmo sem um projeto que leve em conta a eficiência energética, ações de melhoria no isolamento da envoltória já são capazes de

promover o cumprimento da maioria das metas estabelecidas para as diferentes zonas climáticas europeias. Concluiu-se que a geração no próprio local, por fontes renováveis, é importante para que se possam atingir os objetivos de baixo consumo de energia, mas as ações eficientes são imprescindíveis para esse fim.

Recentemente, em 2020, Chiaradia realizou um estudo para mensurar o impacto da aplicação de conceitos de edifícios de energia zero em edificações residenciais localizadas em cidades da região sudeste do Brasil, considerando as condições climáticas da cidade de Taubaté (SP) como referência. O estudo foi realizado através de simulação dinâmica computacional utilizando-se o software *EnergyPlus*. Foram simuladas estratégias de projeto passivo e medidas de eficiência energética visando selecionar aquelas com maior potencial de redução do consumo de energia do edifício em base anual de operação. As simulações demonstraram que a substituição dos envidraçados por modelos de baixo fator solar, a pintura das paredes externas com tinta de baixa absorvância no espectro solar e a utilização de ventilação natural são algumas das estratégias de projeto passivo que mais contribuem para a redução do consumo de energia elétrica. Em relação às medidas de eficiência energética, as simulações demonstraram que a substituição de equipamentos de ar condicionado antigos por modelos novos de alto coeficiente de desempenho e com compressores de rotação variável (inverter) conduz a uma grande redução no consumo de energia elétrica. Combinações de estratégias de projeto passivo e medidas de eficiência energética conduziram a reduções no consumo de energia elétrica na faixa de 36,8 a 48,8%, quando simulados modelos com um ou dois equipamentos de ar condicionado por apartamento, respectivamente.

### **2.3 Energia Solar Fotovoltaica**

As fontes de energia de origem solar apresentam processo de geração de eletricidade simples, sua utilização de forma distribuída apresenta vantagens, como a redução de gastos com os sistemas de transmissão e distribuição. Além de permitir desenvolvimento social para localidades não eletrificadas (Shayani, Oliveira e Camargo, 2006). Utiliza células solares, responsáveis pela geração de energia, e um inversor para transformar a tensão e frequência para os valores nominais dos aparelhos. Este processo é simples, sem emissão de gases

poluentes ou ruídos e com necessidade mínima de manutenção.

A energia solar fotovoltaica é uma opção tecnológica eficaz para o fornecimento sustentável de energia. Além disso, pode ser implantada de maneira modular quase em todos os lugares do planeta (JÄGER- WALDAU, 2019). A implantação de sistemas solares fotovoltaicos distribuídos em residências, edifícios comerciais e industriais vem crescendo exponencialmente.

Aliado à isso, o Brasil apresenta enorme potencial para a exploração da energia solar, visto que, possui altos valores de irradiação solar incidente em qualquer região do país, em torno de 1534-2264 kWh/m<sup>2</sup>/ano, de acordo com Solargis (2021). Baseado no exposto é promissor investir na exploração das tecnologias fotovoltaicas para integrá-las às edificações, de forma a obter edifícios NZEBs no país.

### **2.3.1 Sistema Fotovoltaico**

Um sistema fotovoltaico é composto basicamente por células fotovoltaicas que são associadas eletricamente e encapsuladas para formar o módulo fotovoltaico. Um módulo pode ser construído por um conjunto de células fotovoltaicas associadas em série e/ou paralelo, essa associação depende dos parâmetros elétricos (tensão, corrente e potência) mais adequados à aplicação a que o módulo se destina. Por sua vez, os módulos FV são combinados com um conjunto de componentes adicionais do sistema dependentes da aplicação, como por exemplo inversores, baterias, componentes e sistemas de montagem (PINHO; GALDINO, 2014).

Dessa forma, neste estudo será considerada a geração de energia local, através da tecnologia fotovoltaica, para a obtenção do desempenho NZEB.

### **2.4 Habitações de Interesse Social**

A habitação é um dos temas centrais quando se trata de desenvolvimento sustentável e é parte fundamental das relações entre a sociedade e o meio ambiente (UN-HABITAT, 2012). O crescimento urbano no Brasil, trouxe grandes desafios econômicos, sociais e ambientais, dentre eles, o déficit habitacional, potencializado pela insuficiência de planejamento e investimentos necessários, de acordo com Caccia *et. al* (2017).

Ao longo da história brasileira da política pública de moradias foram-lhe atribuídos diferentes nomes; habitação popular, habitação econômica, habitação social, habitação de baixa renda e mais recentemente, HIS (SHIMBO, 2010). Não se alterou apenas a nomenclatura dessa política social, mas, sobretudo e fundamentalmente a forma de intervenção do Estado (BUONFIGLIO 2018). Conforme Curcio (2011), o poder público tomou iniciativas com o intuito de, se não solucionar, pelo menos amenizar o déficit habitacional brasileiro.

Um dos instrumentos de ação desta Política Nacional de Habitação é o Programa Habitacional, destacando entre eles o Programa de Arrendamento Residencial – PAR, na qual as habitações resultantes deste programa são compactas e, possuem pouca flexibilidade quanto à organização do espaço, ventilação e orientação solar nem sempre adequada, em função da posição das habitações nos blocos, que variam entre quatro e cinco pavimentos.

Curcio (2011) destaca que, é possível, desenvolver HIS, que apresentem melhor desempenho térmico, sem que seja necessário investir muito além dos recursos já investidos atualmente com as construções sociais, através da adoção de medidas simples, baseadas em princípios bioclimáticos, por isso avaliou o desempenho termoenergético de HIS construídas pelo Programa de Arrendamento Residencial – PAR na cidade de Pelotas/RS. A metodologia adotada baseou-se na NBR 15575 (2008) e na NBR 15220 (2005). Foram realizadas medições de temperatura do ar e umidade relativa em cinco apartamentos, localizados em quatro diferentes conjuntos construídos com diferentes sistemas construtivos, em períodos de verão e inverno. Para avaliação dos dados medidos nos apartamentos foram realizadas análises através de quatro parâmetros, sendo eles temperatura do ar, graus-hora e grau-médio, Carta Bioclimática e NBR 15575. A confrontação com as normas demonstrou que as habitações atendem mais itens da NBR 15575 do que os da NBR 15220. O empreendimento que apresentou melhor desempenho durante o verão foi o PAR Marcílio Dias, enquanto o melhor desempenho no período de inverno foi verificado no PAR Regente. As principais características que evidenciaram estes resultados foram, a adequada orientação solar, no quadrante norte, do apartamento do PAR Regente e as características térmicas das paredes externas do apartamento do PAR Marcílio Dias, que era composta por tijolos

maciços do 1° ao 3° pavimento e tijolos furados no 4° pavimento com espessura de 25 cm e acabamento em reboco, destacando que os demais empreendimentos possuem: Bloco cerâmico com espessura de 16,5 cm rebocado apenas no exterior e bloco cerâmico com espessura de 19 cm e acabamento em reboco. Observou-se na maioria dos apartamentos, que não são utilizadas estratégias de condicionamento térmico passivo, como por exemplo, ventilação natural e cruzada, inércia térmica, aquecimento solar passivo, dentre outras táticas, que poderiam elevar o desempenho térmico das habitações sem aumentos significativos nos custos de execução. O estudo apresentou um diagnóstico da realidade existente, que pode servir de subsídio para outros estudos e para a melhoria do desempenho térmico das HIS das futuras unidades habitacionais a serem construídas.

## **2.5 Eficiência energética na arquitetura**

A eficiência energética busca, basicamente, a redução dos custos e a eliminação de desperdícios, sem perda da qualidade e conforto. Para Lamberts *et al.* (2011), um edifício é considerado energeticamente mais eficiente que outro quando proporciona as mesmas condições ambientais de conforto ao seu usuário, com menor consumo de energia.

No Brasil, o interesse por edificações confortáveis e energeticamente eficientes começa a surgir entre as décadas de 1970 e 1980, quando engenheiros, arquitetos e físicos, especialmente pesquisadores ligados a universidades, começaram a apresentar projetos de edificações com tecnologias passivas, aproveitando a orientação solar, massa térmica para aquecimento e resfriamento e ventilação natural (VETTORAZZI, 2019, p. 112).

Meusel (2016) afirma que uma das maneiras de se alcançar edifícios mais eficientes acontece pela inserção de conceitos de eficiência energética durante as etapas iniciais do processo de projeto.

Nesse sentido, Huang e Niu (2016) concluíram que, em um panorama sobre a otimização do envelope construtivo baseado em simulações, cerca de 80% dos estudos estão relacionados à redução do consumo energético da edificação. Os principais parâmetros de análise são: Transmitância térmica, absorvância; Percentual de Abertura na Fachada – PAF, tipo de vidro; espessura

do material de isolamento; formato do envelope construtivo e presença/dimensão de dispositivos de proteção solar.

O desempenho energético também está diretamente relacionado ao comportamento do perfil de consumo de energia da edificação e de seus sistemas (iluminação, climatização e equipamentos) durante um período de tempo (dias, meses ou anos) (GONÇALVES e BODE, 2015).

Alternativas para redução do consumo são fundamentais para se atingir o equilíbrio energético em edifícios na concepção de projetos mais eficientes, que primem pelo conforto do usuário e pelo uso racional de energia. Portanto, para que projetos com alto desempenho termoenergético sejam concebidos, deve-se considerar a utilização de estratégias arquitetônicas, eficiência dos equipamentos e sistemas de iluminação simultaneamente para, então, se obter menor consumo energético sem que as condições mínimas de conforto sejam comprometidas.

## **2.6 Influência das propriedades térmicas do envelope no desempenho termoenergético de edificações**

O envelope de uma edificação é o elemento responsável por separar o ambiente interno e o externo. Por isso, a especificação das propriedades termo-físicas do envelope do edifício é, dentre as estratégias passivas de condicionamento, uma das mais importantes, visto que os elementos construtivos do envelope influenciam diretamente no desempenho termoenergético das edificações (Mazzaferro, 2013).

Os edifícios estão expostos a uma série de elementos externos temporais que podem influenciar a quantidade de calor transferido através de seu envelope. Tais elementos incluem a radiação solar incidente, a temperatura de bulbo seco, a velocidade e direção do vento, e a umidade relativa. Além disso, uma construção compreende camadas de diferentes espessuras e elementos de diversas propriedades: condutividade térmica, densidade, permeabilidade à água e calor específico.

Almeida (2014) concluiu que, para as 5 tipologias de edificações residenciais unifamiliares representativas consideradas, baseadas em uma amostragem de 50 habitações de Florianópolis-SC, o parâmetro que exerce

maior influência no equivalente numérico final da envoltória é a absorvância solar das paredes externas. Sabendo que, os componentes encontrados em cada tipo de parede são observados na Tabela 2, conforme segue:

Tabela 2 – Componentes encontrados em cada tipo de parede observada.

<b>Parede</b>	<b>Materiais componentes</b>
Tipo 1	Argamassa, bloco cerâmico de 6 furos e argamassa
Tipo 2	Madeira
Tipo 3	Argamassa e bloco cerâmico de 6 furos
Tipo 4	Argamassa, bloco cerâmico de 8 furos e argamassa
Tipo 5	Argamassa, bloco de concreto e argamassa

Fonte: Adaptado de Almeida (2014).

Através da análise da influência de parâmetros físicos e geométricos no indicador de graus hora para resfriamento e nos consumos relativos para aquecimento e resfriamento das tipologias consideradas pelo método de simulação do Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R) foram determinadas cinco tipologias representativas e, por fim, foram determinados os parâmetros que mais influenciam no desempenho termo energético e no equivalente numérico da envoltória das tipologias representativas encontradas. Verificou-se que 58% das habitações avaliadas tiveram suas envoltórias classificadas como nível “E” de eficiência energética. Saliendo que, a classificação é feita em função da pontuação final obtida, conforme o RTQ-R, que varia do nível A (5 - mais eficiente) ao E (1 - menos eficiente). Após a análise da influência dos parâmetros nos resultados do indicador de graus hora de resfriamento das tipologias representativas, o parâmetro mais influente foi a absorvância solar das paredes externas, seguido pela absorvância solar da cobertura. Para os resultados de consumo relativo para aquecimento, os parâmetros mais influentes foram a transmitância térmica das paredes externas e o contato da cobertura das habitações com o exterior. Para os resultados de consumo relativo para resfriamento, os parâmetros mais influentes foram a absorvância solar das paredes externas, a transmitância térmica das paredes externas e o contato do piso da habitação com o solo. Ao final do estudo, pode-se concluir que para todas as tipologias representativas o parâmetro que exerce maior influência no equivalente numérico final da envoltória é a absorvância solar das paredes

externas. O estudo contribui para enriquecimento da literatura sobre aplicação do método de simulação do RTQ-R, por se tratar da análise de uma grande amostra de habitações, bem como sobre aplicação de métodos estatísticos na determinação da influência de diversos parâmetros no desempenho termo energético de habitações (ALMEIDA, 2014).

Nesse contexto, a orientação solar é um fator importante que influencia no desempenho térmico e no consumo energético de edificações, contudo, muitas vezes é o parâmetro que se tem menor poder de decisão.

Considerando que a incidência de radiação solar varia conforme a localização e orientação da edificação, o estudo dessas variáveis é necessário para garantir resultados satisfatórios no desempenho térmico da construção.

Para definir uma orientação ideal do edifício é necessário conhecer a trajetória do sol ao longo do dia e ao longo das estações do ano. Para localidades do hemisfério sul, que é o nosso caso, os maiores ganhos solares ocorrem em fachadas voltadas para a direção norte geográfica devido à inclinação da trajetória solar ao longo do dia, como é possível perceber através da Figura 6. (CHIARADIA, 2020).

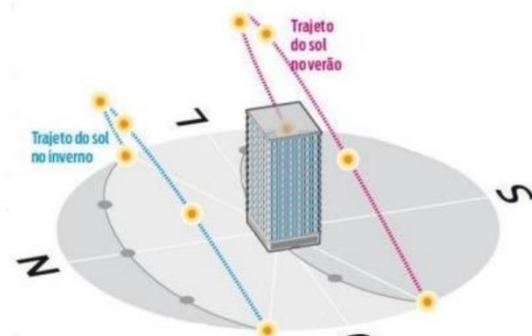


Figura 6 - Trajetória do sol ao longo do dia e estações no hemisfério sul.

Fonte: Meular (2018) apud Chiaradia (2020).

Dessa forma, no hemisfério sul, a colocação de vãos envidraçados em fachadas voltadas para o norte permite maiores ganhos solares, fator que pode colaborar para o aquecimento do ambiente interno no inverno e pode levar ao superaquecimento no verão, se não forem implementadas estratégias adequadas como elementos de sombreamento, conforme Chiaradia (2020).

O aproveitamento da radiação solar incidente depende da orientação das superfícies, pois as diferentes fachadas da edificação recebem quantidades distintas de calor do sol. Nesse sentido, para o caso do hemisfério sul, a orientação norte-sul das fachadas principais é a ideal, uma vez que esta

proporciona um maior aproveitamento da radiação solar (ELAIAB, 2014). Já para locais do hemisfério norte, a orientação favorável é voltada para o sul geográfico, com um mínimo de obstrução por sombreamento.

## **2.7 Simulação Computacional**

De acordo com Schriber (1974), simulação computacional implica na modelagem de um processo ou sistema, de tal forma que o modelo reproduza as respostas do sistema real numa sucessão de eventos que ocorrem ao longo do tempo. Nesse cenário, pode ser utilizada como uma importante ferramenta capaz de auxiliar no projeto de uma edificação e na obtenção de soluções mais eficientes energeticamente.

### **2.7.1 Software *EnergyPlus***

O software *EnergyPlus* é um programa de simulação termoenergética que trabalha com o balanço de calor do BLAST, com um ar-condicionado genérico, programas de iluminação natural e novos algoritmos de transferência de calor e fluxo de ar entre zonas. Estima o consumo de energia considerando as trocas térmicas da edificação com o exterior, com base na caracterização do edifício ou do ambiente a ser estudado e leva em consideração a geometria, componentes construtivos, cargas instaladas, sistemas de condicionamento de ar, padrões de uso e ocupação. O software permite modelar diversos sistemas (CRAWLEY et al., 1999; MAZZAFERRO, MELO, LAMBERTS, 2015).

De acordo com Sousa (2012), o programa *EnergyPlus* é a ferramenta mais reconhecida e utilizada como instrumento para análise computacional de eficiência energética. Frequentemente é associado ao uso de inteligência artificial (IA) para o aumento da complexidade e relevância dos resultados, salientando que segundo Kaplan e Haenlein (2019) a IA é uma capacidade do sistema para interpretar corretamente dados externos, aprender a partir desses dados e utilizar essas aprendizagens para atingir objetivos específicos, através de adaptação flexível.

Entre as técnicas de IA mais utilizadas atualmente para esse tipo de análise, destacam-se os métodos de algoritmos genéticos, evolutivos e multiobjetivos, conforme Sousa (2012).

## **2.7.2 Algoritmos Genéticos**

Algoritmos Genéticos (AG) são algoritmos matemáticos inspirados nos mecanismos de evolução natural e recombinação genética. A técnica de AG fornece um mecanismo de busca adaptativa que se baseia no princípio Darwiniano de reprodução e sobrevivência dos mais aptos (Pacheco, 1999). Foram propostos na década de 70 por Holland e são largamente aplicados a problemas de otimização (HOLLAND, 1975).

### **2.7.2.1 Algoritmos Evolutivos Multiobjetivos**

Os Algoritmos Evolutivos (AEs) são largamente explorados em problemas de otimização. Uma das características mais importantes dos AEs é que possibilitam encontrar soluções ótimas ou adequadas para um problema complexo sem usar informação adicional, como cálculo de derivadas de funções (Goldberg, 1989). Um outro grande diferencial dos AEs tem sido na solução de problemas multiobjetivo (TICONA e DELBÉM, 2008).

### **2.7.2.2 Otimização Multiobjetivo**

A otimização multiobjetivo, em geral, é aplicada em problemas onde dois ou mais objetivos são conflitantes (MICHALEWICZ, 1996). Buscando fornecer soluções factíveis e que sejam não dominadas compondo a chamada fronteira de Pareto (MICHALEWICZ, 1996). O uso de algoritmo genético multiobjetivo foi definido como alternativa para solucionar o problema de seleção de variáveis em problemas de calibração multivariada (MICHALEWICZ, 1996).

### 3 MÉTODO

O método aplicado neste estudo está fundamentado em uma análise de desempenho de NZEB, para edifícios de caráter residencial multifamiliar de interesse social na zona bioclimática 2 (ZB2). De forma simplificada, ele se resume de acordo com o fluxograma da Figura 7 a seguir:

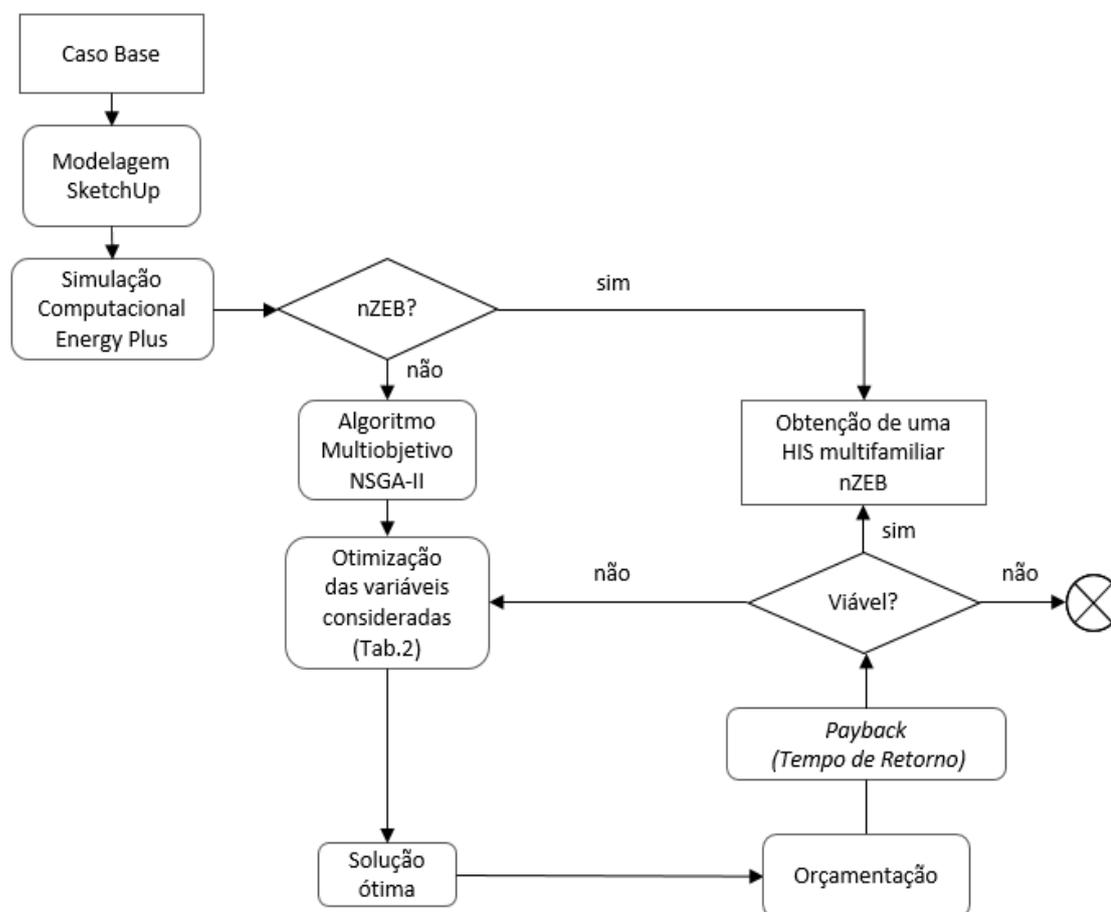


Figura 7 - Fluxograma simplificado do método do presente estudo. Fonte: A autora.

O Caso Base, será adotado de acordo com Curcio (2011), focando em edifícios de HIS existentes, edificadas ao abrigo do Programa de Arrendamento Residencial – PAR na cidade de Pelotas/RS, localizada na ZB2. Para isso, serão realizadas simulações computacionais, utilizando o software *Energy Plus*, que avalia o desempenho termoenergético do Caso Base, através de um Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo, que varia seus componentes, para a determinar as propriedades térmicas do envelope que proporcionam menor consumo de energia com aquecimento e refrigeração, de modo que, com a geração localizada de energia, se obtenha uma edificação NZEB.

### 3.1. Estrutura geral da pesquisa

O delineamento do estudo aconteceu por meio de um processo de nove etapas, sendo elas:

- 1) Revisão bibliográfica;
- 2) Definição do Caso Base;
- 3) Modelagem do Caso Base e definição dos dados de entrada no software *EnergyPlus*;
- 4) Definição dos sistemas construtivos avaliados, em função da variação da capacidade térmica das paredes externas e da cobertura;
- 5) Definição das variáveis consideradas e de seus limites inferior e superior;
- 6) Otimização das propriedades térmicas do envelope;
- 7) Avaliação do desempenho termoenergético;
- 8) Cálculo da geração de energia fotovoltaica por meio dos dados do programa Radiasol;
- 9) Análise do custo da envoltória.
- 10) Obtenção e análise dos resultados.

A Etapa 1 consistiu na Revisão Bibliográfica, momento em que foram selecionados trabalhos sobre a temática, em base de dados relevantes da área. Procurou-se conhecer os conceitos básicos em relação ao tema, as principais normas e metodologias e os principais *softwares* utilizados para simulação energética.

A Etapa 2 compreendeu a definição do Caso Base, ou seja, uma HIS multifamiliar, edificada ao abrigo do Programa de Arrendamento Residencial – PAR na cidade de Pelotas/RS, localizada na ZB2, de acordo com Curcio (2011). Nesta etapa, foi realizada uma análise dos projetos arquitetônicos para definição do Caso Base.

A Etapa 3 consistiu na caracterização e modelagem do Caso Base, através da interface gráfica do software *SketchUp® 2017* com o *plugin Euclid Version 0.9.4.1* e a definição dos dados de entrada para a simulação computacional dos modelos através do software *Energy Plus® Version 9.0.1*.

Na Etapa 4, foi realizada a definição dos sistemas construtivos avaliados, em função da variação da capacidade térmica das paredes externas e da

cobertura, conforme dados da NBR 15220-3 e de LOBO (2018 p. 92).

A Etapa 5 consistiu na definição das variáveis consideradas e de seus limites inferior e superior.

Na Etapa 6 foi realizada a otimização das propriedades térmicas do envelope, através de um Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo, o *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II* - NSGA-II, com as variáveis determinadas na Etapa 5 para os Sistemas Construtivos especificados na Etapa 4, que compõem os dados de entrada, visando obter um resultado ótimo para cada Caso considerado.

No que se refere à etapa 7, verificou-se o consumo termoenergético total para cada resultado obtido na etapa anterior, visando a determinação do Resultado Ótimo.

Na Etapa 8 foi realizada uma análise da geração local do edifício, através de sistemas fotovoltaicos. Foram realizados cálculos da geração de energia dos módulos fotovoltaicos, por meio do uso de dados do programa Radiasol, para os resultados ótimos obtidos nas etapas 6 e 7.

Na Etapa 9 foi feita uma análise de viabilidade econômica, através de uma orçamentação.

Por fim, na Etapa 10 foram obtidos e analisados os resultados, verificando a possibilidade de alcance do balanço energético próximo de zero, assim como, apresentadas as conclusões, limitações do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

### **3.2 Definição do Caso Base**

Para a definição de um Caso Base representativo, ou seja, uma edificação de uso residencial multifamiliar de interesse social na região sul do Brasil, mais especificamente na zona bioclimática 2 - ZB2, o estudo será baseado em Curcio (2011), utilizando edifícios construídos no contexto do Programa de Arrendamento Residencial - PAR na cidade de Pelotas - RS.

Cabe destacar que, dentre os empreendimentos avaliados por Curcio (2011), foram analisados os comportamentos individualizados dos apartamentos, assim como, suas orientações solares, sendo que, o fator determinante para a definição do Caso Base será o projeto o mais representativo,

de geometria mais simples e apartamentos com orientações solares bem definidas, de modo que a rotação da orientação solar possa ser melhor avaliada.

Curcio (2011) realizou um levantamento que agrupou os edifícios PAR de Pelotas pela semelhança das suas características construtivas. Porém, como as características construtivas serão testadas, busca-se prioritariamente, o projeto arquitetônico que servirá de Caso Base.

Os empreendimentos analisados por Curcio (2011) foram PAR Marcílio Dias, PAR Regente, PAR Porto e PAR Solar das Palmeiras, cujas plantas baixas serão apresentadas resumidamente a seguir.

O conjunto habitacional Marcílio Dias, de acordo com Curcio (2011), possui 160 unidades, distribuídas em três blocos de quatro pavimentos que possuem tipologia em fita.

Na Figura 8 é possível visualizar a implantação do PAR Marcílio Dias, com destaque ao apartamento analisado por Curcio (2011), assim como, a Figura 9 apresenta a planta-baixa deste apartamento.

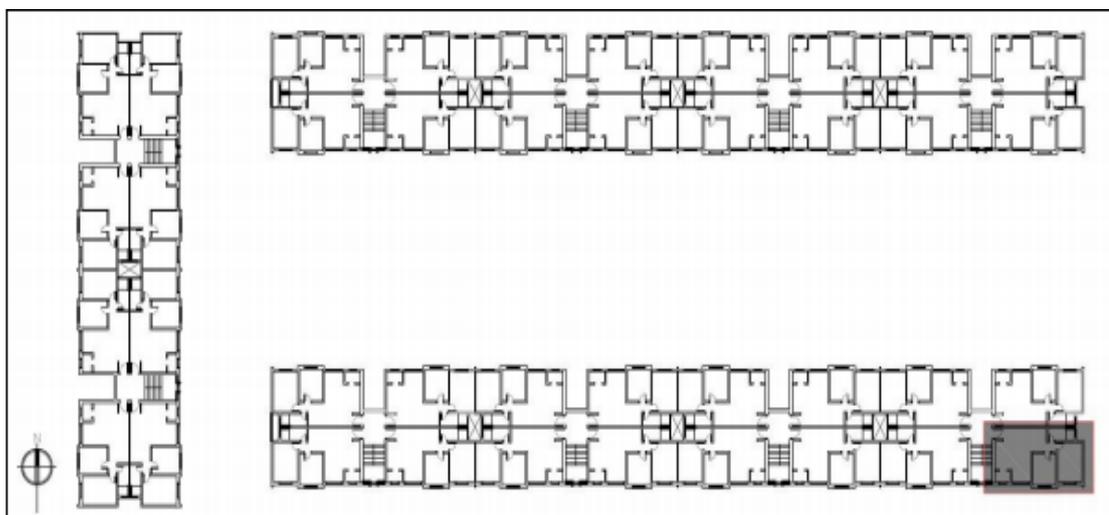


Figura 8 (sem escala) – Implantação do PAR Marcílio Dias com destaque do apartamento da Fig.15. Fonte: Curcio (2011).

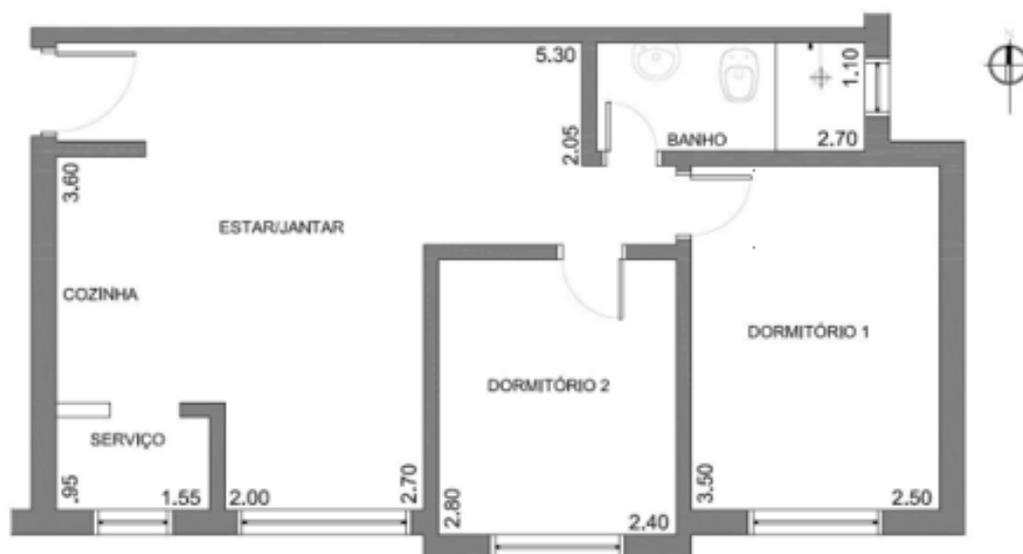


Figura 9 - Planta-baixa do apartamento PAR Marcílio Dias (dimensões em metros).

Fonte: Curcio (2011).

Já o conjunto habitacional Regente possui 124 unidades, distribuídas em quatro blocos de quatro pavimentos que possuem tipologia em fita. Na Figura 10 é possível visualizar a implantação do PAR Regente, com destaque ao apartamento na Figura 11.

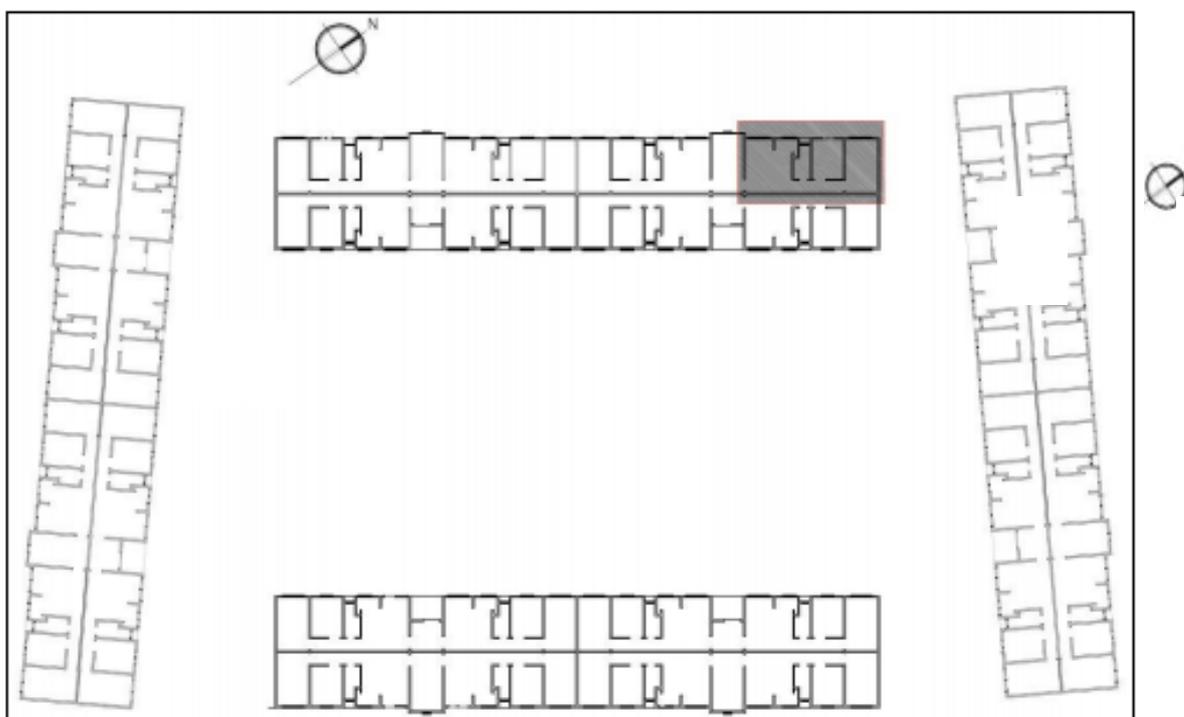


Figura 10 (sem escala) – Implantação do PAR Regente com destaque do apartamento da Figura 17. Fonte: Curcio (2011).



Figura 11 - Planta-baixa do apartamento PAR Regente (dimensões em metros).

Fonte: Curcio (2011).

O conjunto habitacional Porto possui 140 unidades habitacionais, distribuídas em quatro blocos de quatro pavimentos que possuem tipologia em fita com pátio interno. Na Figura 12 é possível visualizar a implantação do PAR Porto, com destaque ao apartamento apresentado na Figura 14.

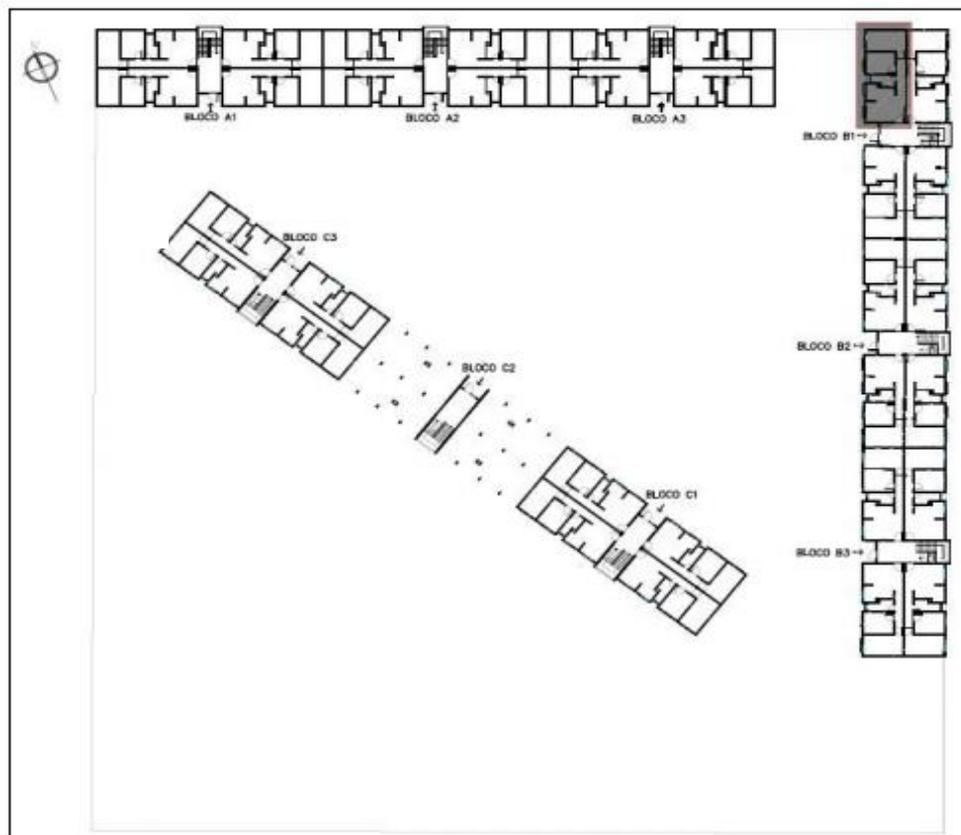


Figura 12 (sem escala) - Implantação do PAR Porto com destaque do apartamento da Figura 19.

Fonte: Curcio (2011).



Figura 13 - Planta-baixa do apartamento PAR Porto (dimensões em metros).

Fonte: Curcio (2011).

Conforme Curcio (2011), o conjunto habitacional Solar das Palmeiras possui 300 unidades habitacionais, distribuídas em quatro blocos de cinco pavimentos que possuem tipologia em fita. Na Figura 14 é possível visualizar a implantação do PAR Solar das Palmeiras, com destaque aos apartamentos analisados, assim como a Figuras 15 e 16 apresentam a planta-baixa dos apartamentos analisados.

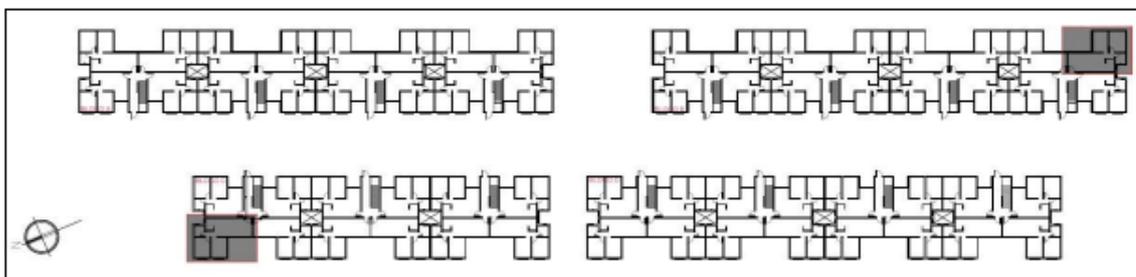


Figura 14 (sem escala) - Implantação do PAR Solar das Palmeiras com destaque dos apartamentos das Figuras 21 e 22. Fonte: Curcio (2011).



Figura 15 - Planta-baixa do apartamento PAR Solar das Palmeiras (dimensões em metros).  
Fonte: Curcio (2011).

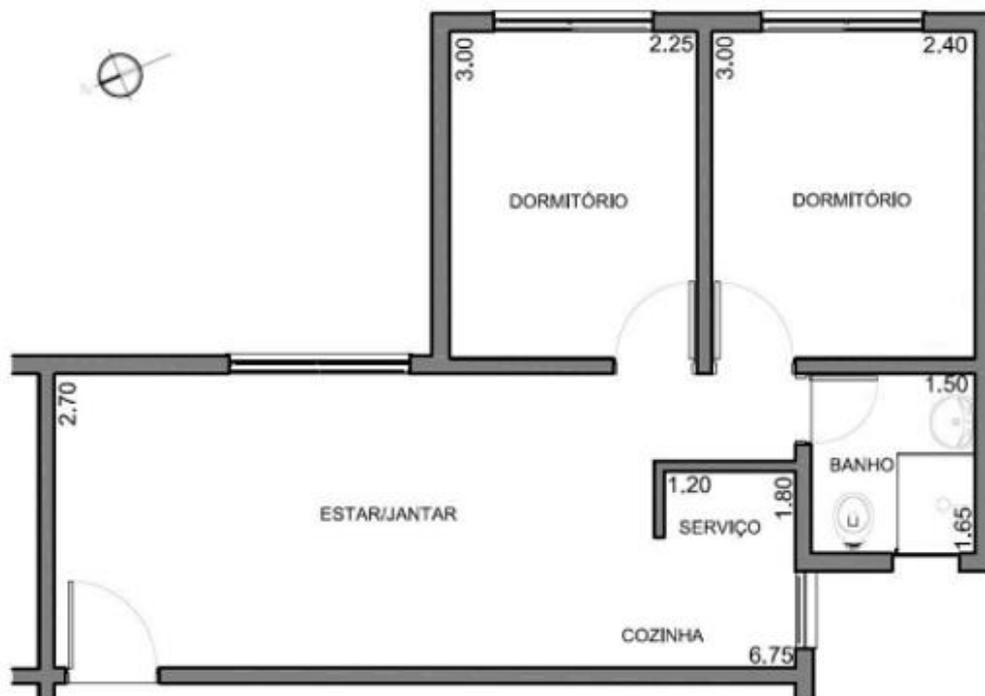


Figura 16 - Planta-baixa do apartamento PAR Solar das Palmeiras (dimensões em metros).  
Fonte: Curcio (2011).

Como o fator determinante para a definição do Caso Base é o a escolha do projeto mais representativo, de geometria mais simples e apartamentos com orientações solares bem definidas, de modo que a rotação da orientação solar possa ser mais bem avaliada, o que melhor se apresenta nestas condições é o apartamento do PAR Marcílio Dias. A Tabela 3 apresenta as características construtivas deste empreendimento, para futuras comparações do desempenho termoenergético e custos acrescidos.

Tabela 3 - Características Construtivas do PAR Marcílio Dias.

<b>Empreendimento</b>	<b>Características Construtivas</b>		
PAR Marcílio Dias	Paredes externas	Paredes Internas	Cobertura
	Tijolos maciços do 1 <sup>o</sup> ao 3 <sup>o</sup> pavimento	Tijolos maciços do 1 <sup>o</sup> ao 3 <sup>o</sup> pavimento	Laje pré-fabricada
	Tijolos furados no 4 <sup>o</sup> pavimento	Tijolos furados no 4 <sup>o</sup> pavimento	Espessura 8 cm
	Espessura de 25 cm acabamento reboco	Espessura de 15 cm acabamento reboco	Telha cerâmica

Fonte: Elaborado pela autora. Adaptado de Curcio (2011).

### **3.3 Modelagem do Caso Base e definição dos dados de entrada no software *EnergyPlus***

Para a modelagem do Caso Base será utilizada a interface gráfica do software *SketchUp® 2017* com o *plugin Euclid Version 0.9.4.1* e a simulação do modelo através do software *Energy Plus® Version 9.0.1*.

Parte do empreendimento foi considerada, em função da economia do tempo computacional da simulação. Dessa forma, foi modelado o setor grifado na Figura 17, com área de 410 m<sup>2</sup>, conforme segue.

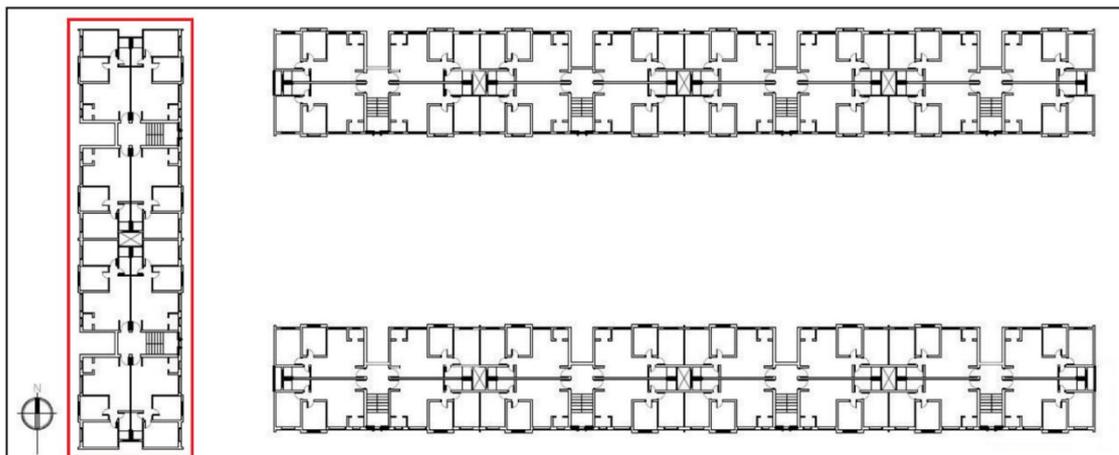


Figura 17 (sem escala) - Implantação do PAR Marcílio Dias com destaque ao setor modelado.

Fonte: Curcio (2011).

A edificação considerada possui 4 (quatro) pavimentos, 8 (oito) apartamentos por andar, além da área comum (corredor e escadas). Cada apartamento possui 2 (dois) dormitórios, 1 (um) banheiro e 1 (uma) cozinha/sala de estar, dessa forma, cada apartamento foi modelado com 4 (quatro) zonas térmicas. Cada apartamento possui 3 (três) ambientes de uso contínuo e 1 (um) de uso transitório. É possível visualizar a planta baixa do 4º pavimento na Figura 18.

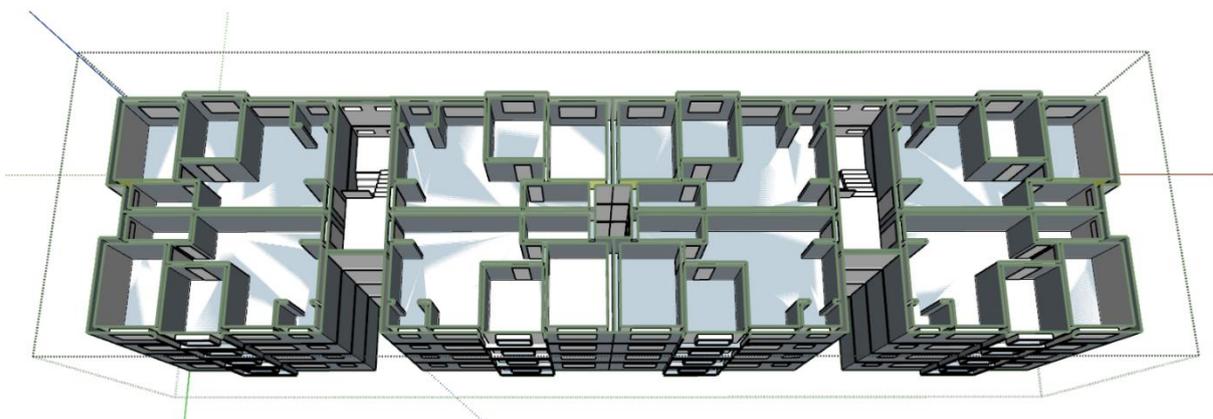


Figura 18 (sem escala) – Planta baixa do PAR Marcílio Dias. Fonte: A autora.

A edificação foi modelada com 136 (cento e trinta e seis) zonas térmicas. O Caso Base modelado está ilustrado nas Figuras 19 a 22.

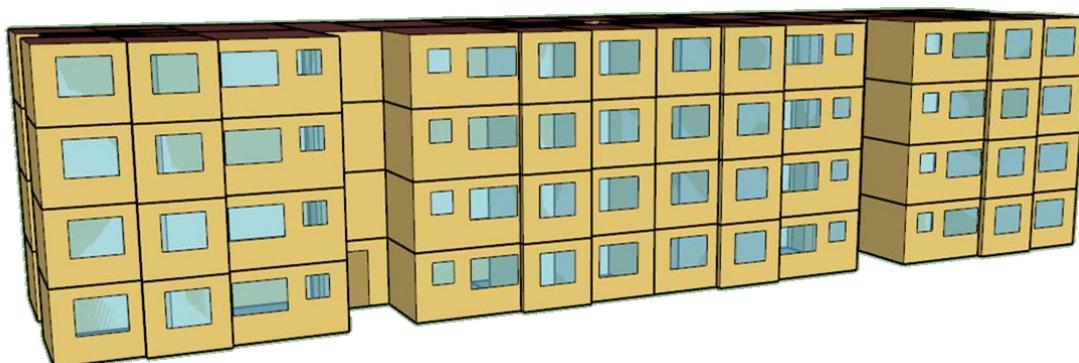


Figura 19 - Modelagem do PAR Marcílio Dias vista frontal. Fonte: A autora.

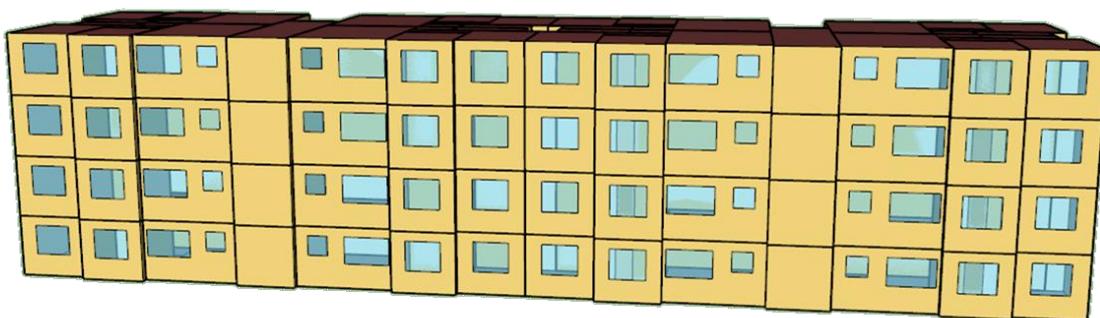


Figura 20 - Modelagem do PAR Marcílio Dias vista posterior. Fonte: A autora.

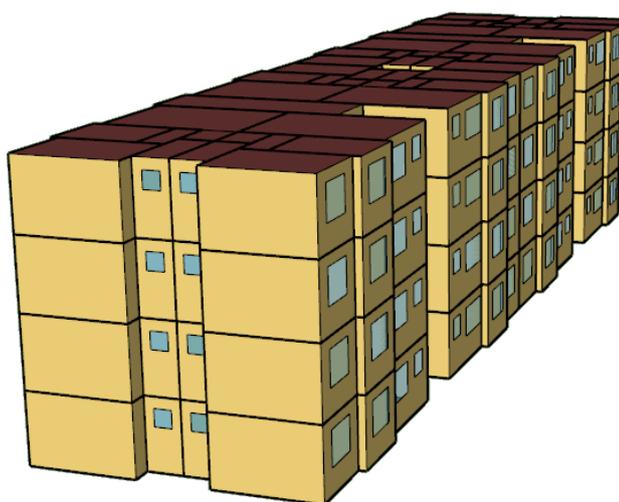


Figura 21 - Modelagem do PAR Marcílio Dias vista lateral direita. Fonte: A autora.

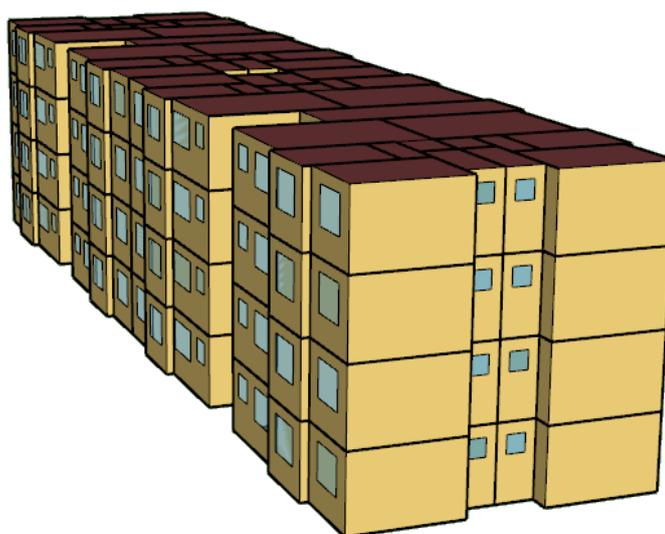


Figura 22 - Modelagem do PAR Marcílio Dias vista lateral esquerda. Fonte: A autora.

O modelo foi configurado para sua localização real, na cidade de Pelotas-RS (Latitude: 31°52'19" S, Longitude: 52°20'33" W), classificada como de clima subtropical úmido, de acordo com Kottek *et al.* (2006) e Cfa segundo a classificação climática de Köppen e Geiger. Dessa forma, para representar as características locais da ZB2 serão utilizados os arquivos climáticos da cidade de Pelotas/RS (LEITZKE *et al.*, 2018).

O padrão de ocupação adotado foi o padrão mínimo de ocupação, sendo duas pessoas por dormitório e quatro pessoas no ambiente de estar e cozinha. As agendas de ocupação serão modeladas separadamente para os dias de semana e finais de semana, conforme as Figuras 23 e 24, respectivamente (INMETRO, 2012).

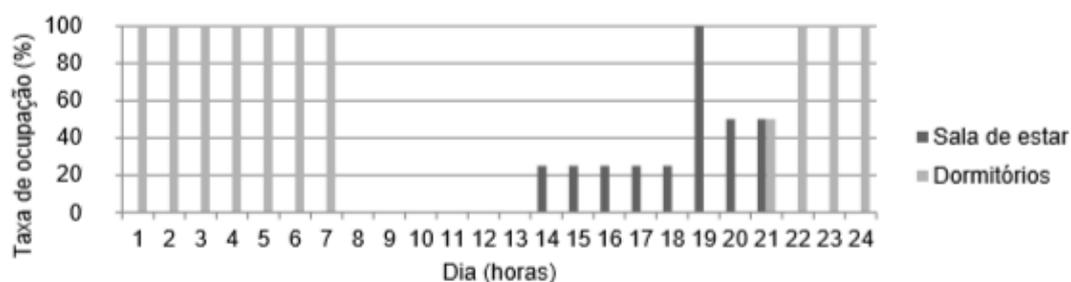


Figura 23 - Ocupação nos dias de semana. Fonte: INMETRO (2012).

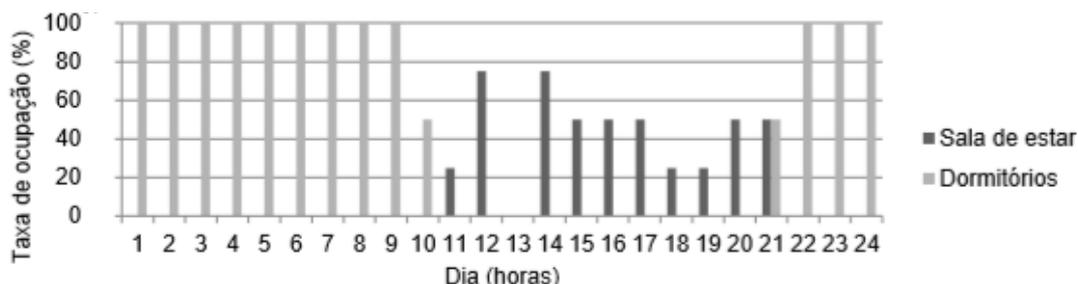


Figura 24 - Ocupação nos finais de semana. Fonte: INMETRO (2012).

A taxa metabólica será adotada de acordo com o tipo de atividade desempenhada em cada ambiente que é de 81 W por pessoa nos dormitórios e de 108 W por pessoa na sala de estar/cozinha. A taxa de infiltração adotada será de acordo com o RTQ-R, sendo 0,001 kg/s.m para quando as aberturas estão fechadas.

O padrão de iluminação será modelado apenas para os ambientes de permanência prolongada, separadamente para os dias de semana e final de semana, conforme apresentado nas Figuras 25 e 26, respectivamente. A densidade de potência instalada (DPI) de iluminação foi de 6 W/m<sup>2</sup> nas salas de estar e de 5 W/m<sup>2</sup> nos dormitórios (INMETRO, 2012).



Figura 25- Iluminação nos dias de semana. Fonte: INMETRO (2012).



Figura 26 - Iluminação nos finais de semana. Fonte: INMETRO (2012).

A densidade de carga interna com equipamentos será de 1,5 W/m<sup>2</sup> para a sala, considerada no período de 24 horas (INMETRO, 2012).

O sistema de climatização utilizado é um sistema misto de ventilação, ou seja, um sistema híbrido, com o objetivo de reduzir do consumo de energia, sua estratégia consiste na utilização da alternância entre ventilação natural e sistemas de condicionamento térmico (CBE, 2017), combinando as melhores características de ambos os sistemas (CIBSE, 2000). Essa ação, além de facilitar a economia de energia das edificações, também auxilia no aumento da qualidade do ar interno e satisfação dos usuários. Edifícios com sistemas mistos permitem que os ambientes sejam ventilados naturalmente durante os períodos em que se é viável ou desejável, sendo que o condicionamento de ar é utilizado apenas para ajuste suplementar da temperatura, quando em determinado momento a ventilação natural não for suficiente (BRAGER, 2006). Na simulação termoenergética a caracterização desse tipo de sistema leva em consideração as condições de conforto dentro dos ambientes observados. Isso quer dizer que quando a temperatura interna ultrapassar o limite, inferior ou superior, das temperaturas definidas para determinação da zona de conforto, o sistema de ar-condicionado é acionado, mantendo a satisfação térmica dos usuários. Neste caso, foi definida a temperatura do termostato de refrigeração de 24°C e de aquecimento é de 22°C, conforme o RTQ-R. O sistema de condicionamento foi configurado com um coeficiente de performance (COP) de 2,75 para aquecimento e 3,0 para resfriamento, também segundo o RTQ-R. A taxa de fluxo de ar por pessoa é de 0,00944 m<sup>3</sup>/s e a eficiência do motor e do ventilador foram configurados com valores de 0,90 e 0,70, respectivamente, de acordo com o RTQ-R (INMETRO, 2012). A ventilação híbrida foi configurada, através do *Energy Management System* (EMS), recurso que possibilita controles avançados durante o processo da simulação no programa EnergyPlus, para os ambientes de permanência prolongada (sala de estar e dormitórios) durante o período de ocupação da habitação.

Para a definição dos valores de temperatura do solo, o pré-processador Slab foi utilizado. O Slab é um programa auxiliar ao EnergyPlus. Ele calcula a temperatura média do solo para cada mês do ano, com base nos valores médios de temperaturas internas e externas da edificação, para o clima determinado. Logo, foi realizada uma simulação inicial para a verificação das temperaturas médias mensais do ar interno, em que o solo foi considerado sob uma condição

adiabática. Em seguida, as temperaturas médias mensais do ar interno obtidas foram configuradas e simuladas com o Slab, que corrige as temperaturas médias mensais do solo. Os resultados obtidos foram utilizados como dados de entrada na simulação no *EnergyPlus*.

Cabe destacar, que de acordo com a Instrução Normativa do Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais - INI-C e Consulta Pública da INI-R, para edificações Residenciais, o consumo d'água quente do edifício é dado por:

$$E_{AAE} = \frac{\rho \cdot C_p \cdot V_{dia,E} \cdot (\theta_{A,uso} - \theta_{A,0})}{3600}$$

Onde:

$E_{AAE}$  é a energia elétrica requerida para o atendimento da demanda diária de água quente (kWh/dia);

$\rho$  é a massa específica da água, equivalente a 1 kg/L;

$C_p$  é o calor específico da água, equivalente a 4.180 kJ/g.°C;

$V_{dia,E}$  é o volume diário de consumo de água quente em sistemas elétricos (m<sup>3</sup>/dia);

$\theta_{A,uso,armaz}$  é a temperatura de uso da água (°C);

$\theta_{A,0}$  é a temperatura da água fria (°C).

Considerando a temperatura média anual de Pelotas de 18°C (LEITZKE *et. al.*, 2018). 50 litros/pessoa/dia para o volume diário de consumo e duas pessoas por dormitório da Unidade Habitacional, temos que:

$$V_{dia,e\ ou\ t} = \frac{\sum V_{dia,f} \cdot f}{1000}$$

Onde:

$V_{dia,e\ ou\ t}$  é o volume diário de consumo de água quente (m<sup>3</sup>/dia) da unidade habitacional para sistemas térmicos ou elétricos;

$V_{dia,f}$  é o volume diário de consumo de água quente por pessoa em sistemas elétricos ou térmicos (L);

$f$  é o número de pessoas da unidade habitacional.

O volume diário de consumo de água quente é de 0,2 m<sup>3</sup>/dia por unidade habitacional, ou 200 l/dia, ou ainda 6,4 m<sup>3</sup>/dia o prédio como um todo. Assim como, a energia elétrica requerida para atendimento da demanda anual de água quente é de 1.872,5 kWh/ano por unidade habitacional e 59.920,00 kWh/ano para o prédio, considerando sistema sem termoacumulação e com temperatura de uso de 40°C.

### 3.4 Definição dos sistemas construtivos avaliados

A fim de estudar a contribuição do tipo de envelope no desempenho

térmico da edificação, foram realizadas simulações do Caso Base com variações no sistema construtivo, tanto das paredes externas quanto da cobertura. Para isso, foram definidas 5 (cinco) opções de paredes e cobertura, em função da capacidade térmica, sendo elas *Steel Frame* com telha de fibrocimento e 4 (quatro) variações de espessuras para concreto maciço com telha cerâmica, conforme exposto na Tabela 4, abrangendo valores de capacidade térmica de 56 a 440 kJ/m<sup>2</sup>K, nas paredes, e de 25 a 304 kJ/m<sup>2</sup>K, na cobertura.

Tabela 4 – Sistemas construtivos avaliados.

Casos (condição inicial)	Sistema Construtivo da Parede Externa	Composição Parede	Sistema Construtivo Cobertura	Composição da Cobertura	Fonte
<b>Caso 1</b>	<i>Steel Frame</i> <b>C<sub>T</sub> = 56,68 kJ/m<sup>2</sup>K</b>	Placa cimentícia 10mm	Telha fibrocimento <b>C<sub>T</sub> = 25 kJ/m<sup>2</sup>K</b>	Telha de fibrocimento 0,7 cm	LOBO (2018 p. 92)
		EPS 25 mm		Forro de madeira 1 cm	NBR 15220-3
		Placa OSB 8mm			
		Perfil metálico 0,95mm			
		Placa cimentícia 6mm			
<b>Caso 2</b>	Concreto maciço <b>C<sub>T</sub> = 143 kJ/m<sup>2</sup>K</b>	Concreto maciço <b>6,5 cm</b>	Telha cerâmica <b>C<sub>T</sub> = 194,4 kJ/m<sup>2</sup>K</b>	Laje <b>8 cm</b> Telha cerâmica 12,5 mm	NBR 15220-3
<b>Caso 3</b>	Concreto maciço <b>C<sub>T</sub> = 240 kJ/m<sup>2</sup>K</b>	Concreto maciço <b>10 cm</b>	Telha cerâmica <b>C<sub>T</sub> = 194,4 kJ/m<sup>2</sup>K</b>	Laje <b>8 cm</b> Telha cerâmica 12,5 mm	NBR 15220-3
<b>Caso 4</b>	Concreto maciço <b>C<sub>T</sub> = 330 kJ/m<sup>2</sup>K</b>	Concreto maciço <b>15 cm</b>	Telha cerâmica <b>C<sub>T</sub> = 282,4 kJ/m<sup>2</sup>K</b>	Laje <b>12 cm</b> Telha cerâmica 12,5 mm	NBR 15220-3
<b>Caso 5</b>	Concreto maciço <b>C<sub>T</sub> = 440 kJ/m<sup>2</sup>K</b>	Concreto maciço <b>20 cm</b>	Telha cerâmica <b>C<sub>T</sub> = 304,4 kJ/m<sup>2</sup>K</b>	Laje <b>13 cm</b> Telha cerâmica 12,5 mm	NBR 15220-3

Fonte: Elaborado pela autora.

Além de testar diferentes capacidades térmicas, a transmitância térmica da parede externa e da cobertura também é analisada. Para que isso seja possível, em função de uma limitação do algoritmo multiobjetivo utilizado, é necessário adicionar uma camada de EPS nas composições, de modo que sua

espessura varie para que assim seja testado um intervalo de valores de transmitâncias térmicas entre 0,5 e 2,5 W/m<sup>2</sup>K, conforme os cálculos expostos no Apêndice 1. Assim, para cada sistema construtivo definido pela capacidade térmica, tem-se transmitâncias entre 0,5 e 2,5 W/m<sup>2</sup>K, sob variação da espessura do EPS. Essas novas composições se apresentam conforme a Tabela 5.

Tabela 5 – Composições dos sistemas construtivos avaliados.

<b>Casos</b>	<b>Sistema Construtivo da Parede Externa</b>	<b>Composição Parede</b>	<b>Sistema Construtivo Cobertura</b>	<b>Composição da Cobertura</b>	<b>Fonte</b>	
<b>Caso 1</b>	<i>Steel Frame</i> $C_T = 56,68$ kJ/m <sup>2</sup> K	Placa cimentícia 10mm	Telha fibrocimento $C_T = 25$ kJ/m <sup>2</sup> K	Telha de fibrocimento 0,7 cm	LOBO (2018 p. 92)	
		<b>EPS</b>		Camada de ar		
		Placa OSB 8mm		Perfil metálico 0,95mm	<b>EPS</b>	NBR 15220-3
		Placa cimentícia 6mm		Forro de madeira 1 cm		
<b>Caso 2</b>	Concreto maciço $C_T = 143$ kJ/m <sup>2</sup> K	Concreto maciço 3,25cm	Telha cerâmica $C_T = 194,4$ kJ/m <sup>2</sup> K	Telha cerâmica 12,5 mm	NBR 15220-3	
		<b>EPS</b>		Camada de ar		
		Concreto maciço 3,25cm		Laje 8 cm		
<b>Caso 3</b>	Concreto maciço $C_T = 240$ kJ/m <sup>2</sup> K	Concreto maciço 5 cm	Telha cerâmica $C_T = 194,4$ kJ/m <sup>2</sup> K	Telha cerâmica 12,5 mm	NBR 15220-3	
		<b>EPS</b>		Camada de ar		
		Concreto maciço 5 cm		Laje 8 cm		
<b>Caso 4</b>	Concreto maciço $C_T = 330$ kJ/m <sup>2</sup> K	Concreto maciço 7,5 cm	Telha cerâmica $C_T = 282,4$ kJ/m <sup>2</sup> K	Telha cerâmica 12,5 mm	NBR 15220-3	
		<b>EPS</b>		Camada de ar		
		Concreto maciço 7,5 cm		Laje 12 cm		
<b>Caso 5</b>	Concreto maciço $C_T = 440$ kJ/m <sup>2</sup> K	Concreto maciço 10 cm	Telha cerâmica $C_T = 304,4$ kJ/m <sup>2</sup> K	Telha cerâmica 12,5 mm	NBR 15220-3	
		<b>EPS</b>		Camada de ar		
		Concreto maciço 10 cm		Laje 13 cm		

Fonte: Elaborado pela autora.

### 3.5 Definição das variáveis consideradas

Os valores utilizados como limites da análise multiobjetivo adotada se basearam no RTQ-R, nas normas NBR 15220, NBR 15575, e representam a sensibilidade das variáveis 4.1.1 no processo de simulação.

As variáveis, que influenciam o desempenho termoenergético de uma edificação, e seus limites inferior e superior, que são consideradas neste estudo podem ser visualizados na Tabela 6 a seguir.

Tabela 6 – Variáveis utilizadas e seus limites inferior e superior.

Variável	Limite inferior	Limite superior
Orientação Solar	0°	359°
Absortância solar da cobertura	0,3	0,9
Absortância solar da parede	0,3	0,9
Espessura - EPS da parede Caso 1	0,0048 (U= 2,5 W/m <sup>2</sup> K)	0,0528 (U= 0,5 W/m <sup>2</sup> K)
Espessura - EPS da cobertura Caso 1	0,0001 (U= 2 W/m <sup>2</sup> K)	0,045 (U = 0,5 W/m <sup>2</sup> K)
Espessura - EPS da parede Caso 2	0,005785 (U= 2 W/m <sup>2</sup> K)	0,05378 (U= 0,5 W/m <sup>2</sup> K)
Espessura - EPS da cobertura Caso 2	0,0006 (U= 2,5 W/m <sup>2</sup> K)	0,045 (U = 0,5 W/m <sup>2</sup> K)
Espessura - EPS da parede Caso 3	0,0052 (U= 2,5 W/m <sup>2</sup> K)	0,0532 (U= 0,5 W/m <sup>2</sup> K)
Espessura - EPS da cobertura Caso 3	0,0006 (U= 2 W/m <sup>2</sup> K)	0,045 (U = 0,5 W/m <sup>2</sup> K)
Espessura - EPS da parede Caso 4	0,00433 (U= 2,5 W/m <sup>2</sup> K)	0,0523 (U= 0,5 W/m <sup>2</sup> K)
Espessura - EPS da cobertura Caso 4	0,0001 (U= 2 W/m <sup>2</sup> K)	0,045 (U = 0,5 W/m <sup>2</sup> K)
Espessura - EPS da parede Caso 5	0,0035 (U= 2,5 W/m <sup>2</sup> K)	0,0515 (U= 0,5 W/m <sup>2</sup> K)
Espessura - EPS da cobertura Caso 5	0,0001 (U= 2 W/m <sup>2</sup> K)	0,0448 (U = 0,5 W/m <sup>2</sup> K)

Fonte: A autora.

### 3.6 Otimização das propriedades térmicas do envelope

Para determinar as propriedades térmicas do envelope que melhor atendem à obtenção de uma edificação NZEB, considerando uma demanda objetivo máxima de 15 kWh/(m<sup>2</sup>ano) de aquecimento, assim como de resfriamento, será utilizado um algoritmo evolutivo multiobjetivo, que vai avaliar o comportamento das variáveis em cada geração, através da abordagem de otimização NSGA-II.

Entre os algoritmos existentes na literatura, utilizados para problemas de otimização multiobjetivo, o *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II* - NSGA-II é um dos mais citados para algoritmos evolutivos. Proposto por Deb *et al.* (2002), o NSGA-II usa elitismo e ordena sua população com base no ranking de não-dominância e distanciamento de aglomerações (*crowding distance*).

O número de classificação de um indivíduo indica quantas soluções o dominam. Portanto, as soluções do ranking 0 (zero) não são dominadas por nenhuma outra solução. Para a manutenção da diversidade, o NSGA-II inclui um atributo de distância de aglomeração (*crowding distance*), calculado para cada indivíduo (solução), que identifica a proximidade da solução com aglomerações em sua vizinhança. Valores baixos para esse atributo indicam que uma solução pode estar muito próxima à sua vizinhança. Valores elevados para esse atributo podem indicar um melhor espalhamento ou melhor diversidade para as soluções. A Figura 27 descreve como é calculado o *crowding distance* de cada solução de um conjunto de aproximação. Um *crowding distance* elevado é bom para a diversidade. Por não possuírem vizinhos exteriores, em algum objetivo, as extremidades do conjunto de aproximação possuem *crowding distance* infinito, de acordo com Sampaio (2019).

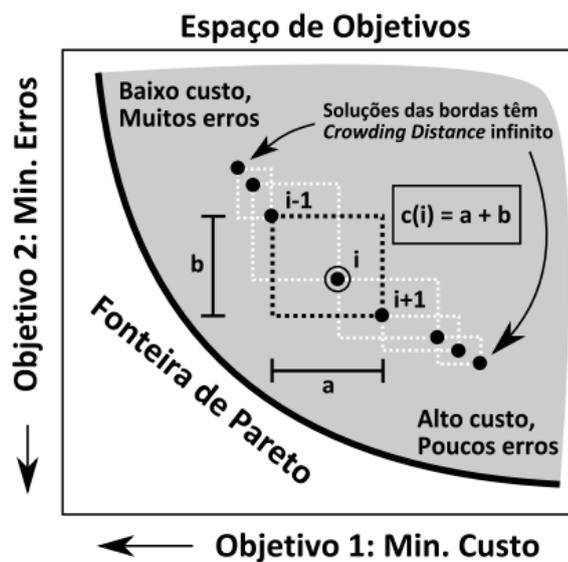


Figura 27 - Cálculo da distância de aglomerações. Quanto maior a soma de "a" e "b", maior o *crowding distance* da solução "i". Para NSGA-II Fonte: Sampaio (2019).

Cabe destacar que, as etapas do NSGA-II podem ser descritas como:

1. Criar uma população inicial aleatória "P", de tamanho "N";
2. Avaliar cada solução da população;
3. Selecionar pares de soluções, por "rounds", para a geração da população de descendentes;
4. Recombinar os pares de soluções para obter "N" novas soluções descendentes, com uma probabilidade de cruzamento;

5. Aplicar operadores de mutação sobre as novas soluções obtidas, com uma dada probabilidade de mutação;
6. Avaliar cada nova solução obtida (população de descendentes);
7. Adicionar a população de descendentes à população de pais (que passará a ter tamanho “2 \*N”);
8. Classificar a nova população por ranking de não-dominância, em ordem crescente (quanto menor a posição, melhor) e por distância de aglomeração em ordem decrescente (quanto maior a distância de aglomeração, melhor);
9. Manter na população apenas os melhores “N” indivíduos e remover as soluções restantes; e
10. Repetir o processo a partir do item 3, até que o critério de parada seja atingido, consoante Sampaio (2019).

Portanto, a abordagem de otimização adotada será a NSGA-II.

### **3.6.1 Dimensionamento da população para a Otimização Multiobjetivo**

Na utilização de Algoritmos Genéticos Multiobjetivo pretende-se conseguir uma boa convergência, manter a diversidade da população e reduzir o esforço computacional. Para alcançar esses três objetivos depende-se fortemente da população inicial, sendo que, uma população de baixa qualidade pode comprometer todo o processo de busca (BURKE *et al.*, 2004; ZITZLER *et al.*, 2000).

O tamanho da população refere-se ao número de soluções a serem avaliadas em cada iteração. Mesmo existindo diversos trabalhos que comprovem que a geração da população inicial não é uma fase crítica em Algoritmos Genéticos, indicando que os mesmos conseguem evoluir para soluções satisfatórias independentemente do conjunto de indivíduos que compõem a população inicial, é importante que a mesma contenha indivíduos suficientemente diversificados (CASTRO, 2001).

Deb *et al.* (2002) apresentaram o algoritmo genético de classificação não-dominado II (NSGA-II) como uma das melhores técnicas para obter fronteiras de Pareto, que na maioria das vezes, gera a população inicial de indivíduos de forma aleatória.

Sabe-se que quanto maior o tamanho da população, maior o número de gerações para obter convergência adequada para o valor otimizado e maior o esforço computacional (SILVA, 2015). Dessa forma, inicialmente foi testado um tamanho de população inicial igual a 128, com 90 soluções, pois de acordo com Silva (2015), esse mecanismo ajuda a descartar soluções com valores de objetivos muito similares e mantém a diversidade na população. Contudo, o tempo de simulação se tornou muito extenso, mais de 5 dias rodando sem a obtenção de resultados, em função do modelo ser pesado por se tratar de um edifício de 4 (quatro) andares.

Por isso, o tamanho da população foi diminuindo gradualmente ao passo que testes iam sendo realizados, até que, as configurações seguiram as recomendações de Chen *et al.* (2015) e Mauro *et al.* (2015), atendendo ao tamanho populacional de duas a quatro vezes superior ao número de variáveis. Como o Caso analisado possui 4 (quatro) variáveis, foi considerada uma população com tamanho de 16 (dezesesseis), com 90 gerações, essa configuração levou em torno de 2 (dois) dias para gerar os resultados de cada Caso.

### **3.7 Avaliação do desempenho termoenergético**

A avaliação do consumo termoenergético total de cada resultado obtido na etapa anterior, foi feita visando a determinação do resultado ótimo, que possui o menor consumo termoenergético total em kWh/m<sup>2</sup>.ano. Será apresentada no capítulo 4.

### **3.8 Cálculo da geração de energia fotovoltaica por meio dos dados do programa Radasol**

Uma ferramenta disponível que possibilita a estimativa da produção de energia elétrica através da conversão fotovoltaica é o software Radasol (LABSOL UFRGS, 2019), que, a partir dos dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar (PEREIRA *et al.*, 2017), — que considera a disponibilidade do recurso solar através do arquivo climático local — estima a intensidade da radiação solar direta e difusa em superfícies inclinadas. Desse modo, com os valores acumulados da radiação incidente, utilizando fatores de eficiência na conversão, o referido programa estima a quantidade de energia elétrica produzida em determinado

tempo, com a inclinação e o desvio azimutal específicos para a região climática analisada.

Portanto, para a realização deste estudo, optou-se pelo o cálculo direto da geração fotovoltaica com o auxílio do programa Radiasol e o banco de dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar. Conforme revisão da literatura realizada no capítulo 2, estudos confirmam que, apesar do EnergyPlus ser identificado como uma excelente ferramenta de análise de consumo de energia, o programa não é indicado para uso de análise de desempenho de SFV, pois seus os dados não são precisos. Portanto, para os cálculos da estimativa de geração de energia elétrica foi através dos módulos fotovoltaicos, optou-se pela programa Radiasol. (LABSOL UFRGS, 2019).

Para a realização desses cálculos, foi utilizada a Equação 1, por meio da identificação dos consumos de energia dos Casos em estudo, dos dados de disponibilidade de irradiação solar local e das características dos SFV adotados.

$$E = P_{FV} \cdot H_{tot} \cdot R/G \quad (1)$$

Onde:

E é a energia gerada pelo módulo fotovoltaico (kWh).

$P_{FV}$  é a potência fotovoltaica instalada (kWp).

$H_{tot}$  é a irradiação diária (kWh/m<sup>2</sup>/dia).

R é o rendimento do sistema conectado (inversor e conexões).

G é a irradiância na condição STC - *Standard Testing Conditions* (Condições padrões de teste) (1000W/m<sup>2</sup>).

O valor da potência fotovoltaica instalada é o mesmo que a potência nominal do módulo escolhido, a irradiação diária recebida no plano do painel fotovoltaico foi obtida através do programa Radiasol (LABSOL UFRGS, 2019). No que diz respeito ao rendimento do sistema, foi determinado o valor de 0,8 por ser o do sistema de 2 kWp do LABSOLAR, em operação desde 1997 (RUTHER, 2004), e usualmente recomendado pela literatura (ZOMER, 2010). Enquanto que, para o valor da irradiância 'G' na condição STC considera-se 1000W/m<sup>2</sup>.

A escolha do tipo de módulo ocorreu em função de sua maior eficiência e por possuir classificação "A" em eficiência energética. O modelo utilizado foi o JKM410M-6RL3 (JINKO SOLAR, 2021), composto por 132 células de silício

monocristalino, de dimensões de 1855x1029x30mm (Figura 32). Suas características são apresentadas na Tabela 7.



Figura 28: Módulo JKM410M-6RL3 – 410W do Jinko Solar Fonte: JINKO SOLAR, 2021.

Tabela 7 – Dimensões e Parâmetros elétricos do módulo Fotovoltaico.

<b>Parâmetros do Módulo Fotovoltaico</b>	<b>Valores</b>
Área	1,91 m <sup>2</sup>
Número de células em série	132 (2x66)
Potência nominal	410 Wp
Tensão de potência máxima	36,84 Vmp
Corrente de potência máxima (Imp)	11,13 V
Tensão de circuito aberto (Vco)	44,29 A
Corrente de curto-circuito (Isc)	11,79 V
Eficiência do módulo STC	21,48%
Temperatura de operação	-40 ~ +85 °C
Tensão máxima do sistema	1000/1500 VDC
Classificação máxima de fusível em série	20 A
Tolerância de potência	0~+3 %
Coefficiente de temperatura de Pmax	-0,35 % <sup>°C</sup>
Coefficiente de temperatura Voc	-0,28 % <sup>°C</sup>
Coefficiente de temperatura Isc	0,048 % <sup>°C</sup>
Temperatura operacional nominal da célula (NOCT)	45 ± 2 °C

Fonte: Adaptado de JINKO SOLAR, 2021.

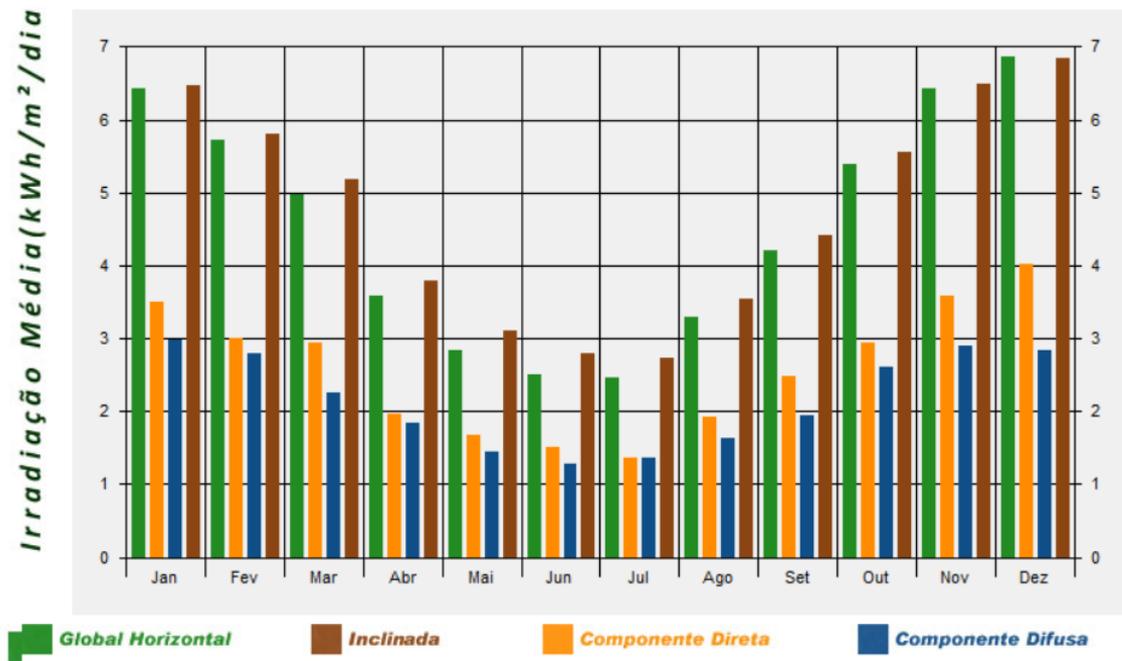


Figura 29 – Gráfico das radiações incidentes sobre a cobertura inclinada de 6° orientada para a fachada norte. Fonte: RADIASOL 2. Laboratório de Energia Solar (UFRGS, 2009).

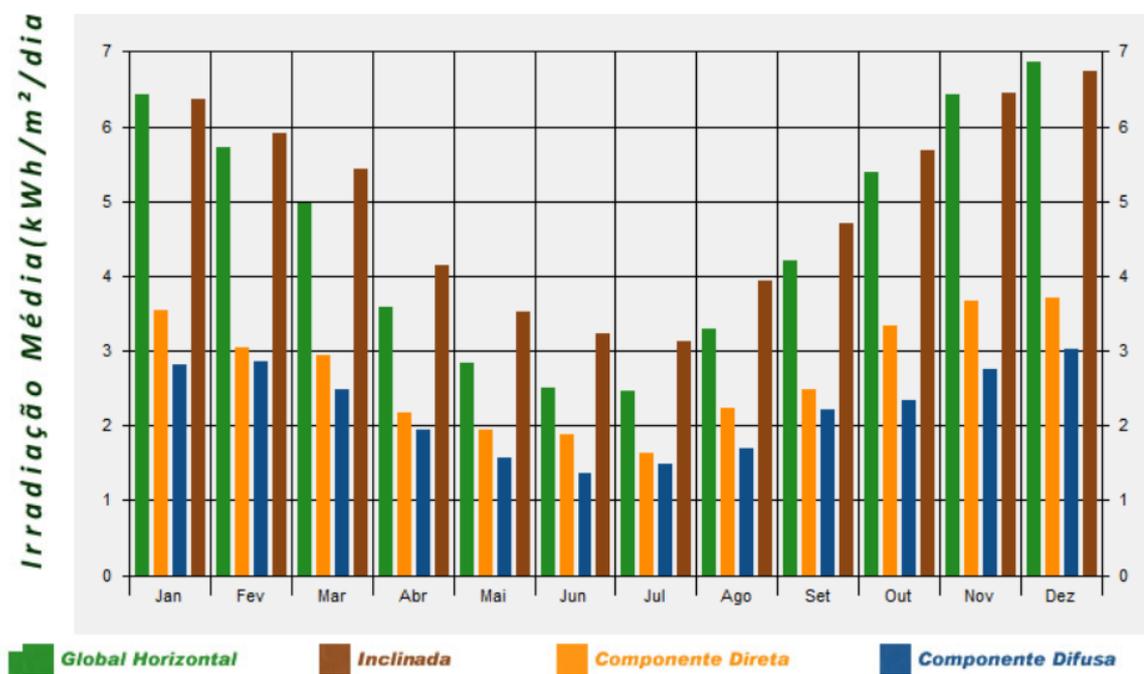


Figura 30 – Gráfico das radiações incidentes sobre a cobertura inclinada de 14° orientada para a fachada norte. Fonte: RADIASOL 2. Laboratório de Energia Solar (UFRGS, 2009).

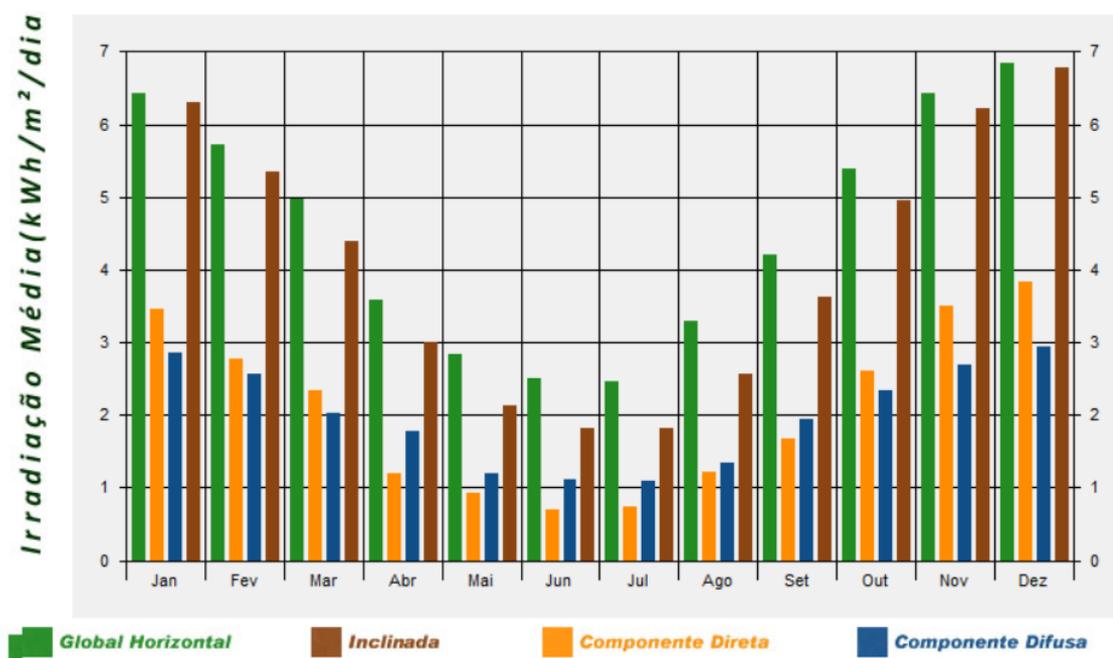


Figura 31 – Gráfico das radiações incidentes sobre a cobertura inclinada de 14° orientada para a fachada sul. Fonte: RADIASOL 2. Laboratório de Energia Solar (UFRGS, 2009).

### 3.9 Análise de viabilidade econômica

A análise econômica foi realizada com base nos dados de consumo energético do edifício, obtidos a partir do programa *EnergyPlus*, dos cálculos de geração de energia dos módulos FV e de uma orçamentação, baseada no sistema de custos do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI), que fornece, mensalmente, dados de custos médios de materiais, equipamentos e das composições dos serviços. Ele foi idealizado pela Caixa Econômica Federal e pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e é utilizado como limitador de preço para a construção de setores de saneamento básico, infraestrutura e habitação que utilizam recursos do Orçamento Geral da União, segundo a Lei de Diretrizes Orçamentárias desde sua edição anual de 2003 (CAIXA ECONÔMICA FEDERAL, 2019).

É importante destacar que, a mão de obra do serviço, a instalação dos módulos fotovoltaicos e outros itens como por exemplo, parafusos para fixação, massa para juntas, dentre outros não foram contabilizados, em função da dificuldade de estimar suas quantidades e valores necessários.

Outro fator relevante que deve ser mencionado é que, apesar da viabilidade

econômica dos Casos considerados levar em consideração apenas a envoltória, ou seja, fechamento externo do prédio (parede externa e cobertura) outros elementos relevantes, que seriam alterados na troca da tipologia construtiva como, estrutura, fundações e revestimentos não estão sendo computados, devido a complexidade da aferição de suas alterações, que só seriam corretamente quantificadas, através do redimensionamento da estrutura ou definições projetuais.

Diante dessas considerações, foi consultado o Relatório de Insumos e Composições SINAPI da Caixa Econômica Federal com data base de janeiro de 2022, para o Rio Grande do Sul. Assim como, o tempo de retorno foi calculado através de uma análise de payback, simples, conforme Dalbem (2018).

## 4 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos por meio da aplicação do método proposto no objeto de estudo.

### 4.1 Caso Base

Neste item serão apresentados os resultados para o Caso Base, a partir do projeto original apresentado no item **3.2 Definição do Caso Base**.

#### 4.1.1 Consumo de energia

O consumo de energia da edificação em seu Caso Base considerando seus sistemas (iluminação, climatização e equipamentos), assim como, a energia elétrica requerida para atendimento da demanda anual de água quente é de 344.125,72 kWh/ano, resultado do programa *EnergyPlus*, versão 9.0.1, conforme citado no método.

Considerando que o custo do kWh.ano é de R\$ 0,90 tem-se um custo de R\$ 233.061,98 ao total.

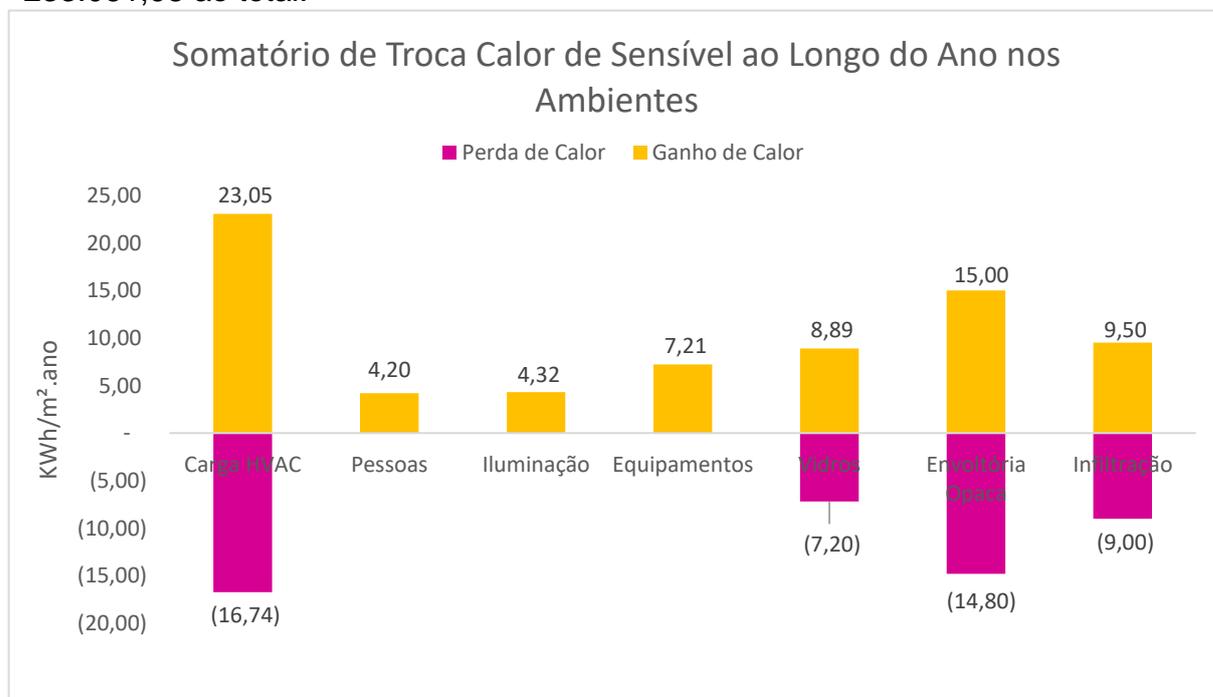


Figura 32 – Gráfico do somatório de troca de calor sensível ao longo do ano nos ambientes para o Caso Base. Fonte: A autora.

Na Figura 32 é possível visualizar o somatório da troca de calor de sensível ao longo do ano nos ambientes para o caso base. Pode-se observar que o consumo de energia do sistema de ar condicionado corresponde à 23,05 kWh/m<sup>2</sup>.ano, para aquecimento, 16,74 kWh/m<sup>2</sup>.ano, para resfriamento.

#### 4.1.2 Custo da envoltória

Cabe destacar que, o custo total da envoltória da condição inicial do PAR Marcílio Dias, ou seja, para o Caso Base é exposta na Tabelas 8, de acordo com o Relatório de Insumos e Composições SINAPI da Caixa Econômica Federal com data base de janeiro de 2022, para o Rio Grande do Sul, conforme segue:

Tabela 8 – Quantitativo da condição inicial.

Descrição do Insumo	Unidade	Preço Médio por unidade	Quantidade necessária	Preço Médio Total da Envoltória do Prédio
Parede externa de Tijolos maciços (1° ao 3° pavimento) e = 25 cm	m <sup>2</sup>	R\$ 117,83	937,5 m <sup>2</sup>	R\$ 110.465,63
Parede externa de Tijolos furados (4° pavimento) e = 25 cm	m <sup>2</sup>	R\$ 84,13	312,5 m <sup>2</sup>	R\$ 26.290,63
Laje pré-moldada e = 8 cm	m <sup>2</sup>	R\$ 94,98	410 m <sup>2</sup>	R\$ 38.941,80
Telha cerâmica portuguesa 40,2x24,3cm	m <sup>2</sup>	R\$ 27,20	410 m <sup>2</sup>	R\$ 11.152,00
Total				R\$ 186.850,06

Fonte: A autora.

#### 4.2 Caso 1

Os resultados para o Caso 1, que possui sistema construtivo apresentado na Tabela 9, que segue abaixo, estão expostos na Tabela 10, conforme segue:

Tabela 9 – Sistema construtivo do Caso 1.

	Sistema Construtivo Parede Externa	Composição Parede ext	Sistema Construtivo Cobertura	Composição da Cobertura
<b>Caso 1</b>	<i>Steel Frame</i> C <sub>T</sub> = 56,68 kJ/m <sup>2</sup> K	Placa cimentícia 10mm	Telha fibrocimento C <sub>T</sub> = 25 kJ/m <sup>2</sup> K	Telha de fibrocimento 0,7 cm
		EPS		Camada de ar
		Placa OSB 8mm		EPS
		Perfil metálico 0,95mm		Forro de madeira 1 cm
		Placa cimentícia 6mm		

Fonte: A autora.

Tabela 10 – Resultados para o Caso 1 em comparação com o Caso Base.

nº ident.	Orientação Solar (º)	Absortância Solar Telha fibrocimento	Absortância Solar Parede ext.	Espessura EPS Parede ext. (m)	Transmitância Térmica Parede ext. (W/(m².K))	Espessura EPS Cobertura (m)	Transmitância Térmica Cobertura (W/(m².K))	Consumo p/ Resfriamento (kWh/m².ano)	Consumo p/ Aquecimento (kWh/m².ano)	Consumo Termoenergético Total (kWh/m².ano)
<b>Caso Base</b>	90,00	0,70	0,60	0,00	1,61	0,00	2,10	16,74	23,05	39,79
<b>1</b>	2,79	0,90	0,89	0,05	0,50	0,04	0,51	11,68	3,29	14,97
<b>2</b>	10,54	0,30	0,34	0,04	0,65	0,03	0,73	3,20	13,25	16,45
<b>3</b>	187,58	0,33	0,87	0,05	0,53	0,04	0,51	8,02	5,28	13,29
<b>4</b>	350,13	0,80	0,85	0,04	0,58	0,04	0,52	10,27	4,07	14,33
<b>5</b>	359,16	0,71	0,87	0,05	0,53	0,04	0,51	5,59	5,32	10,91
<b>6</b>	3,08	0,33	0,31	0,05	0,57	0,04	0,56	3,38	10,02	13,40
<b>7</b>	18,44	0,31	0,58	0,04	0,58	0,04	0,54	4,55	7,90	12,45
<b>8</b>	1,73	0,37	0,50	0,04	0,58	0,03	0,63	4,53	9,30	13,84

Fonte: A autora.

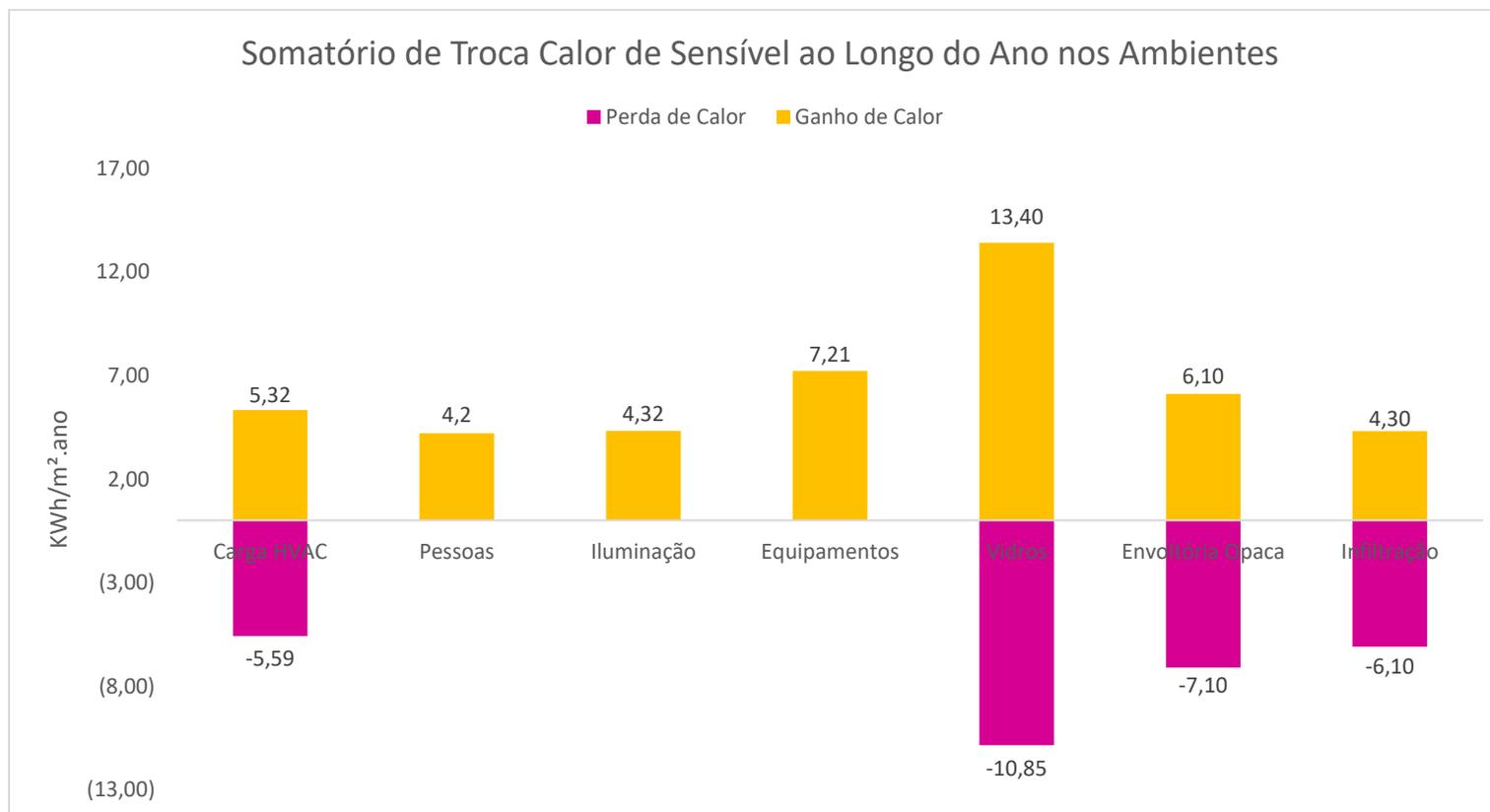


Figura 33 – Gráfico do somatório de troca de calor sensível ao longo do ano nos ambientes para o Caso 1 ótimo (nº de identificação 5). Fonte: A autora.

Salientando que os valores de consumo energético não incluem o aquecimento de água, mas este será incluído no balanço NZEB com geração FV.

De posse destes dados, é possível perceber que, dentre as 8 soluções obtidas, a nº 5 foi a que apresentou menor consumo termoenergético, logo caracteriza-se por ser a solução ótima, que apresenta valores de orientação solar 359,16°; absorvância solar da telha de fibrocimento 0,71; absorvância solar da parede externa 0,87; transmitância térmica da parede de 0,53 W/(m².K), transmitância térmica da cobertura de 0,51 W/(m².K) e consumo termonenergético total de 10,91 kWh/m².ano.

Ao analisar a Figura 33 do Caso 1 e comparar com as informações do Caso Base (Figura 32) é possível perceber que houve uma redução tanto no consumo de climatização artificial. Assim como, uma redução dos ganhos de calor pelos vidros.

Em função da orientação solar no quadrante norte, os ganhos de calor (pelos vidros) aumentaram significativamente no período de inverno, quando é necessário visando o conforto térmico. Nas perdas de calor através dos vidros houve um pequeno aumento, pois os vidros não foram alterados e como a temperatura interna aumentou, as perdas também aumentam. No balanço anual houve uma redução das perdas e dos ganhos através da envoltória, devido ao aumento do isolamento desta. Quanto à infiltração houve uma redução dos ganhos e um pequeno aumento das perdas. Como o Caso 1 apresenta melhor desempenho sobretudo no inverno, quando as janelas permanecem mais tempo fechadas e com temperaturas internas mais elevadas do que o Caso Base, há coerência em perder um pouco mais de calor e ganhar um pouco menos de calor por meio de infiltração do ar exterior.

Cabe destacar que das soluções obtidas, todas possuem implantação das maiores faces sobre o eixo N-S.

Na Figura 34 é apresentado um gráfico com eixos que indicam as duas variáveis-objetivo do modelo: a intensidade do uso de energia (*Energy Use Intensity* - EUI) para aquecimento e resfriamento. Os pontos vermelhos apontam as soluções verdadeiras (*True*) para frente de Pareto do conjunto analisado.

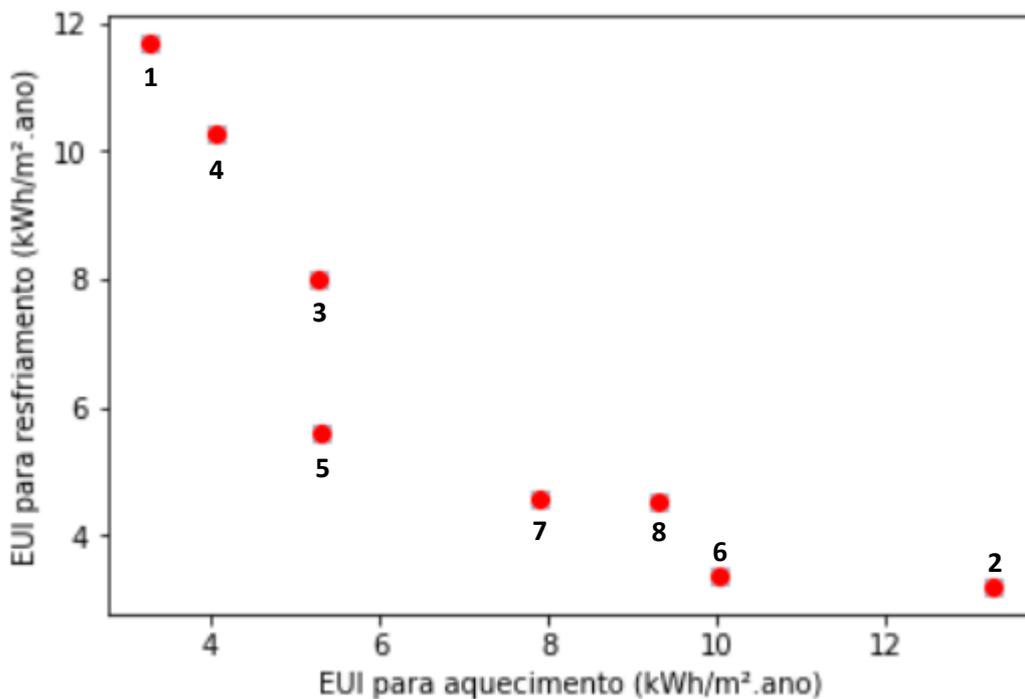


Figura 34 – Curva de Pareto para o Caso 1. Fonte: A autora.

#### 4.2.1 Orientação solar

Cabe destacar que, as maiores fachadas de todos os Casos estão voltadas para as orientações solares norte x sul, na qual a fachada principal está voltada para o sul, mas tem sua correspondente simétrica voltada para o norte. Por isso, foi feita uma comparação entre um apartamento do 4º pavimento voltado para o norte e um apartamento, também no 4º pavimento, orientado para o sul. A Figura 35 mostra a o apartamento analisado ao sul e a Figura 36 o apartamento ao norte. Na Figura 37 é possível visualizar o consumo termoenergético de ambos.

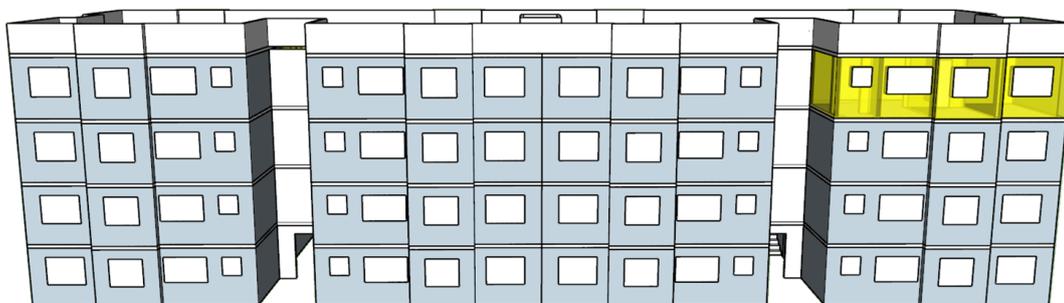


Figura 35 – Fachada orientada para o sul com ênfase ao apartamento analisado.

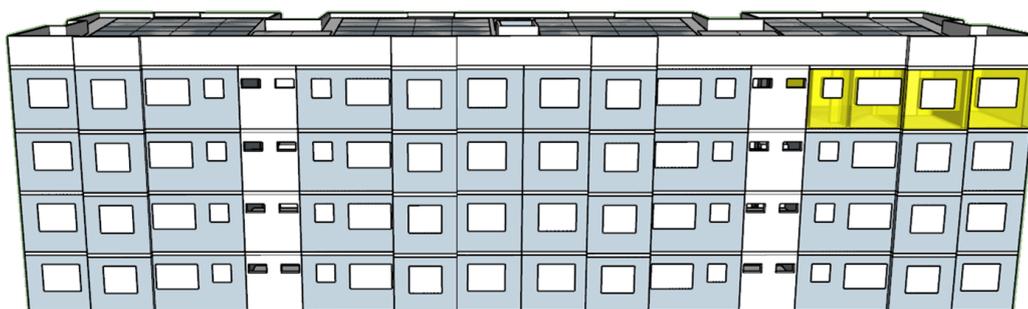


Figura 36 – Fachada orientada para o norte com ênfase ao apartamento analisado.

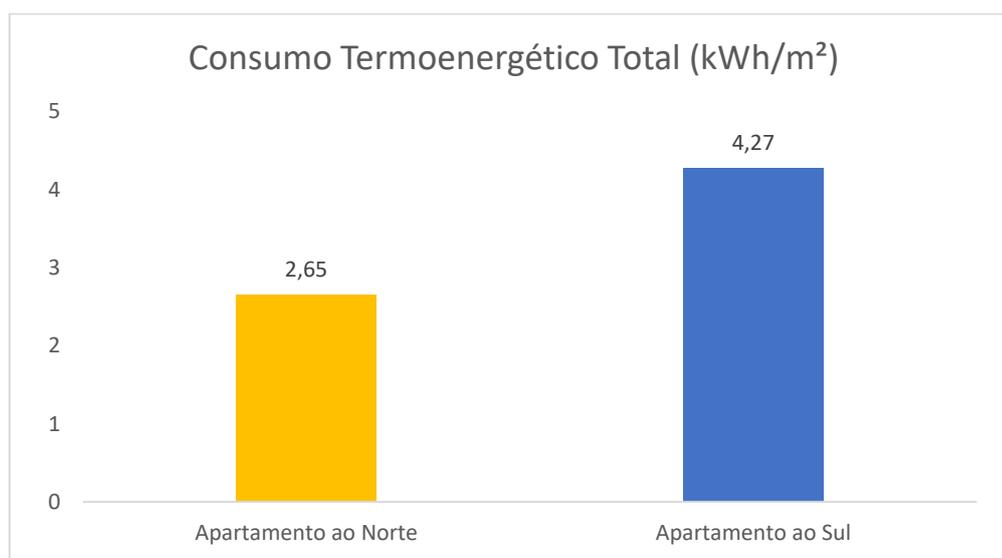


Figura 37 – Gráfico comparativo do consumo termoenergético de um apartamento voltado para o sul x apartamento orientado para o norte.

Através da Figura 37 é possível notar que o apartamento com fachada voltada para a orientação solar norte possui um menor consumo termoenergético quando comparado ao apartamento orientado ao sul, conforme já esperado, visto que, para localidades do hemisfério sul, que é o caso do presente estudo, os maiores ganhos solares de inverno ocorrem em fachadas voltadas para a direção norte geográfica devido à inclinação da trajetória solar ao longo do dia.

Foi realizada também uma comparação entre dois apartamentos do 3º pavimento, para que não haja interferência da cobertura, um deles voltado para o norte outro para a orientação sul, apartamentos no centro do prédio, para não ter a influência das demais orientações. A Figura 38 mostra a o apartamento analisado ao sul e a Figura 39 o apartamento ao norte. Na Figura 40 é possível visualizar o consumo termoenergético de ambos. A diferença de consumo entre os apartamentos, neste caso, foi superior a 30%. O que demonstra a importância

da orientação solar dos apartamentos, além da orientação da implantação do edifício, identificada pelos resultados do algoritmo multiobjetivo.

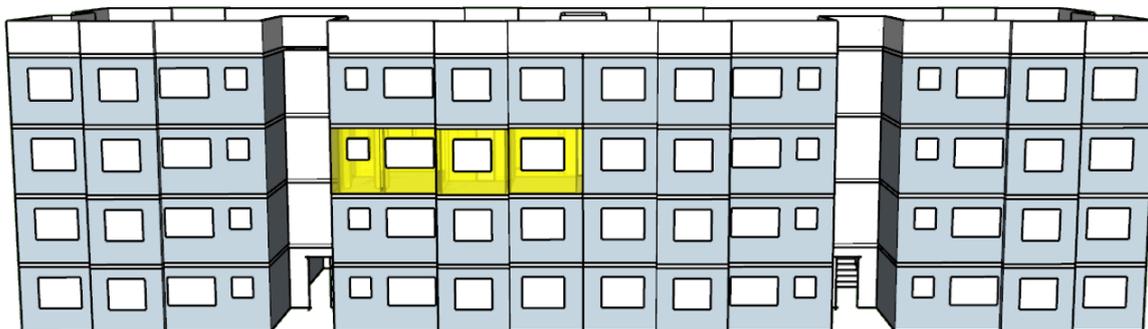


Figura 38 – Fachada orientada para o sul com ênfase ao apartamento analisado.

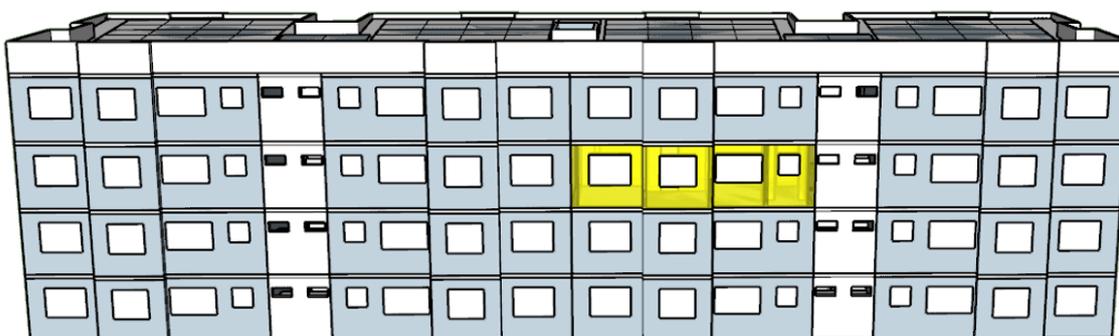


Figura 39 – Fachada orientada para o norte com ênfase ao apartamento analisado.

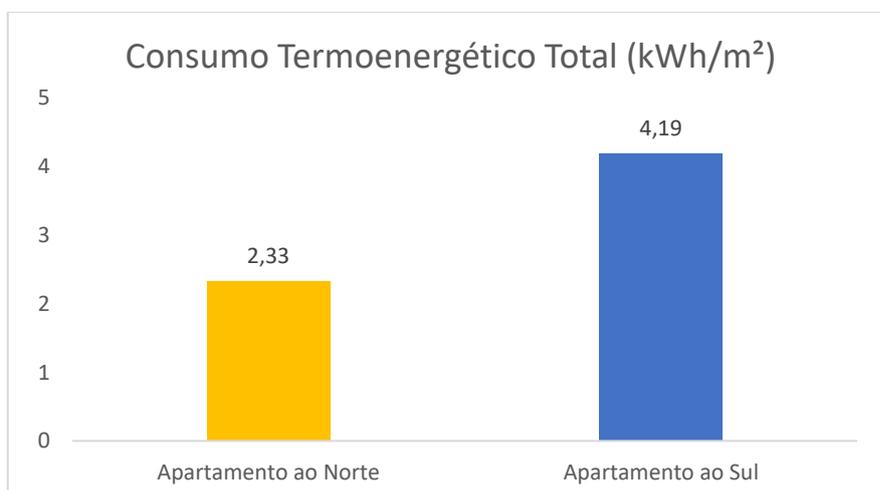


Figura 40 – Gráfico comparativo do consumo termoenergético de um apartamento voltado para o sul x apartamento orientado para o norte.

#### 4.2.2 Capacidade de geração do sistema proposto para o Caso 1

Para o Caso 1, que possui cobertura de telha fibrocimento, foi proposta uma única água com inclinação de 10%, que corresponde a 6°, voltada para a orientação norte. Dessa forma, é possível instalar 198 módulos fotovoltaicos

(conforme especificado no item 3.8), em função do espaço disponível e sua melhor acomodação. Nas Figuras 41 à 43 observa-se o projeto 3D do PAR Marcílio Dias, feito no software *SketchUp® 2017*, com ênfase para o sistema de geração fotovoltaico proposto.

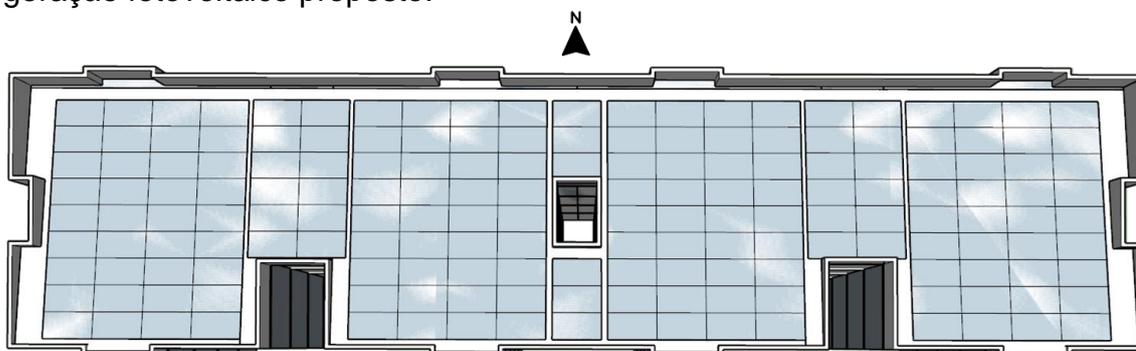


Figura 41– Proposta de cobertura para o PAR Marcílio Dias, com o sistema de módulos FV.  
Fonte: A autora.

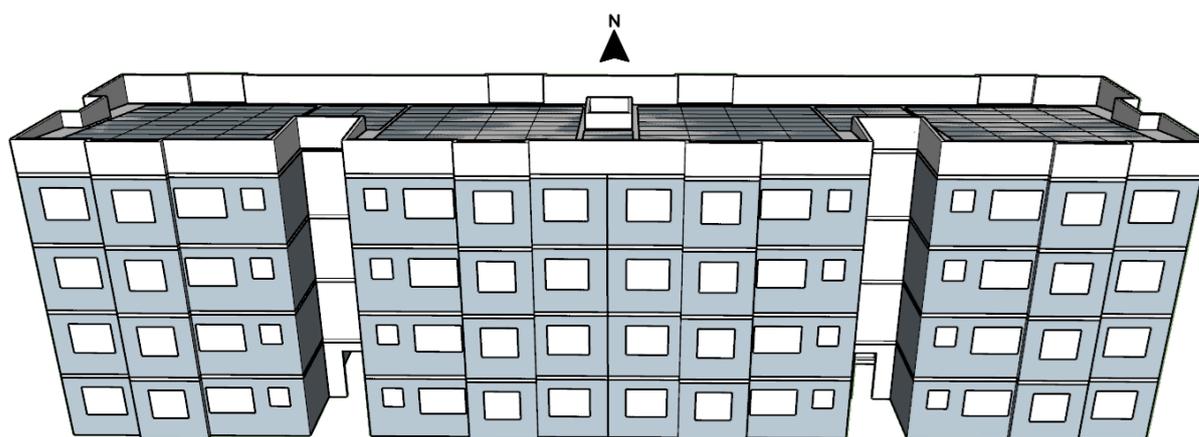


Figura 42 – Fachada principal do PAR Marcílio Dias, com a instalação de módulos FV propostos. Fonte: A autora.

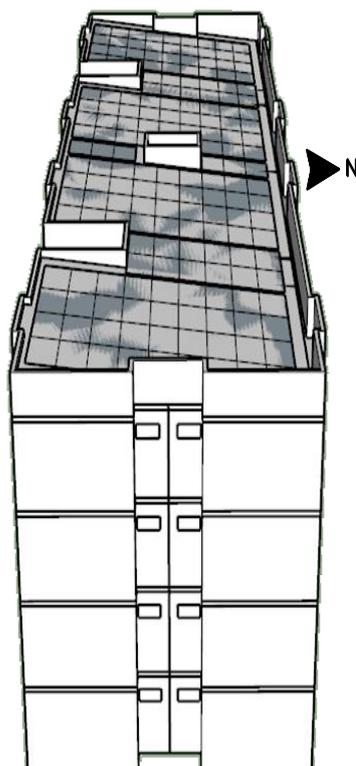


Figura 43 – Fachada lateral do PAR Marcílio Dias, com a instalação de módulos FV propostos. Fonte: A autora.

Tabela 11 – Geração de energia FV do sistema proposto.

<b>Orientação Norte - Inclinação de 6° - Caso 1 (telha fibrocimento <math>i = 10\%</math>)</b>						
Mês	nº de dias do mês	Irradiação Média (kWh/m <sup>2</sup> /dia)	Rendimento do Sistema 80%	Potência do Módulo FV (Wp)	nº de módulos FV	Geração de Energia FV (kWh/mês)
Jan	31	6,46	0,8	410	198	13.005,69
Fev	29	5,81	0,8	410	198	10.942,41
Mar	31	5,18	0,8	410	198	10.428,71
Abr	30	3,8	0,8	410	198	7.403,62
Mai	31	3,12	0,8	410	198	6.281,38
Jun	30	2,79	0,8	410	198	5.435,81
Jul	31	2,73	0,8	410	198	5.496,21
Ago	31	3,55	0,8	410	198	7.147,09
Set	30	4,42	0,8	410	198	8.611,57
Out	31	5,55	0,8	410	198	11.173,62
Nov	30	6,49	0,8	410	198	12.644,60
Dez	31	6,85	0,8	410	198	13.790,86
Média						9.363,46
<b>Total (kWh/ano)</b>						<b>112.361,56</b>

Fonte: A autora.

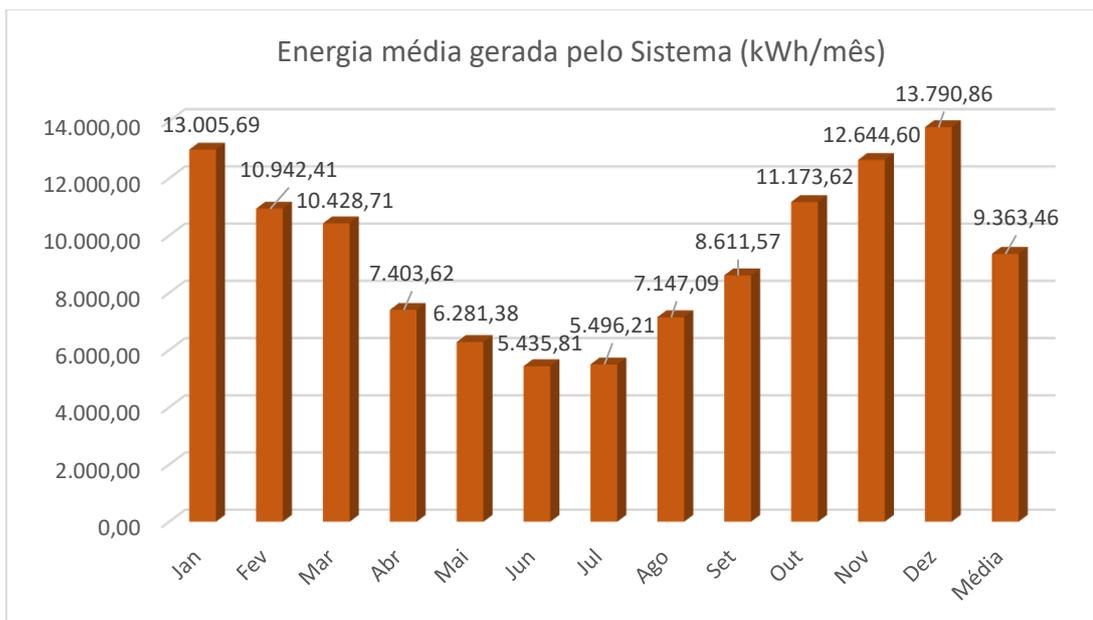


Figura 44 – Gráfico da energia média gerada pelo sistema proposto para o Caso 1.  
Fonte: A autora.

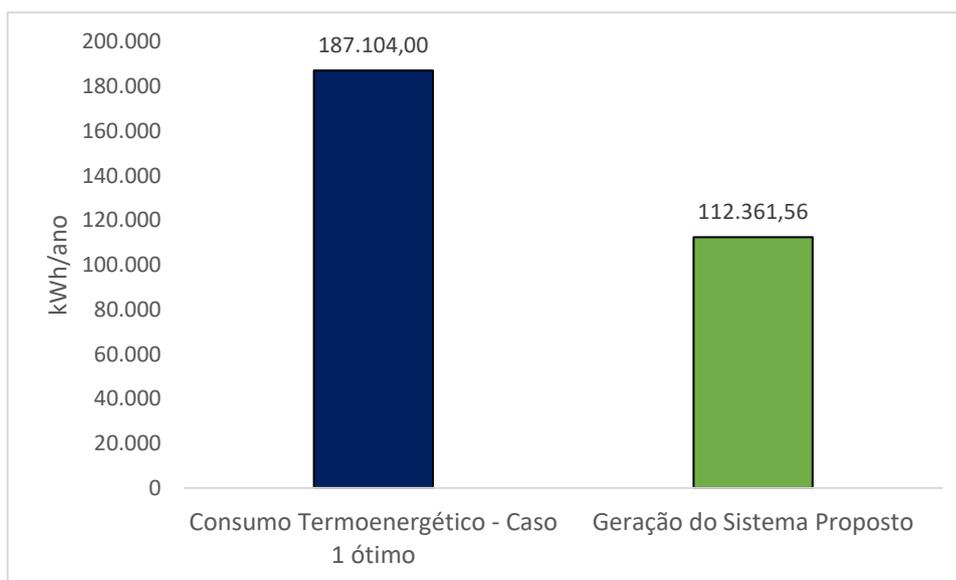


Figura 45 – Gráfico da energia termoenergética consumida e a energia gerada pelo sistema proposto para o Caso 1 ótimo. Fonte: A autora.

Dessa forma, é possível perceber que, o consumo de energia da edificação no Caso 1 ótimo, considerando seus sistemas (iluminação, climatização e equipamentos), assim como, a energia elétrica requerida para atendimento da demanda anual de água quente é de 187.104,00 kWh/ano, resultando em 14,2 kWh/m<sup>2</sup>.ano.

O sistema de geração proposto, que considera a sombra da platibanda ou mureta, supre 60% do consumo de energia do Caso 1 proposto, o que atenderia

um dos requisitos para ser considerada NZEB, conforme (INI-C e Consulta Pública da INI-R). Contabilizando o consumo devido ao aquecimento de água

#### 4.2.3 Custo da envoltória para o Caso 1

Para a obtenção da viabilidade econômica do Caso 1 é preciso realizar uma orçamentação da solução ótima do Caso 1.

Para isso, foi exposto (Tabela 12) uma breve composição do que seria necessário para o Caso 1 ótimo, conforme segue:

Tabela 12 – Quantitativo do Caso 1.

Descrição do Insumo	Preço Médio por unidade	Quantidade necessária	Preço Médio Total
Placa cimentícia lisa e = 10 mm 1,20 x 3,00 m (sem amianto)	R\$ 71,98	554 m <sup>2</sup>	R\$ 150.798,10
Poliestireno expandido EPS (isopor), tipo 2F, placa, isolamento termoacustico e = 50 mm, 1000 por 500 mm	R\$ 34,82	554 m <sup>2</sup>	R\$ 38.650,20
Chapa OBS por metro de madeira e = 8mm	R\$ 55,90	554 m <sup>2</sup>	R\$ 30.968,60
Estrutura em perfis de aço formados a frio, Light Steel Framing - Perfil U Light Steel Frame Aço 3m x 0,04m x 0,95mm	R\$ 37,90	554 m <sup>2</sup>	R\$ 70.000,00
Placa cimentícia lisa e = 6 mm 1,20 x 3,00 m (sem amianto)	R\$ 69,69	554 m <sup>2</sup>	R\$ 1.995,00
Telha fibrocimento e = 8 mm 4,60 x 1,06 m (sem amianto)	R\$ 277,53	410 unidades	R\$ 24.977,70
EPS cobertura e = 4 cm	R\$ 29,68	410 m <sup>2</sup>	R\$ 12168,80
Forro em madeira pinus ou equivalente da região, encaixe macho/ fêmea *10 x 1* CM (ambientes residenciais/ sem colocação)	R\$ 25,06	410 m <sup>2</sup>	R\$ 10.274,60
Módulo fotovoltaico	R\$ 1.050,00	198 unidades	R\$ 207.900,00
Total			R\$ 547.733,20

Fonte: A autora.

O custo da envoltória para a condição inicial do PAR Marcílio Dias é de R\$ 186.850,06 enquanto que, o custo total da envoltória do Caso 1 é de R\$ 547.733,20, salientando que no Caso 1 o sistema proposto é de LSF, cujos custos amortecidos pela velocidade de execução da obra não foram contabilizados. Um acréscimo de R\$ 360.883,14, sendo destes R\$ 207.900,00 referentes ao custo dos módulos fotovoltaicos e R\$ 152.983,14 referentes à envoltória, representando um acréscimo de 75% neste último.

O tempo de retorno desse investimento é de 4,53 anos, calculado pelo Valor Presente Líquido – VPL, conforme dados expostos na Tabela 13 e 14, a seguir.

Tabela 13 – Dados preliminares para a Análise de Investimento do Caso 1.

<b>DADOS</b>	
Custo Envolvória Condição Inicial	R\$ 186.850,06
Investimento adicional - Usina Fotovoltaica	R\$ 207.900,00
Investimento adicional - Custo Envolvória Proposta	R\$ 152.983,14
Taxa Inflação Estimada Próximos Anos	10%
Investimento Adicional Total	R\$ 360.883,14
Valor Energia Gerada ao Ano	R\$ 79.676,71

Fonte: A autora.

Tabela 14 – Análise do Investimento do Caso 1.

<b>ANÁLISE INVESTIMENTO</b>	
TMA - Taxa Mínima de Atratividade	10%
PB - Payback (anos)	4,53
VPL - Valor Presente Líquido (20 anos)	R\$ 288.590,52
TIR - Taxa Interna de Retorno (20 anos)	22%

Fonte: A autora.

Com as Tabelas acima é possível perceber que o Caso 1 é viável economicamente. Sabendo que, a Taxa Média de Atratividade – TMA é um retorno mínimo esperado pelo investidor, enquanto a Taxa Interna de Retorno – TIR é a Taxa Interna de Rentabilidade. Dessa forma, quando a TIR é superior a TMA significa que o projeto é viável, pois a rentabilidade será superior à inflação.

#### 4.3 Caso 2

Os resultados para o Caso 2, que possui sistema construtivo apresentado na Tabela 15, que segue abaixo, estão expostos na Tabela 16, conforme segue:

Tabela 15 – Sistema construtivo do Caso 2.

	<b>Sistema Construtivo Parede Externa</b>	<b>Composição Parede<sub>ext</sub></b>	<b>Sistema Construtivo Cobertura</b>	<b>Composição da Cobertura</b>
<b>Caso 2</b>	Concreto maciço $C_T = 143 \text{ kJ/m}^2\text{K}$	Concreto maciço 3,25 cm	Telha cerâmica $C_T = 194,4 \text{ kJ/m}^2\text{K}$	Telha cerâmica - 12,5 mm
		EPS		Camada de ar
		Concreto maciço 3,25 cm		EPS
				Laje 8 cm

Fonte: A autora.

Tabela 16 – Resultados para o Caso 2, em comparação com o Caso Base.

nº ident.	Orientação Solar (°)	Absortância Solar Telha cerâmica	Absortância Solar Parede ext.	Espessura EPS Parede ext. (m)	Transmitância Térmica Parede ext. (W/(m².K))	Espessura EPS Cobertura (m)	Transmitância Térmica Cobertura (W/(m².K))	Consumo p/ Resfriamento (kWh/m².ano)	Consumo p/ Aquecimento (kWh/m².ano)	Consumo Termoenergético Total (kWh/m².ano)
<b>Caso Base</b>	90,00	0,70	0,60	0,00	1,61	0,00	2,10	16,74	23,05	39,79
<b>Caso 1 ótimo</b>	359,16	0,71	0,87	0,05	0,53	0,04	0,51	5,59	5,32	10,91
<b>1</b>	14,39	0,71	0,69	0,05	0,50	0,04	0,53	4,68	6,20	10,88
<b>2</b>	1,70	0,32	0,38	0,05	0,50	0,03	0,61	2,24	10,40	12,65
<b>3</b>	17,99	0,48	0,39	0,05	0,52	0,04	0,57	3,63	8,20	11,83
<b>4</b>	14,84	0,48	0,39	0,05	0,53	0,04	0,57	2,86	8,53	11,38
<b>5</b>	355,66	0,69	0,65	0,05	0,50	0,04	0,58	3,95	7,05	11,00
<b>6</b>	354,98	0,39	0,38	0,05	0,50	0,04	0,59	2,24	9,34	11,58
<b>7</b>	354,74	0,71	0,70	0,05	0,50	0,04	0,54	3,63	6,52	10,15
<b>8</b>	341,86	0,76	0,65	0,05	0,50	0,04	0,53	2,86	6,28	9,14

Fonte: A autora.

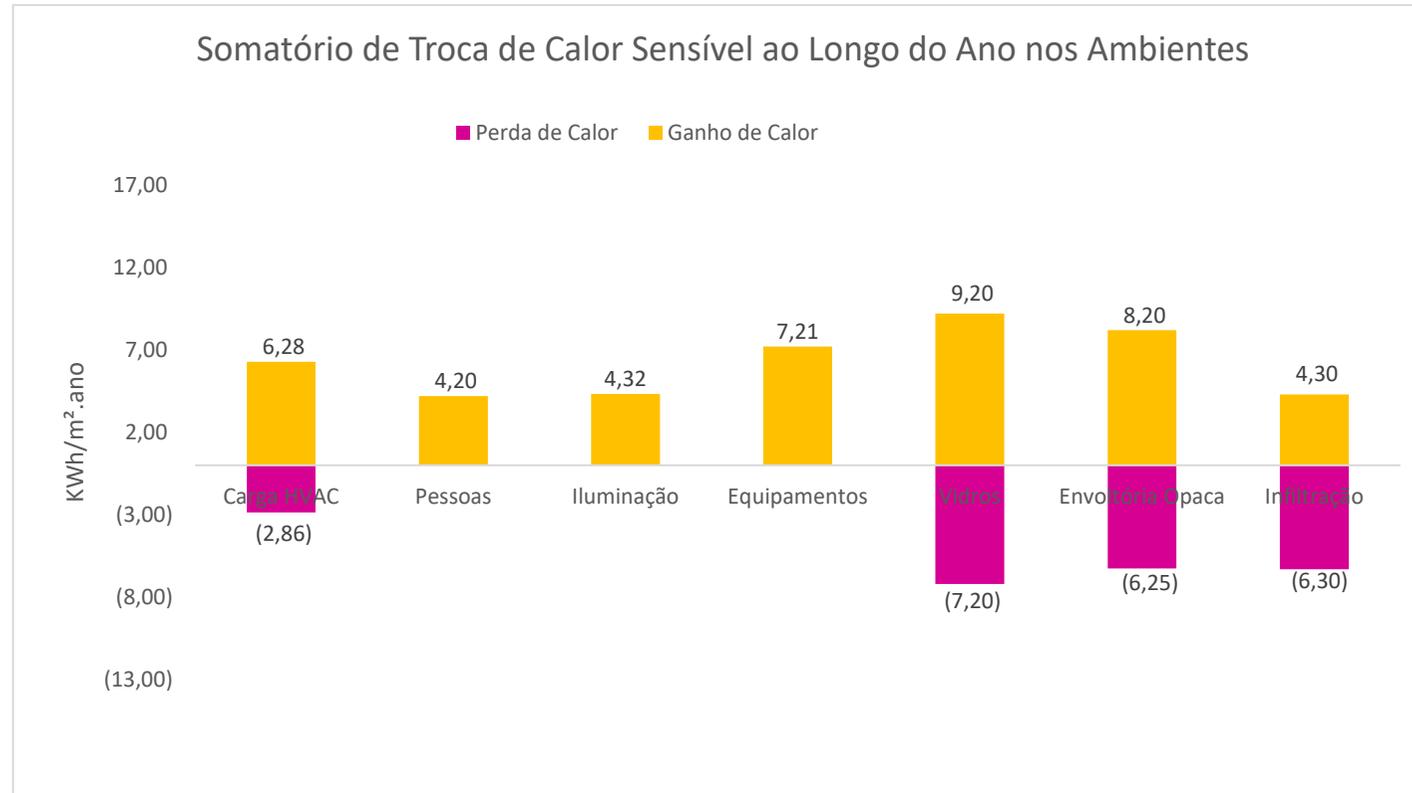


Figura 46 – Gráfico do somatório de troca de calor sensível ao longo do ano nos ambientes para o Caso 2 ótimo (nº de identificação 8. Fonte: A autora.

É possível perceber que, dentre as 8 soluções obtidas, a nº 8 foi a que apresentou menor consumo termoenergético, logo caracteriza-se por ser a solução ótima, que apresenta valores de orientação solar  $341,86^\circ$ ; absorvância solar da telha cerâmica 0,76; absorvância solar da parede externa 0,65; transmitância térmica da parede de  $0,50 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ ; transmitância térmica da cobertura de  $0,53 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$  e consumo termoenergético total de  $9,14 \text{ kWh}/\text{m}^2.\text{ano}$ . conforme visto na Figura 46.

Foi realizada uma apresentação do somatório da troca de calor sensível ao longo do ano nos ambientes para a solução ótima, conforme visto na Figura 46. Ao analisar a Figura 46 do Caso 2 e comparar com as informações do Caso 1 é possível perceber que o Caso 2 apresenta melhor desempenho no verão do que o Caso 1. No balanço anual houve uma redução das perdas e aumento dos ganhos através da envoltória. Quanto à infiltração houve um pequeno aumento das perdas.

Na Figura 47 é possível analisar um gráfico (curva de Pareto) com eixos que indicam as duas variáveis-objetivo do modelo: a intensidade do uso de energia (*Energy Use Intensity* - EUI) para aquecimento e resfriamento. Os pontos vermelhos apontam as soluções verdadeiras (*True*) para frente de Pareto do conjunto analisado.

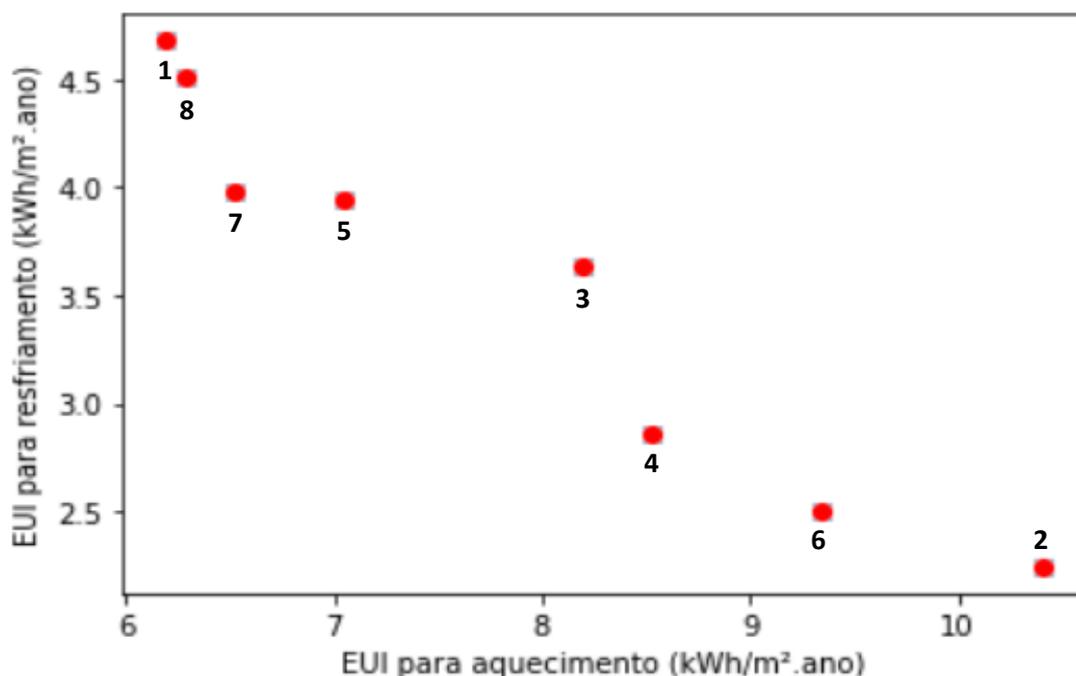


Figura 47 – Curva de Pareto para o Caso 2. Fonte: A autora.

### 4.3.1 Orientação solar

A comparação entre um apartamento do 4º pavimento voltado para o norte e um apartamento, também no 4º pavimento, orientado para o sul é demonstrada na Figura 48. A Figura 49 mostra o apartamento analisado ao sul e a Figura 50 o apartamento ao norte. Na Figura 50 é possível visualizar o consumo termoenergético de ambos

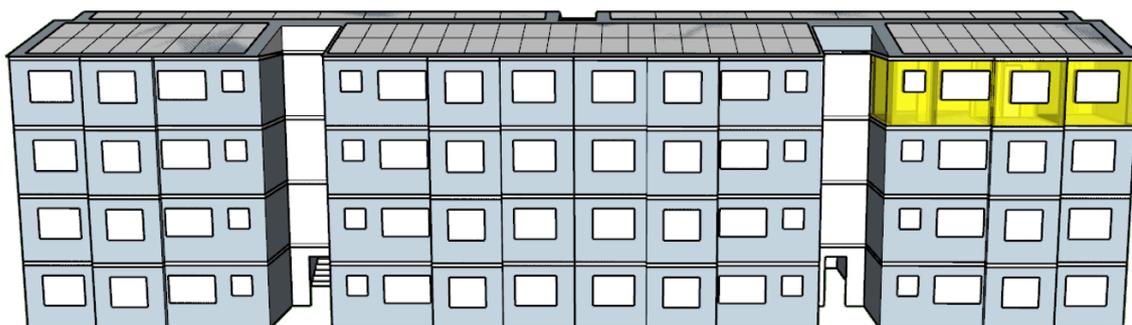


Figura 48 – Fachada orientada para o sul com ênfase ao apartamento analisado.

Fonte: A autora.

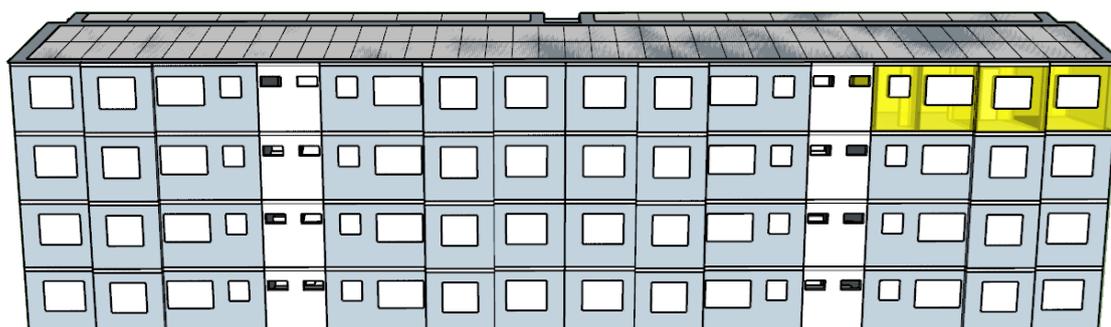


Figura 49 – Fachada orientada para o norte com ênfase ao apartamento analisado.

Fonte: A autora.

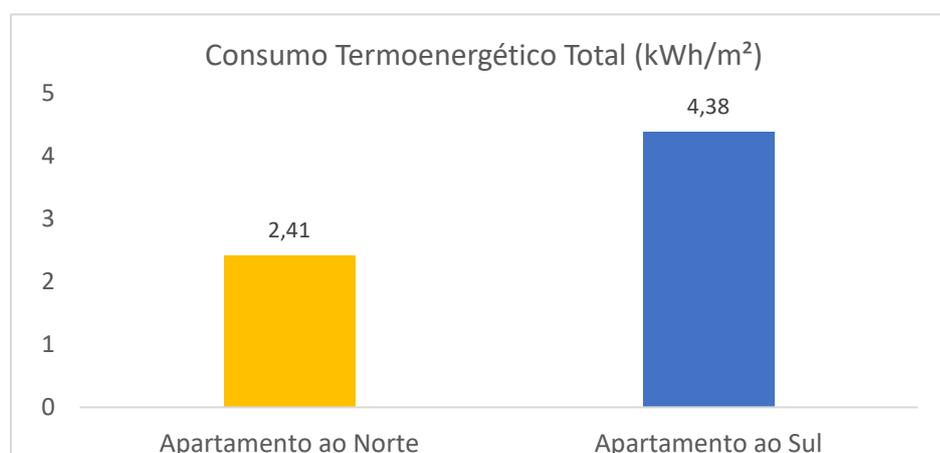


Figura 50 – Gráfico comparativo do consumo termoenergético de um apartamento voltado para o sul x apartamento orientado para o norte. Fonte: A autora.

Através da Figura 50 é possível perceber que o apartamento com fachada voltada para a orientação solar norte possui um menor consumo termoenergético quando comparado ao apartamento orientado ao sul, conforme já esperado, pelos motivos já expostos anteriormente.

Mesma análise foi realizada com apartamentos do 3º pavimento em posição central ao prédio (Figuras 51 e 52), cujos resultados são demonstrados na Figura 53.

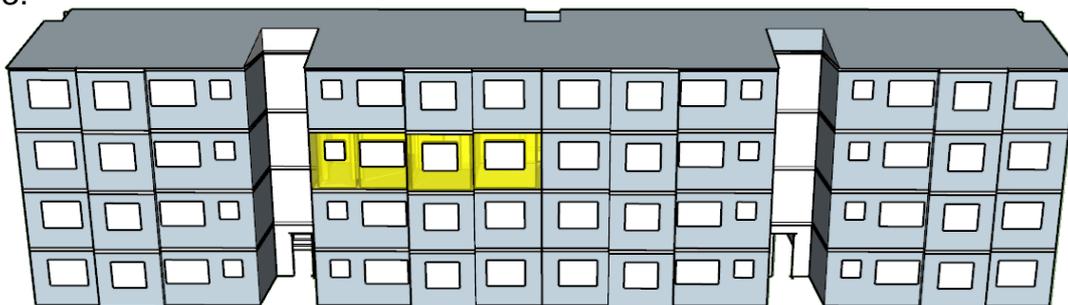


Figura 51– Fachada orientada para o sul com ênfase ao apartamento analisado.

Fonte: A autora.

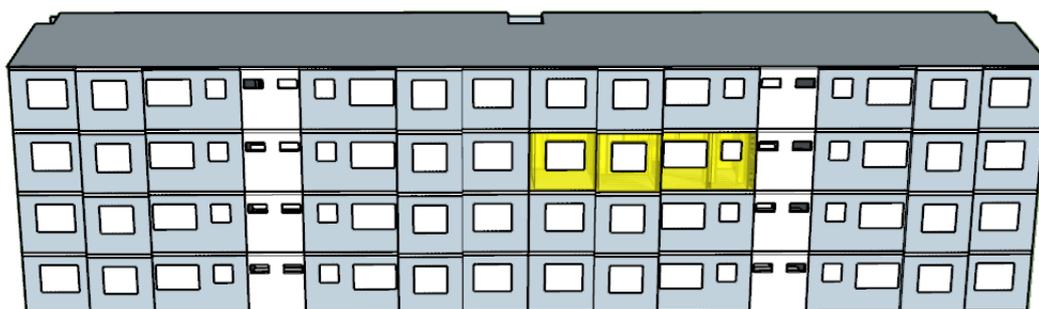


Figura 52 – Fachada orientada para o norte com ênfase ao apartamento analisado.

Fonte: A autora.

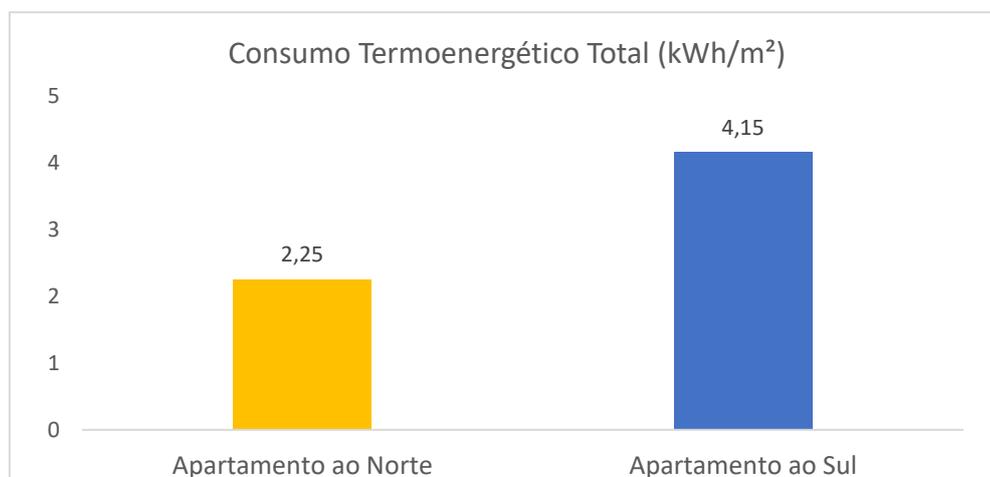


Figura 53 – Gráfico comparativo do consumo termoenergético de um apartamento voltado para o sul x apartamento orientado para o norte. Fonte: A autora

Como no caso anterior, a diferença de desempenho dos apartamentos norte e sul se torna ainda mais evidente. Neste caso, o apartamento sul consome 80% mais do que o apartamento norte.

#### 4.3.2 Capacidade de geração do sistema proposto para o Caso 2

Para o Caso 2 e os demais, que possuem cobertura de telha cerâmica, foram propostas duas águas com inclinação de 30%, que corresponde a  $14^\circ$ , voltadas para a orientação norte x sul. Dessa forma, é possível instalar 188 módulos fotovoltaicos (conforme especificado no item 3.8), 100 para o norte e 88 para o sul, em função do espaço disponível e sua melhor acomodação. Nas Imagens 54 à 57 observa-se o projeto 3d do PAR Marcílio Dias, feito no software *SketchUp® 2017*, com ênfase para o sistema de geração fotovoltaico proposto.

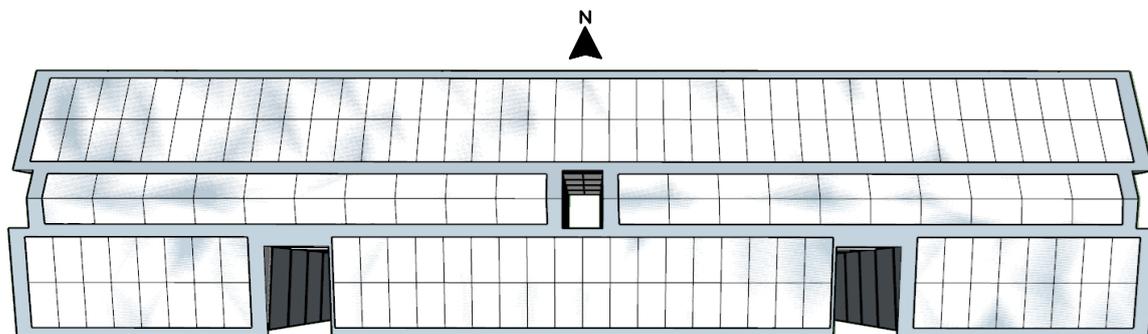


Figura 54 – Proposta de cobertura para o PAR Marcílio Dias, com o sistema de módulos FV.

Fonte: A autora.

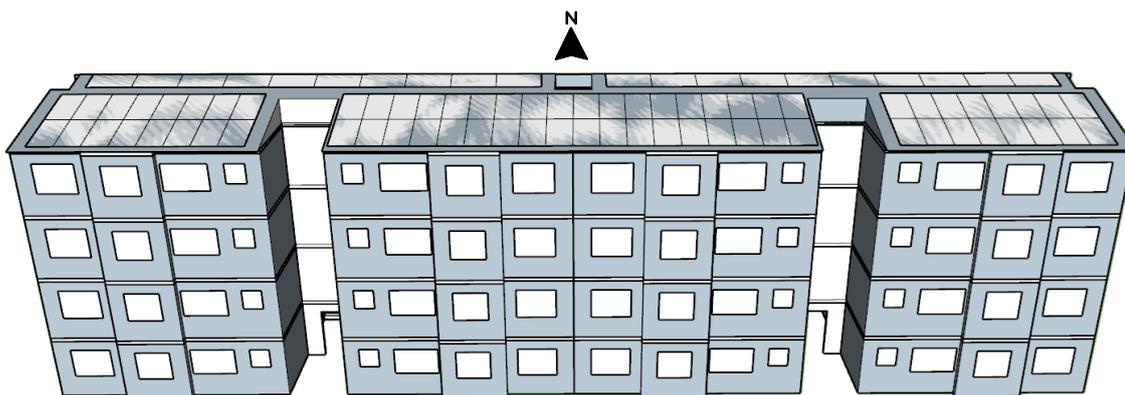


Figura 55 – Fachada sul do PAR Marcílio Dias, com ênfase aos módulos FV propostos.

Fonte: A autora.

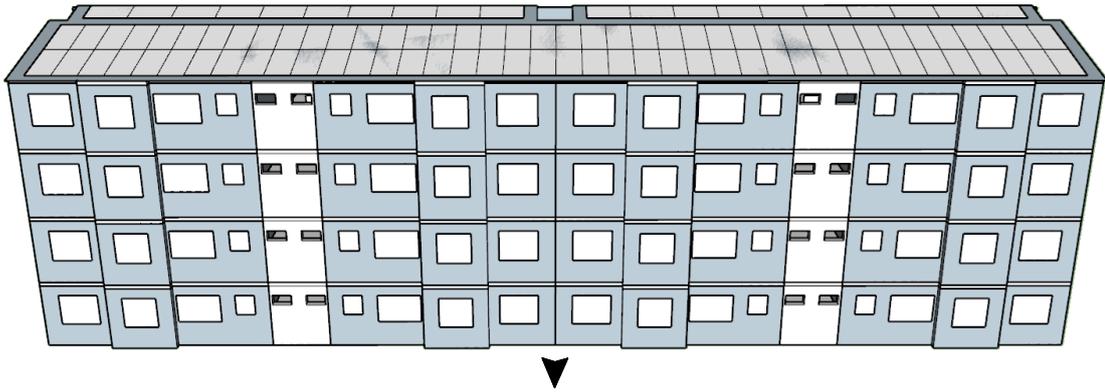


Figura 56 – Fachada norte do PAR Marcílio Dias, com ênfase aos módulos FV propostos.  
Fonte: A autora.

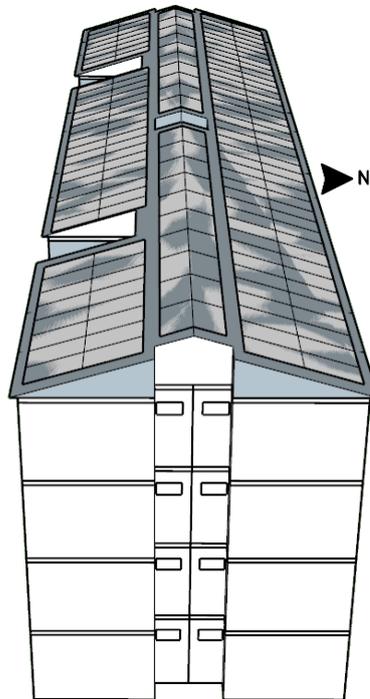


Figura 57 – Fachada lateral do PAR Marcílio Dias, com ênfase aos módulos FV propostos. Fonte: A autora.

Tabela 17 – Geração de energia FV do sistema proposto- orientação norte

<b>Água c/ Orientação Norte - Inclinação de 14° - Casos 2 à 5 (telha cerâmica i = 30%)</b>						
Mês	nº de dias do mês	Irradiação Média (kWh/m <sup>2</sup> /dia)	Rendimento do Sistema 80%	Potência do Módulo FV (Wp)	nº de módulos FV	Geração de Energia FV (kWh/mês)
Janeiro	31	6,46	0,8	410	100	6.568,53
Fevereiro	29	5,81	0,8	410	100	5.526,47
Março	31	5,18	0,8	410	100	5.267,02
Abril	30	3,8	0,8	410	100	3.739,20
Mai	31	3,12	0,8	410	100	3.172,42
Junho	30	2,79	0,8	410	100	2.745,36
Julho	31	2,73	0,8	410	100	2.775,86
Agosto	31	3,55	0,8	410	100	3.609,64
Setembro	30	4,42	0,8	410	100	4.349,28
Outubro	31	5,55	0,8	410	100	5.643,24
Novembro	30	6,49	0,8	410	100	6.386,16
Dezembro	31	6,85	0,8	410	100	6.965,08
<b>Total</b>						<b>56.748,26</b>

Fonte: A autora.

Tabela 18 – Geração de energia FV do sistema proposto - orientação sul.

<b>Água c/ Orientação Sul - Inclinação de 14° - Casos 2 à 5 (telha cerâmica i = 30%)</b>						
Mês	nº de dias do mês	Irradiação Média (kWh/m <sup>2</sup> /dia)	Rendimento do Sistema 80%	Potência do Módulo FV (Wp)	nº de módulos FV	Geração de Energia FV (kWh/mês)
Janeiro	31	6,31	0,8	410	88	5.646,09
Fevereiro	29	5,35	0,8	410	88	4.478,25
Março	31	4,39	0,8	410	88	3.928,10
Abril	30	2,99	0,8	410	88	2.589,10
Mai	31	2,13	0,8	410	88	1.905,89
Junho	30	1,81	0,8	410	88	1.567,32
Julho	31	1,81	0,8	410	88	1.619,56
Agosto	31	2,57	0,8	410	88	2.299,59
Setembro	30	3,63	0,8	410	88	3.143,29
Outubro	31	4,95	0,8	410	88	4.429,18
Novembro	30	6,21	0,8	410	88	5.377,36
Dezembro	31	6,78	0,8	410	88	6.066,64
<b>Total</b>						<b>43.050,37</b>

Fonte: A autora.

O sistema gera ao total 99.798,63 kWh/ano. Na Figura 58 é possível comparar o consumo termoenergético do Caso 2 ótimo com sua geração.

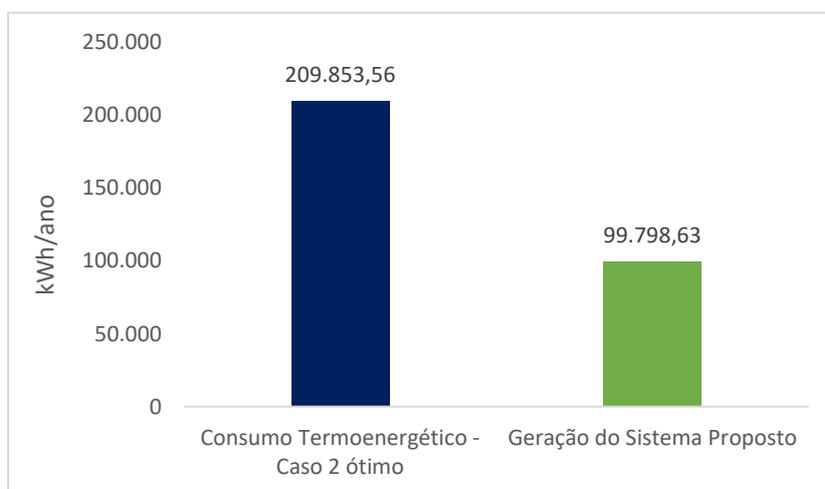


Figura 58 – Gráfico da energia termoenergética consumida e a energia gerada pelo sistema proposto para o Caso 2 ótimo. Fonte: A autora.

Dessa forma, é possível perceber que, o consumo de energia da edificação no Caso 2 ótimo, considerando seus sistemas (iluminação, climatização e equipamentos), assim como, a energia elétrica requerida para atendimento da demanda anual de água quente é de 209.853,56 kWh/ano, resultando em um consumo de 13,8 kWh/m<sup>2</sup>.ano. Assim, o sistema de geração proposto supre 47,56% do consumo de energia do Caso 2 ótimo e não alcançaria requisito para ser NZEB. Entretanto, na hipótese da escolha pela mesma geração proposta no Caso 1 (112.361,56 kWh/ano), o Caso 2 teria uma geração que atenderia a 53,54% do consumo, podendo caracterizar-se como NZEB.

#### 4.3.3 Custo da envoltória para o Caso 2

Para a obtenção da viabilidade econômica do Caso 2 é preciso realizar uma orçamentação da solução ótima do Caso 2, que considera paredes externas de concreto moldado *in loco* e cobertura de telha cerâmica.

Para a estimativa dos valores, foi exposto na Tabela 15 uma breve composição do que seria necessário para o Caso 2 ótimo.

Diante dessas considerações, foi consultado o Relatório de Insumos e Composições SINAPI da Caixa Econômica Federal com data base de janeiro de 2022, para o Rio Grande do Sul, de forma que, os preços médios estão dispostos na Tabela 19, conforme segue:

Tabela 19 – Quantitativo do Caso 2.

Descrição do Insumo	Unidade	Preço Médio por unidade	Quantidade necessária	Preço Médio Total
Parede externa de concreto moldado <i>in loco</i> e = 6,5 cm	m <sup>2</sup>	R\$ 140,67	1.250 m <sup>2</sup>	R\$ 130.837,50
EPS parede externa e = 5 cm	m <sup>2</sup>	R\$ 37,10	1.250 m <sup>2</sup>	R\$ 46.375,00
Laje de cobertura de concreto moldado <i>in loco</i> e = 8 cm	m <sup>2</sup>	R\$ 155,95	410 m <sup>2</sup>	R\$ 63.939,50
EPS cobertura e = 4 cm	m <sup>2</sup>	R\$ 29,68	410 m <sup>2</sup>	R\$ 12.168,80
Telha cerâmica portuguesa 40,2x24,3cm	m <sup>2</sup>	R\$ 27,20	410 m <sup>2</sup>	R\$ 11.152,00
Módulo fotovoltaico	peça	R\$ 1.050,00	188	R\$ 197.400,00
Total				R\$ 461.872,80

Fonte: A autora.

Cabe destacar que, a composição do concreto moldado *in loco* contempla os seguintes serviços: Forma, armação e concretos, dispostos na Tabela 20:

Tabela 20 – Insumos necessário para a execução do concreto moldado *in loco*.

**Listagem de Serviços(SINAPI) - Discriminada**

07/02/2022  
Página 1 de 1

Código Serviço	Pr. Unitário	Coeficiente	UN	Material	Mão-de-Obra	Total
<b>91593 ARMAÇÃO DO SISTEMA DE PAREDES DE CONCRETO, EXECUTADA EM PAREDES DE EDIFICAÇÕES DE MÚLTIPLOS PAVIMENTOS, TELA Q-138. AF_06/2019</b>						
<b>KG</b>						
S00007155	TELA DE AÇO SOLDADA NERVURADA - CA-60, Q-138, (2,20 KG/M <sup>2</sup> ), DIAMETRO D O FIO = 4,2LARGURA = 2,45 M, ESPACAMENTO DA MALHA = 10 X 10 CM	30,65	0,47900000	M2	14,68	
S00039017	ESPACADOR / DISTANCIADOR CIRCULAR COM ENTRADA LATERAL, EM PLASTICO, PARAVERGALHAO "4,2 A 12,5" MM, COBRIMENTO 20 MM	0,12	0,93000000	UN	0,11	
S00043132	ARAME RECOZIDO 16 BWG, D = 1,65 MM (0,016 KG/M) OU 18 BWG, D = 1,25 MM (0,01 KG/M	25,15	0,01050000	KG	0,26	
88238	AJUDANTE DE ARMADOR COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	15,59	0,00400000	H	0,01	0,06
88245	ARMADOR COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	20,22	0,02700000	H	0,05	0,50
<b>TOTAIS</b>				<b>15,11</b>	<b>0,56</b>	<b>15,67</b>
<b>99235 CONCRETAGEM DE EDIFICAÇÕES (PAREDES E LAJES) FEITAS COM SISTEMA DE FÔRMAS MANUSEÁVEIS, COM CONCRETO USINADO AUTOADENSÁVEL FCK 25 MPA - LANÇAMENTO E ACABAMENTO. AF_10/2021</b>						
<b>M3</b>						
S00034872	CONCRETO AUTOADENSÁVEL (CAA) CLASSE DE RESISTENCIA C25, ESPALHAM ENTO SF2,INCLUI SERVICO DE BOMBEAMENTO (NBR 15823)	491,88	1,09000000	M3	536,15	
88262	CARPINTEIRO DE FORMAS COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	20,10	0,11500000	H	0,20	2,11
88309	PEDREIRO COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	20,34	0,22900000	H	0,42	4,24
88316	SERVENTE COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	16,93	0,34400000	H	0,59	5,24
<b>TOTAIS</b>				<b>537,36</b>	<b>11,59</b>	<b>548,95</b>
<b>103084 FÔRMAS MANUSEÁVEIS DE PLÁSTICO ESTRUTURADO EM AÇO PARA PAREDES DE CONCRETO MOLDADAS IN LOCO, DE EDIFICAÇÕES DE MÚLTIPLOS PAVIMENTOS, EM PANOS DE FACHADA. AF_09/2021</b>						
<b>M2</b>						
S00039397	DESMOLDANTE PARA FORMAS METALICAS A BASE DE OLEO VEGETAL	14,65	0,00280000	L	0,00	0,00
88316	SERVENTE COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	16,93	0,03330000	L	0,49	
88262	CARPINTEIRO DE FORMAS COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	20,10	0,12400000	H	0,21	1,89
88262	CARPINTEIRO DE FORMAS COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	20,10	0,33900000	H	0,58	6,23
<b>TOTAIS</b>				<b>1,28</b>	<b>8,12</b>	<b>9,40</b>

Fonte: SINAPI, JAN/2022.

Nas tabelas 21 e 22 é possível visualizar a composição detalhada dos insumos utilizados para os serviços de parede externa de concreto moldada *in loco* e da laje de cobertura de concreto moldado *in loco*.

Tabela 21 – Composição da parede de concreto moldada *in loco* por m<sup>2</sup>.

Caso 2							
Parede de Concreto (m <sup>2</sup> )	Forma (m <sup>2</sup> )		Armação (kg)		Concreto (m <sup>3</sup> )		Total (p/ m <sup>2</sup> )
	Quantid.	Valor	Quantid.	Valor	Quantid.	Valor	
Espessura 6,5cm	2,5	R\$ 23,50	5,2	R\$ 81,48	0,065	R\$ 35,68	<b>R\$ 140,67</b>

Fonte: A autora.

Tabela 22 – Composição da laje de concreto moldado *in loco* por m<sup>2</sup>.

Caso 2							
Laje de Concreto (m <sup>2</sup> )	Forma (m <sup>2</sup> )		Armação (kg)		Concreto (m <sup>3</sup> )		Total (p/ m <sup>2</sup> )
	Quantid.	Valor	Quantid.	Valor	Quantid.	Valor	
Espessura 8 cm	1,25	R\$ 11,75	6,4	R\$ 100,29	0,080	R\$ 43,92	<b>R\$ 155,95</b>

Fonte: A autora.

Cabe salientar que, o custo da envoltória para a condição inicial do PAR Marcílio Dias é de R\$ 186.850,06 enquanto que o custo total da envoltória do Caso 2 é de R\$ 461.872,80. Há um acréscimo de R\$ 275.022,74, sendo R\$ 197.400,00 referentes ao custo dos módulos fotovoltaicos.

O tempo de retorno do investimento é de 3,89 anos, calculado pelo Valor Presente Líquido – VPL, conforme dados expostos na Tabela 23 e 24, a seguir.

Tabela 23 – Dados preliminares para a Análise de Investimento do Caso 2.

DADOS	
Custo Envoltória Condição Inicial	R\$ 186.850,06
Investimento adicional - Usina Fotovoltaica	R\$ 197.400,00
Investimento adicional - Custo Envoltória Proposta	R\$ 77.622,74
Taxa Inflação Estimada Próximos Anos	10%
Investimento Adicional Total	R\$ 275.022,74
Valor Energia Gerada ao Ano	R\$ 70.746,93

Fonte: A autora.

Tabela 24 – Análise de Investimento do Caso 2.

ANÁLISE INVESTIMENTO	
TMA - Taxa Mínima de Atratividade	10%
PB - Payback (anos)	3,89
VPL - Valor Presente Líquido (20 anos)	R\$ 297.532,53
TIR - Taxa Interna de Retorno (20 anos)	25%

Fonte: A autora.

Com as Tabelas acima é possível perceber que o Caso 2 é viável economicamente, porque as receitas são maiores do que as despesas.

#### 4.4 Caso 3

Os resultados para o Caso 3, que possui sistema construtivo apresentado na Tabela 25, que segue abaixo, estão expostos na Tabela 26, conforme segue:

Tabela 25 – Sistema construtivo do Caso 3.

	<b>Sistema Construtivo Parede Externa</b>	<b>Composição Parede<sub>ext</sub></b>	<b>Sistema Construtivo Cobertura</b>	<b>Composição da Cobertura</b>
<b>Caso 3</b>	Concreto maciço $C_T = 240 \text{ kJ/m}^2\text{K}$	Concreto maciço 5 cm	Telha cerâmica $C_T = 194,4 \text{ kJ/m}^2\text{K}$	Telha cerâmica 12,5 mm
		EPS		Camada de ar
		Concreto maciço 5 cm		EPS
				Laje 8 cm

Fonte: A autora.

Tabela 26 – Resultados para o Caso 3.

nº ident.	Orientação Solar (º)	Absortância Solar Telha cerâmica	Absortância Solar Parede ext.	Espessura EPS Parede ext. (m)	Transmitância Térmica Parede ext. (W/(m².K))	Espessura EPS Cobertura (m)	Transmitância Térmica Cobertura (W/(m².K))	Consumo p/ Resfriamento (kWh/m².ano)	Consumo p/ Aquecimento (kWh/m².ano)	Consumo Termoenergético Total (kWh/m².ano)
<b>Caso Base</b>	90,00	0,70	0,60	0,00	1,61	0,00	2,10	16,74	23,05	39,79
<b>Caso 1 ótimo</b>	359,16	0,71	0,87	0,05	0,53	0,04	0,51	5,59	5,32	10,91
<b>Caso 2 ótimo</b>	341,86	0,76	0,65	0,05	0,50	0,04	0,53	2,86	6,28	9,14
<b>1</b>	7,13	0,31	0,38	0,04	0,70	0,04	0,57	2,37	11,98	14,36
<b>2</b>	3,96	0,83	0,87	0,05	0,51	0,04	0,51	4,54	5,43	9,98
<b>3</b>	358,22	0,54	0,74	0,05	0,53	0,04	0,52	3,01	7,31	10,32
<b>4</b>	3,56	0,36	0,41	0,05	0,52	0,04	0,58	2,72	9,70	12,42
<b>5</b>	8,45	0,35	0,44	0,03	0,72	0,04	0,57	2,59	11,72	14,31
<b>6</b>	16,13	0,68	0,82	0,05	0,54	0,04	0,52	3,59	6,58	10,17
<b>7</b>	13,82	0,74	0,87	0,05	0,51	0,04	0,50	4,03	5,84	9,87
<b>8</b>	16,13	0,72	0,87	0,05	0,51	0,04	0,51	3,79	6,04	9,83

Fonte: A autora.

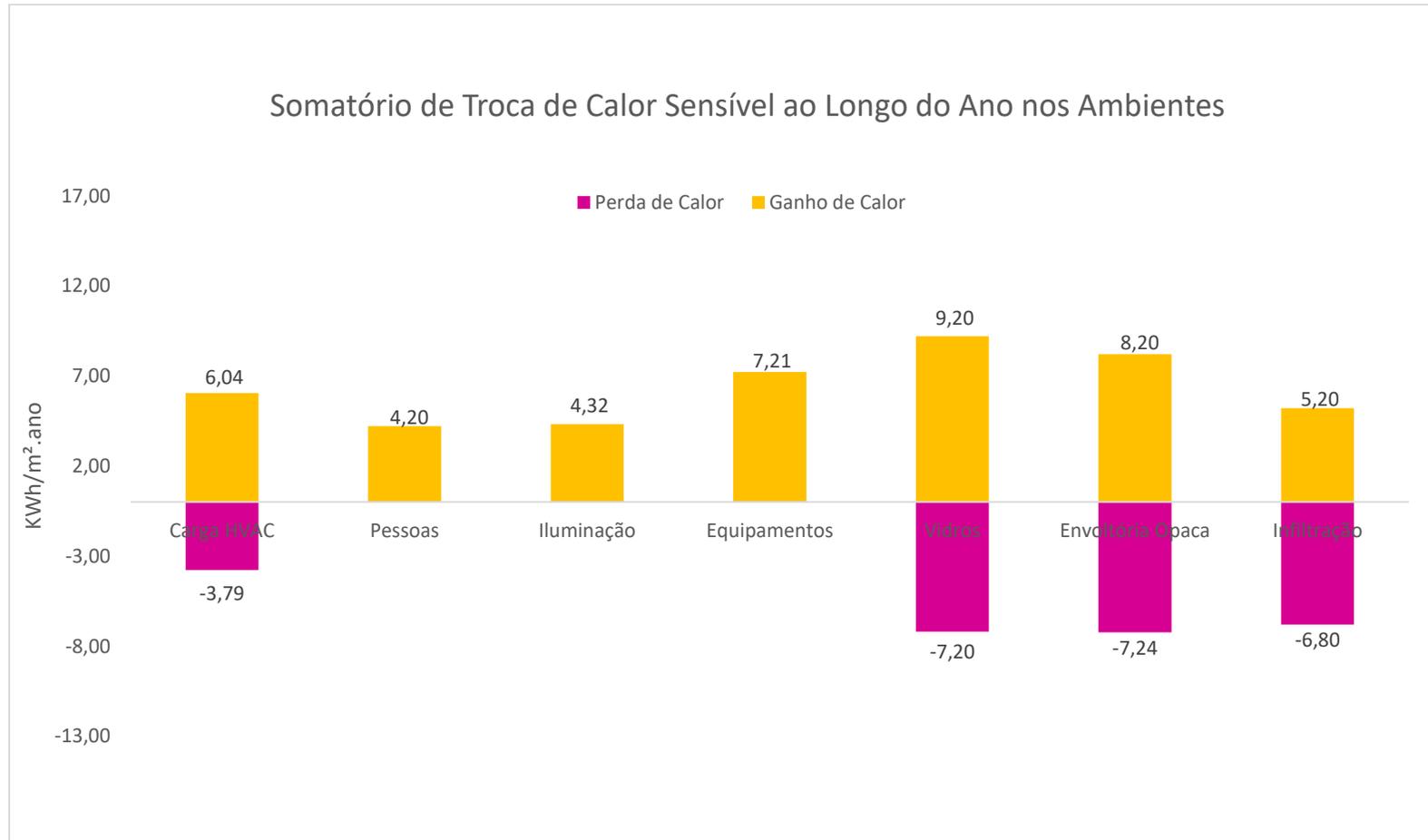


Figura 59 – Gráfico da energia termoenergética consumida e a energia gerada pelo sistema proposto para o Caso 3 ótimo. Fonte: A autora.

Diante das 08 soluções obtidas na Tabela 26, é possível perceber que, dentre elas, a nº 8 foi a que apresentou menor consumo termoenergético, logo caracteriza-se por ser a solução ótima, que apresenta valores de orientação solar 16,13°; absorvância solar da telha cerâmica 0,72; absorvância solar da parede externa 0,87; transmitância térmica da parede de 0,51 W/(m<sup>2</sup>.K) e consumo termoenergético total de 9,83 kWh/m<sup>2</sup>.ano. Por isso foi realizada uma apresentação do somatório da troca de calor de sensível ao longo do ano nos ambientes para essa solução ótima, conforme visto na Figura 59.

Ao analisar a Figura 59 do Caso 3 e comparar com as informações do Caso 2 é possível perceber que houve uma pequena redução no consumo de climatização artificial no inverno. No balanço anual houve um aumento das perdas através da envoltória. Quanto à infiltração houve um aumento dos ganhos e das perdas.

Na Figura 60 é apresentado um gráfico (curva de Pareto) com eixos que indicam as duas variáveis-objetivo do modelo: a intensidade do uso de energia (*Energy Use Intensity - EUI*) para aquecimento e resfriamento. Os pontos vermelhos apontam as soluções verdadeiras (*True*) e em azul as soluções falsas (*False*) para frente de Pareto do conjunto analisado.

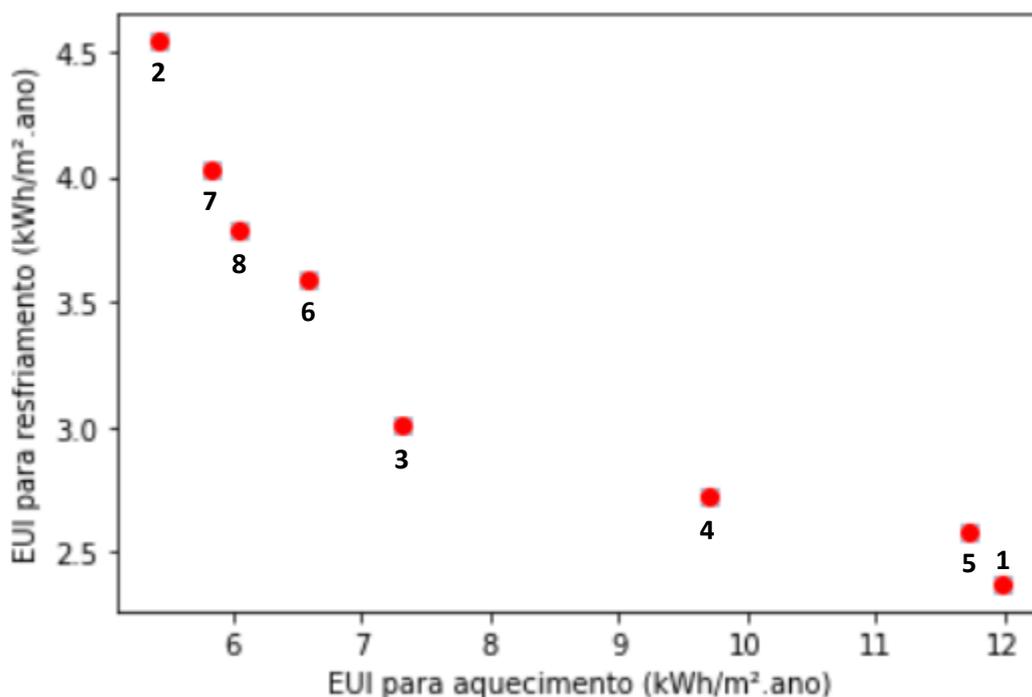


Figura 60 – Curva de Pareto para o Caso 3. Fonte: A autora.

#### 4.4.1 Capacidade de geração do sistema proposto para o Caso 3

Para o Caso 3 e os demais, que possuem cobertura de telha cerâmica, foram propostas duas águas com inclinação de 30%, que corresponde a 14°, voltadas para a orientação norte x sul, conforme especificado no item 4.2.1. O sistema gera ao total 99.798,63 kWh/ano. Na Figura 61 é possível comparar o consumo termoenergético do Caso 3 ótimo com a geração do sistema proposto.

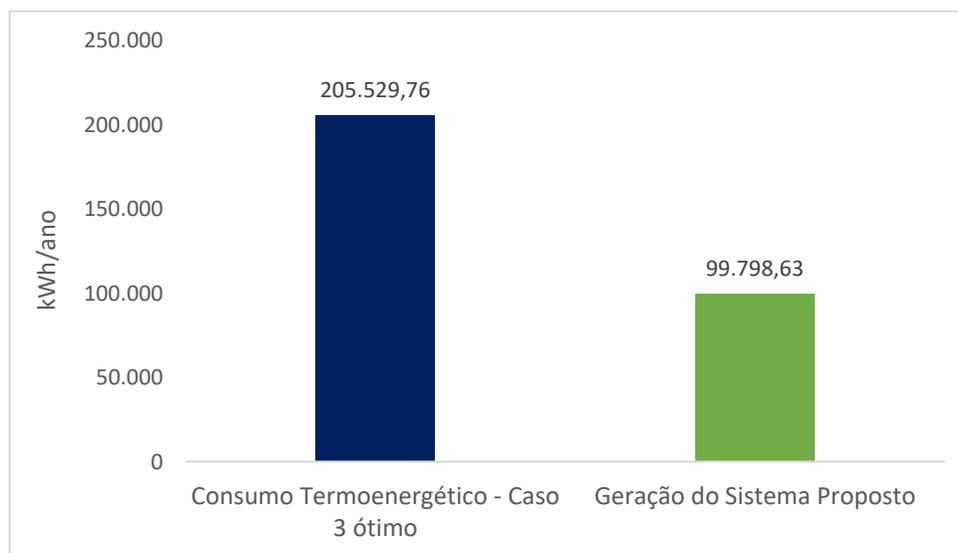


Figura 61 – Gráfico da energia termoenergética consumida e a energia gerada pelo sistema proposto para o Caso 3 ótimo. Fonte: A autora.

Dessa forma, é possível perceber que, o consumo de energia da edificação no Caso 3 ótimo, considerando seus sistemas (iluminação, climatização e equipamentos), assim como, a energia elétrica requerida para atendimento da demanda anual de água quente é de 205.529,76 kWh/ano, resultando em 13,2 kWh/m<sup>2</sup>.ano.

O sistema de geração proposto supre 48,56% do consumo de energia do Caso 3 ótimo. Entretanto, na hipótese da escolha pela mesma geração proposta no Caso 1 (112.361,56 kWh/ano), o Caso 2 teria uma geração que atenderia a 54,67% do consumo, podendo caracterizar-se como NZEB.

#### 4.4.2 Custo da envoltória para o Caso 3

Para a obtenção da viabilidade econômica do Caso 3 é preciso realizar uma orçamentação da solução ótima do Caso 3, que considera paredes externas de concreto moldado *in loco* e cobertura de telha cerâmica.

Para a estimativa dos valores, foi exposto na Tabela 18 uma breve composição do que seria necessário para o Caso 3 ótimo, porém é importante destacar que, a mão de obra do serviço, a instalação dos módulos fotovoltaicos e outros itens como por exemplo, massa de assentamento não foram contabilizados, em função da dificuldade de estimar suas quantidades e valores necessários.

Diante dessas considerações, foi consultado o Relatório de Insumos e Composições SINAPI da Caixa Econômica Federal com data base de janeiro de 2022, para o Rio Grande do Sul, de forma que, os preços médios estão dispostos na Tabela 27, conforme segue:

Tabela 27 – Quantitativo do Caso 3.

Descrição do Insumo	Unidade	Preço Médio por unidade	Quantidade necessária	Preço Médio Total
Parede externa de concreto moldado <i>in loco</i> e = 10 cm	m <sup>2</sup>	R\$ 203,76	1.250 m <sup>2</sup>	R\$ 254.700,00
EPS parede externa e = 5 cm	m <sup>2</sup>	R\$ 37,10	1.250 m <sup>2</sup>	R\$ 46.375,00
Laje de cobertura de concreto moldado <i>in loco</i> e = 8 cm	m <sup>2</sup>	R\$ 155,95	410 m <sup>2</sup>	R\$ 63.939,50
EPS cobertura e = 4 cm	m <sup>2</sup>	R\$ 29,68	410 m <sup>2</sup>	R\$ 12.168,80
Telha cerâmica portuguesa 40,2x24,3cm	m <sup>2</sup>	R\$ 27,20	410 m <sup>2</sup>	R\$ 11.152,00
Módulo fotovoltaico	peça	R\$ 1.050,00	188	R\$ 197.400,00
Total				R\$ 585.735,30

Fonte: A autora.

Cabe destacar que, a composição do concreto moldado *in loco* contempla os seguintes serviços: Forma, armação e concretos, dispostos na Tabela 16, vista anteriormente.

Na tabela 28 é possível visualizar a composição detalhada do insumo usado para o serviço de Parede externa de concreto moldada *in loco*.

Tabela 28 – Composição da parede de concreto moldada *in loco* por m<sup>2</sup>.

Caso 3							
Parede de Concreto (m <sup>2</sup> )	Forma (m <sup>2</sup> )		Armação (kg)		Concreto (m <sup>3</sup> )		Total (p/ m <sup>2</sup> )
	Quantid.	Valor	Quantid.	Valor	Quantid.	Valor	
Espessura 10cm	2,5	R\$ 23,50	8,0	R\$ 125,36	0,100	R\$ 54,90	<b>R\$ 203,76</b>

Fonte: A autora.

Cabe destacar que, o custo da envoltória para a condição inicial do PAR Marcílio Dias é de R\$ 186.850,06 enquanto que o custo total da envoltória do Caso 3 é de R\$ 585.735,30. Há um acréscimo de R\$ 398.855,24, sendo R\$ 197.400,00 referentes ao custo dos módulos fotovoltaicos.

O tempo de retorno desse investimento é de 5,64 anos, calculado pelo Valor Presente Líquido – VPL, conforme dados expostos na Tabela 29 e 30, a seguir.

Tabela 29 – Dados preliminares para a Análise de Investimento para o Caso 3.

DADOS	
Custo Envolvória Condição Inicial	R\$ 186.850,06
Investimento adicional - Usina Fotovoltaica	R\$ 197.400,00
Investimento adicional - Custo Envolvória Proposta	R\$ 201.455,24
Taxa Inflação Estimada Próximos Anos	10%
Investimento Adicional Total	R\$ 398.855,24
Valor Energia Gerada ao Ano	R\$ 70.746,93

Fonte: A autora.

Tabela 30 – Análise de Investimento do Caso 3.

ANÁLISE INVESTIMENTO	
TMA - Taxa Mínima de Atratividade	10%
PB - Payback (anos)	5,64
VPL - Valor Presente Líquido (20 anos)	R\$ 184.957,53
TIR - Taxa Interna de Retorno (20 anos)	17%

Fonte: A autora.

Com as Tabelas acima é possível perceber que o Caso 3 é viável economicamente, já que possui TIR superior a TMA.

#### 4.5 Caso 4

Os resultados para o Caso 4, que possui sistema construtivo apresentado na Tabela 31, que segue abaixo, estão expostos na Tabela 32, conforme segue:

Tabela 31 – Sistema construtivo do Caso 4.

	Sistema Construtivo Parede Externa	Composição Parede <sub>ext</sub>	Sistema Construtivo Cobertura	Composição da Cobertura
Caso 4	Concreto maciço $C_T = 330 \text{ kJ/m}^2\text{K}$	Concreto maciço 7,5 cm	Telha cerâmica $C_T = 284,2 \text{ kJ/m}^2\text{K}$	Telha cerâmica 12,5 mm
		EPS		Camada de ar
		Concreto maciço 7,5 cm		EPS
				Laje 12 cm

Fonte: A autora.

Tabela 32 – Resultados para o Caso 4.

nº ident.	Orientação Solar (º)	Absortância Solar - Telha cerâmica	Absortância Solar - Parede ext.	Espessura EPS Parede ext. (m)	Transmitância Térmica Parede ext. (W/(m².K))	Espessura EPS Cobertura (m)	Transmitância Térmica Cobertura (W/(m².K))	Consumo p/ Resfriamento (kWh/m².ano)	Consumo p/ Aquecimento (kWh/m².ano)	Consumo Termoenergético Total (kWh/m².ano)
<b>Caso Base</b>	90,00	0,70	0,60	0,00	1,61	0,00	2,10	16,74	23,05	39,79
<b>Caso 1 ótimo</b>	359,16	0,71	0,87	0,05	0,53	0,04	0,51	5,59	5,32	10,91
<b>Caso 2 ótimo</b>	341,86	0,76	0,65	0,05	0,50	0,04	0,53	2,86	6,28	9,14
<b>Caso 3 ótimo</b>	16,13	0,72	0,87	0,05	0,51	0,04	0,51	3,79	6,04	9,83
<b>1</b>	0,22	0,39	0,78	0,03	0,87	0,03	0,68	2,25	13,44	15,69
<b>2</b>	352,38	0,77	0,67	0,04	0,61	0,04	0,56	3,77	6,57	10,34
<b>3</b>	353,35	0,58	0,41	0,03	0,79	0,04	0,50	2,82	8,75	11,57
<b>4</b>	2,98	0,69	0,81	0,04	0,62	0,04	0,59	3,51	7,31	10,82
<b>5</b>	2,69	0,41	0,45	0,04	0,62	0,03	0,65	2,39	10,31	12,70
<b>6</b>	0,89	0,42	0,45	0,03	0,86	0,03	0,66	2,37	12,62	14,99
<b>7</b>	1,10	0,42	0,41	0,04	0,61	0,03	0,70	2,39	10,64	13,03
<b>8</b>	355,47	0,75	0,75	0,04	0,63	0,04	0,56	3,65	6,79	10,44

Fonte: A autora.

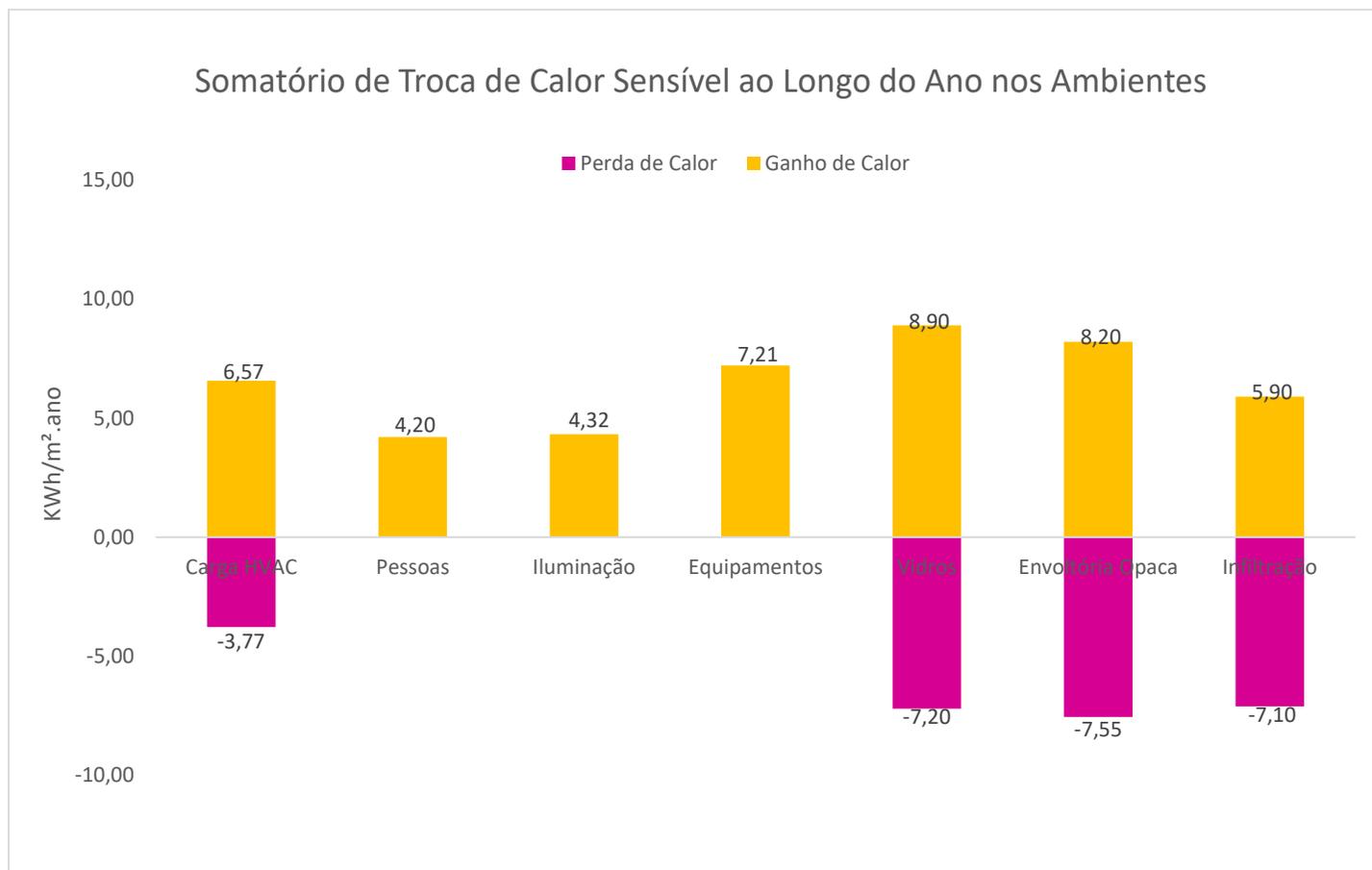


Figura 62 – Gráfico do somatório de troca de calor sensível ao longo do ano nos ambientes para o Caso 4 ótimo (nº de identificação 8). Fonte: A autora.

A partir dos resultados expostos na Tabela 32, é possível perceber que, dentre as 8 soluções obtidas, a nº 2 foi a que apresentou menor consumo termoenergético, portanto caracteriza-se por ser a solução ótima, que apresenta valores de orientação solar  $352,38^\circ$ ; absorvância solar da telha de cerâmica 0,75; absorvância solar da parede externa 0,77; transmitância térmica da parede de  $0,67 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$  e consumo termoenergético total de  $10,34 \text{ kWh}/\text{m}^2.\text{ano}$ . Por isso foi realizada uma apresentação do somatório da troca de calor de sensível ao longo do ano nos ambientes para essa solução ótima, conforme visto na Figura 62.

Ao analisar a Figura 62 do Caso 4 e comparar com as informações do Caso 3 é possível perceber que houve uma pequena redução no consumo de climatização artificial no verão. No balanço anual houve pouca diferença nas perdas através da envoltória. Quanto à infiltração houve um aumento dos ganhos e também um pequeno aumento das perdas.

Na Figura 63 é apresentado um gráfico (curva de Pareto) com eixos que indicam as duas variáveis-objetivo do modelo: a intensidade do uso de energia (*Energy Use Intensity* - EUI) para aquecimento e resfriamento. Os pontos vermelhos apontam as soluções verdadeiras (*True*) para frente de Pareto do conjunto analisado.

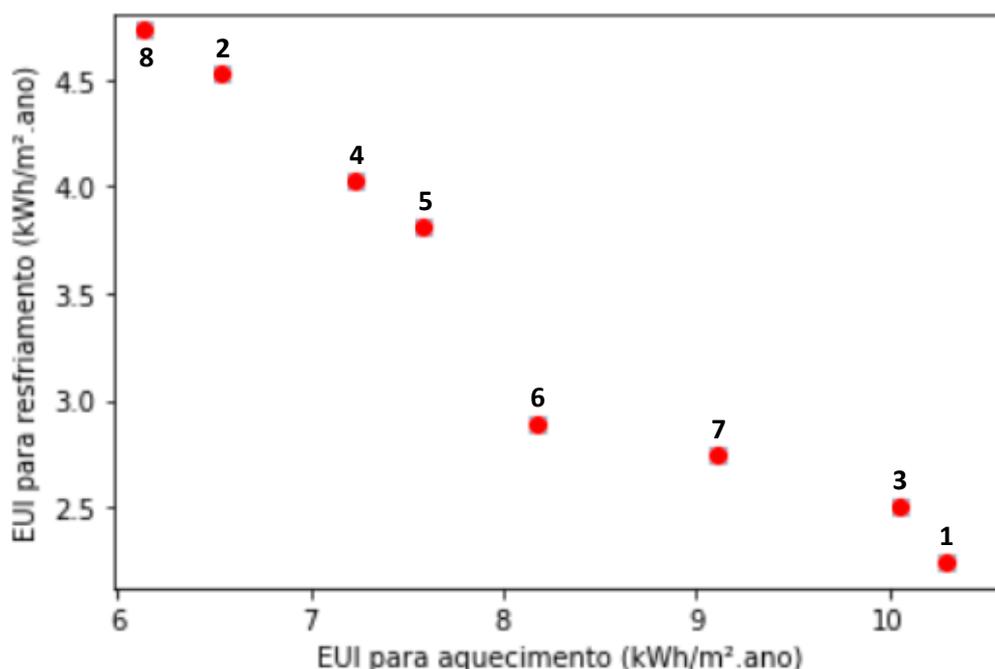


Figura 63 – Curva de Pareto para o Caso 4. Fonte: A autora.

#### 4.5.1 Capacidade de geração do sistema proposto para o Caso 4

Para o Caso 4 e os demais, que possuem cobertura de telha cerâmica, foram propostas duas águas com inclinação de 30%, que corresponde a 14°, voltadas para a orientação norte x sul, conforme especificado no item 4.2.1. O sistema gera ao total 99.798,63 kWh/ano. Na Figura 64 é possível comparar o consumo termoenergético do Caso 4 ótimo com a geração do sistema proposto.

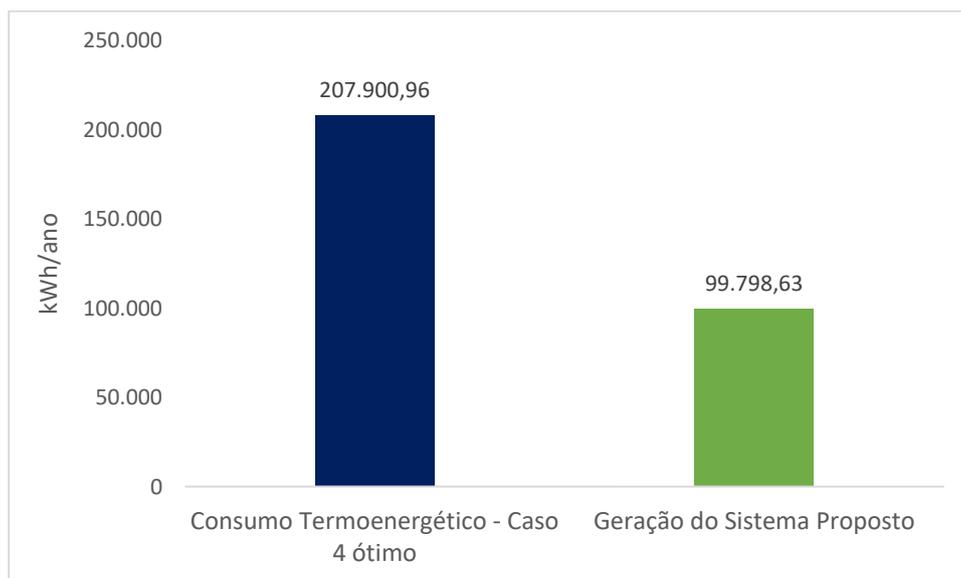


Figura 64 – Gráfico da energia termoenergética consumida e a energia gerada pelo sistema proposto para o Caso 4 ótimo. Fonte: A autora.

É possível perceber que, o consumo de energia da edificação no Caso 4 ótimo, considerando seus sistemas (iluminação, climatização e equipamentos), assim como, a energia elétrica requerida para atendimento da demanda anual de água quente é de 207.900,96 kWh/ano, resultando em 13,6 kWh/m<sup>2</sup>.ano.

O sistema de geração proposto supre 48% do consumo de energia do Caso 4 ótimo. Entretanto, na hipótese de escolha pela mesma geração proposta no Caso 1 (112.361,56 kWh/ano), o Caso 4 teria uma geração que atenderia a 54% do consumo, podendo caracterizar-se como NZEB.

#### 4.5.2 Custo da envoltória para o Caso 4

Para a obtenção da viabilidade econômica do Caso 4 é preciso realizar uma orçamentação da solução ótima do Caso 4, que considera paredes externas de concreto moldado *in loco* e cobertura de telha cerâmica.

Para a estimativa dos valores foi exposto na Tabela 18 uma breve composição do que seria necessário para o Caso 4 ótimo.

Diante dessas considerações, foi consultado o Relatório de Insumos e Composições SINAPI da Caixa Econômica Federal com data base de janeiro de 2022, para o Rio Grande do Sul, de forma que, os preços médios estão dispostos na Tabela 33, conforme segue:

Tabela 33 – Quantitativo do Caso 4.

Descrição do Insumo	Unidade	Preço Médio por unidade	Quantidade necessária	Preço Médio Total
Parede externa de concreto moldado <i>in loco</i> e = 15 cm	m <sup>2</sup>	R\$ 293,88	1.250 m <sup>2</sup>	R\$ 367.350,00
EPS parede externa e = 5 cm	m <sup>2</sup>	R\$ 37,10	1.250 m <sup>2</sup>	R\$ 46.375,00
Laje de cobertura de concreto moldado <i>in loco</i> e = 12 cm	m <sup>2</sup>	R\$ 228,06	410 m <sup>2</sup>	R\$ 93.504,60
EPS cobertura e = 4 cm	m <sup>2</sup>	R\$ 29,68	410 m <sup>2</sup>	R\$ 12.168,80
Telha cerâmica portuguesa 40,2x24,3cm	m <sup>2</sup>	R\$ 27,20	410 m <sup>2</sup>	R\$ 11.152,00
Módulo fotovoltaico	peça	R\$ 1.050,00	188	R\$ 197.400,00
Total				R\$ 727.950,40

Fonte: A autora.

Cabe destacar que, a composição do concreto moldado *in loco* contempla os seguintes serviços: Forma, armação e concretos, dispostos na Tabela 16, vista anteriormente.

Nas tabelas 34 e 35 é possível visualizar a composição detalhada dos insumos utilizados para os serviços de Parede externa de concreto moldada *in loco* e da laje de cobertura de concreto moldado *in loco*.

Tabela 34 – Composição da parede de concreto moldada *in loco* por m<sup>2</sup>.

Caso 4							
Parede de Concreto (m <sup>2</sup> )	Forma (m <sup>2</sup> )		Armação (kg)		Concreto (m <sup>3</sup> )		Total (p/ m <sup>2</sup> )
	Quantid.	Valor	Quantid.	Valor	Quantid.	Valor	
Espessura 15cm	2,5	R\$ 23,50	12,0	R\$ 188,04	0,150	R\$ 82,34	<b>R\$ 293,88</b>

Fonte: A autora.

Tabela 35 – Composição da laje de cobertura de concreto moldada *in loco* por m<sup>2</sup>.

Caso 4							
Laje de Concreto (m <sup>2</sup> )	Forma (m <sup>2</sup> )		Armação (kg)		Concreto (m <sup>3</sup> )		Total (p/ m <sup>2</sup> )
	Quantid.	Valor	Quantid.	Valor	Quantid.	Valor	
Espessura 12 cm	1,25	R\$ 11,75	9,6	R\$ 150,43	0,120	R\$ 65,87	<b>R\$ 228,06</b>

Fonte: A autora.

Cabe salientar que, o custo da envoltória para a condição inicial do PAR Marcílio Dias é de R\$ 186.850,06 enquanto que o custo total da envoltória do Caso 4 é de R\$ 727.950,40. Há um acréscimo de R\$ 541.100,35 sendo R\$ 197.400,00 referentes ao custo dos módulos fotovoltaicos.

O tempo de retorno desse investimento é de 7,65 anos, calculado pelo Valor Presente Líquido – VPL, conforme dados expostos na Tabela 36 e 37, a seguir.

Tabela 36 – Dados preliminares para a Análise de Investimento do Caso 4.

<b>DADOS</b>	
Custo Envoltória Condição Inicial	R\$ 186.850,06
Investimento adicional - Usina Fotovoltaica	R\$ 197.400,00
Investimento adicional - Custo Envoltória Proposta	R\$ 343.700,35
Taxa Inflação Estimada Próximos Anos	10%
Investimento Adicional Total	R\$ 541.100,35
Valor Energia Gerada ao Ano	R\$ 70.768,21

Fonte: A autora.

Tabela 37 – Análise de Investimento do Caso 4.

<b>ANÁLISE INVESTIMENTO</b>	
TMA - Taxa Mínima de Atratividade	10%
PB - Payback (anos)	7,65
VPL - Valor Presente Líquido (20 anos)	R\$ 55.808,44
TIR - Taxa Interna de Retorno (20 anos)	12%

Fonte: A autora.

Com as Tabelas acima é possível perceber que o Caso 4 é viável economicamente, já que as receitas são maiores que as despesas, ou seja, o projeto é viável, mas por uma margem muito pequena.

#### 4.6 Caso 5

Os resultados para o Caso 5, que possui sistema construtivo apresentado na Tabela 38, que segue abaixo, estão expostos na Tabela 39, conforme segue:

Tabela 38 – Sistema construtivo do Caso 5.

	<b>Sistema Construtivo Parede Externa</b>	<b>Composição Parede<sub>ext</sub></b>	<b>Sistema Construtivo Cobertura</b>	<b>Composição da Cobertura</b>
<b>Caso 5</b>	Concreto maciço $C_T = 440 \text{ kJ/m}^2\text{K}$	Concreto maciço 10 cm	Telha cerâmica $C_T = 304,4 \text{ kJ/m}^2\text{K}$	Telha cerâmica 12,5 mm
		EPS		Camada de ar
		Concreto maciço 10 cm		EPS
				Laje 13 cm

Fonte: A autora.

Tabela 39 – Resultados para o Caso 5.

nº ident.	Orientação Solar (°)	Absortância Solar Telha cerâmica	Absortância Solar - Parede ext.	Espessura EPS Parede ext. (m)	Transmitância Térmica Parede ext. (W/(m².K))	Espessura EPS Cobertura (m)	Transmitância Térmica Cobertura (W/(m².K))	Consumo p/ Resfriamento (kWh/m².ano)	Consumo p/ Aquecimento (kWh/m².ano)	Consumo Termoenergético Total (kWh/m².ano)
<b>Caso Base</b>	90,00	0,70	0,60	0,00	1,61	0,00	2,10	16,74	23,05	39,79
<b>Caso 1 ótimo</b>	359,16	0,71	0,87	0,05	0,53	0,04	0,51	5,59	5,32	10,91
<b>Caso 2 ótimo</b>	341,86	0,76	0,65	0,05	0,50	0,04	0,53	2,86	6,28	9,14
<b>Caso 3 ótimo</b>	16,13	0,72	0,87	0,05	0,51	0,04	0,51	3,79	6,04	9,83
<b>Caso 4 ótimo</b>	352,38	0,77	0,67	0,04	0,61	0,04	0,56	3,77	6,57	10,34
<b>1</b>	17,32	0,90	0,84	0,05	0,50	0,04	0,54	5,42	4,74	10,16
<b>2</b>	350,39	0,31	0,81	0,02	0,92	0,02	0,93	1,89	18,53	20,42
<b>3</b>	354,59	0,51	0,81	0,05	0,51	0,03	0,61	2,63	7,74	10,36
<b>4</b>	353,39	0,90	0,79	0,05	0,54	0,04	0,50	4,13	4,78	8,91
<b>5</b>	357,26	0,65	0,86	0,05	0,55	0,04	0,53	3,09	6,28	9,38
<b>6</b>	354,66	0,81	0,79	0,04	0,58	0,04	0,52	3,74	5,50	9,24
<b>7</b>	355,29	0,55	0,81	0,05	0,52	0,04	0,56	2,76	6,89	9,65
<b>8</b>	354,66	0,86	0,81	0,05	0,52	0,04	0,51	3,97	4,90	8,86

Fonte: A autora.

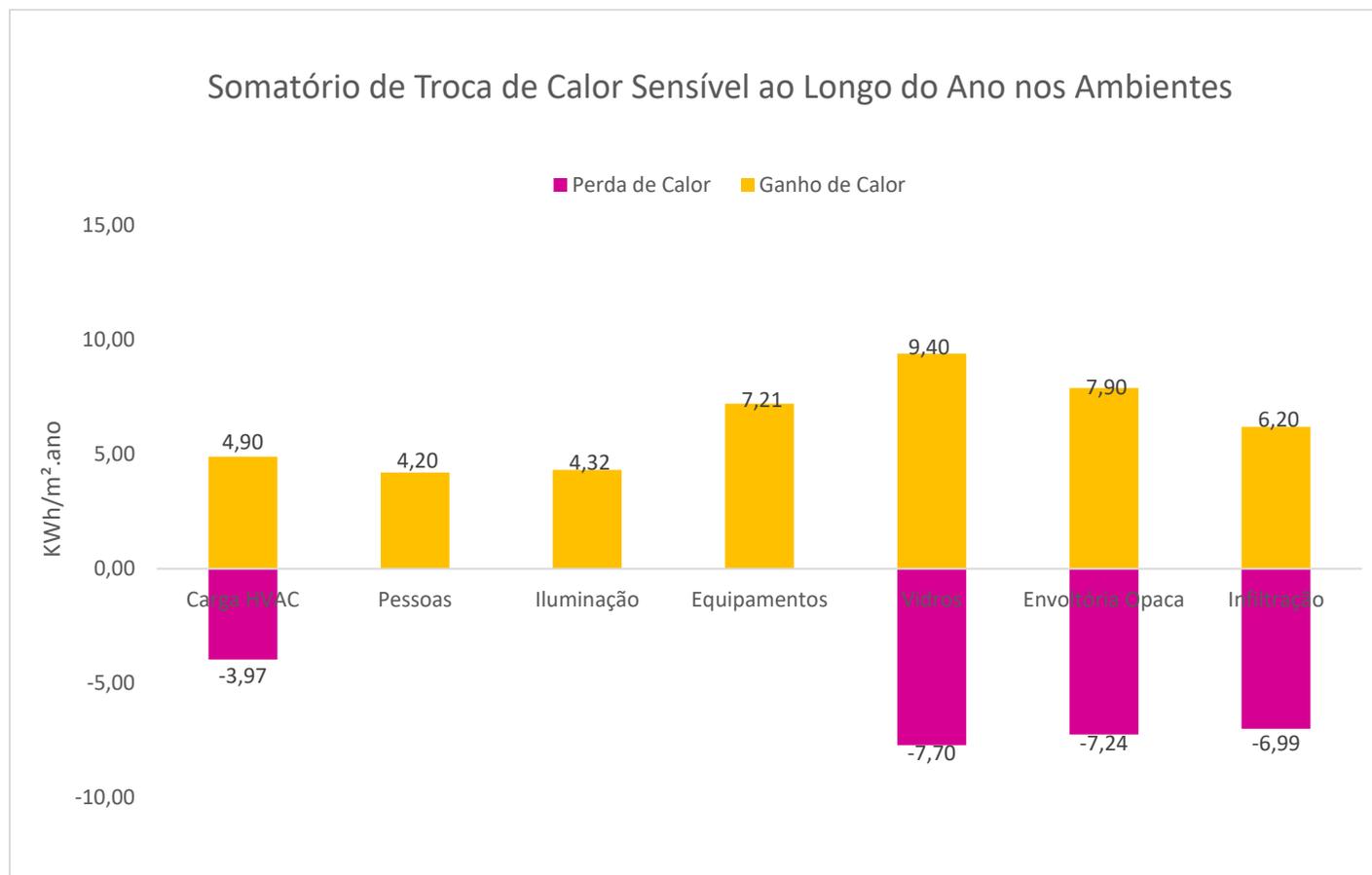


Figura 65 – Gráfico do somatório de troca de calor sensível ao longo do ano nos ambientes para o Caso 5 ótimo (nº de identificação 8). Fonte: A autora.

Dentre as 8 soluções obtidas, é possível perceber que, a nº 8 foi a que apresentou menor consumo termoenergético, logo caracteriza-se por ser a solução ótima, que apresenta valores de orientação solar  $354,66^\circ$ ; na qual as maiores fachadas estão voltadas para as orientações solares norte x sul, absorvância solar da telha cerâmica 0,86; absorvância solar da parede externa 0,81; transmitância térmica da parede de  $0,5 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$  e consumo termonergético total de  $8,86 \text{ kWh}/\text{m}^2.\text{ano}$ . Por isso foi realizada uma apresentação do somatório da troca de calor de sensível ao longo do ano nos ambientes para essa solução ótima, conforme visto na Figura 65.

Ao analisar a Figura 65 do Caso 5 e comparar com as informações do Caso 4 é possível perceber que houve uma redução no consumo de climatização artificial no inverno e um pequeno aumento da perda no verão.

No balanço anual houve uma redução das perdas e dos ganhos através da envoltória, devido ao aumento da espessura da parede, que refletiu no isolamento desta. Quanto à infiltração houve um aumento dos ganhos e uma pequena diminuição das perdas.

Na Figura 66 é possível analisar um gráfico com eixos que indicam as duas variáveis-objetivo do modelo em questão: a intensidade do uso de energia (*Energy Use Intensity* - EUI) para aquecimento e resfriamento. Os pontos vermelhos apontam as soluções verdadeiras (*True*) para frente de Pareto do conjunto analisado.

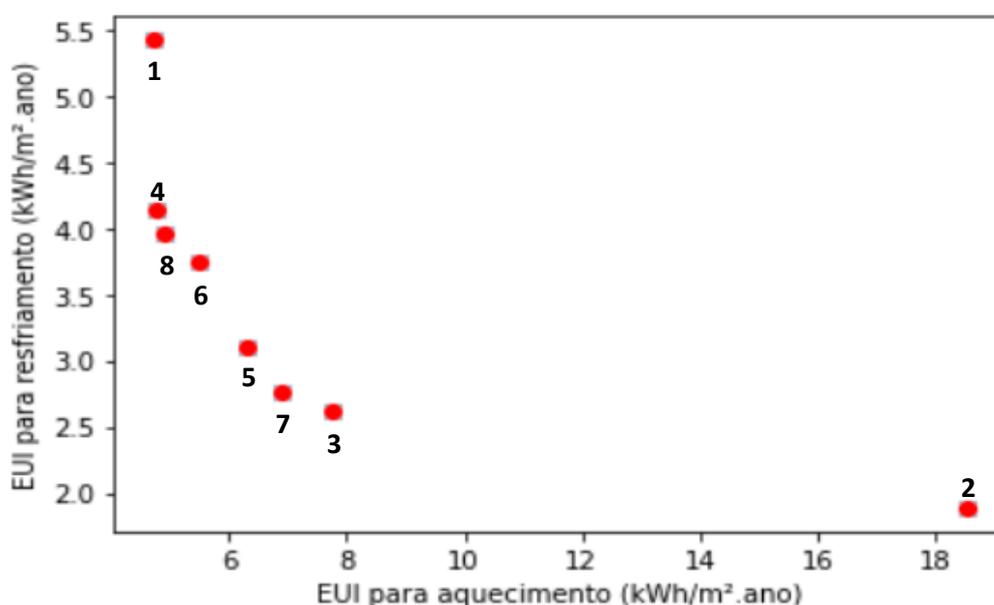


Figura 66 – Curva de Pareto para o Caso 5. Fonte: A autora.

#### 4.6.1 Capacidade de geração do sistema proposto para o Caso 5

Para o Caso 5 e os demais, que possuem cobertura de telha cerâmica, foram propostas duas águas com inclinação de 30%, que corresponde a 14°, voltadas para a orientação norte x sul, conforme especificado no item 4.2.1. O sistema gera ao total 99.798,63 kWh/ano. Na Figura 67 é possível comparar o consumo termoenergético do Caso 5 ótimo com a geração do sistema proposto.

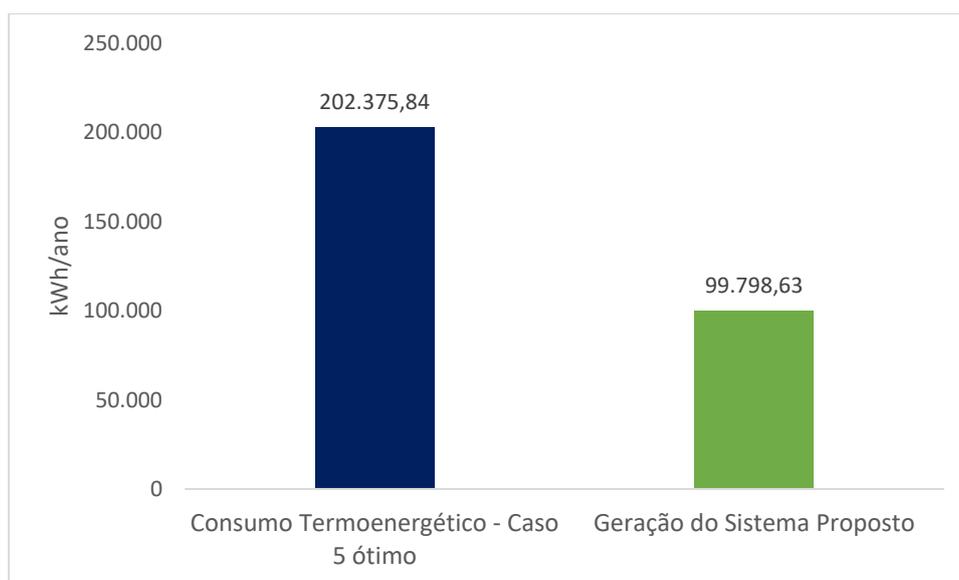


Figura 67– Gráfico da energia termoenergética consumida e a energia gerada pelo sistema proposto para o Caso 5 ótimo. Fonte: A autora.

Dessa forma, é possível perceber que, o consumo de energia da edificação no Caso 5 ótimo, considerando seus sistemas (iluminação, climatização e equipamentos), assim como, a energia elétrica requerida para atendimento da demanda anual de água quente é de 202.375,84 kWh/ano, resultando em 12,98 kWh/m<sup>2</sup>.ano.

Assim como, o sistema de geração proposto supre 49,31% do consumo de energia do Caso 5 ótimo. Entretanto, na hipótese da escolha pela mesma geração proposta no Caso 1 (112.361,56 kWh/ano), o Caso 5 teria uma geração que atenderia a 55,55% do consumo, podendo caracterizar-se como NZEB.

#### 4.6.2 Custo da envoltória para o Caso 5

Para a obtenção da viabilidade econômica do Caso 5 é preciso realizar uma orçamentação da solução ótima do Caso 5, que considera paredes externas de

concreto moldado *in loco* e cobertura de telha cerâmica.

Para a estimativa dos valores foi exposto na Tabela 27 uma breve composição do que seria necessário para o Caso 5 ótimo.

Diante dessas considerações, foi consultado o Relatório de Insumos e Composições SINAPI da Caixa Econômica Federal com data base de janeiro de 2022, para o Rio Grande do Sul, de forma que, os preços médios estão dispostos na Tabela 40, conforme segue:

Tabela 40 – Quantitativo do Caso 5.

Descrição do Insumo	Unidade	Preço Médio por unidade	Quantidade necessária	Preço Médio Total
Parede externa de concreto moldado <i>in loco</i> e = 20 cm	m <sup>2</sup>	R\$ 384,01	1.250 m <sup>2</sup>	R\$ 480.012,50
EPS parede externa e = 5 cm	m <sup>2</sup>	R\$ 37,10	1.250 m <sup>2</sup>	R\$ 46.375,00
Laje de cobertura de concreto moldado <i>in loco</i> e = 13 cm	m <sup>2</sup>	R\$ 246,08	410 m <sup>2</sup>	R\$ 100.892,80
EPS cobertura e = 4 cm	m <sup>2</sup>	R\$ 29,68	410 m <sup>2</sup>	R\$ 12.168,80
Telha cerâmica portuguesa 40,2x24,3cm	m <sup>2</sup>	R\$ 27,20	410 m <sup>2</sup>	R\$ 11.152,00
Módulo fotovoltaico	peça	R\$ 1.050,00	188	R\$ 197.400,00
Total				R\$ 848.001,10

Fonte: A autora.

Cabe destacar que, a composição do concreto moldado *in loco* contempla os seguintes serviços: Forma, armação e concretos, dispostos na Tabela 16, vista anteriormente.

Nas tabelas 41 e 42 é possível visualizar a composição detalhada dos insumos utilizados para os serviços de Parede externa de concreto moldada *in loco* e da laje de cobertura de concreto moldado *in loco*.

Tabela 41 – Composição da parede de concreto moldada *in loco* por m<sup>2</sup>.

Caso 5							
Parede de Concreto (m <sup>2</sup> )	Forma (m <sup>2</sup> )		Armação (kg)		Concreto (m <sup>3</sup> )		Total (p/ m <sup>2</sup> )
	Quantid.	Valor	Quantid.	Valor	Quantid.	Valor	
Espessura 20cm	2,5	R\$ 23,50	16,0	R\$ 250,72	0,200	R\$ 109,79	<b>R\$ 384,01</b>

Fonte: A autora.

Tabela 42 – Composição da laje de cobertura de concreto moldada *in loco* por m<sup>2</sup>.

Caso 5							
Laje de Concreto (m <sup>2</sup> )	Forma (m <sup>2</sup> )		Armação (kg)		Concreto (m <sup>3</sup> )		Total (p/ m <sup>2</sup> )
	Quantid.	Valor	Quantid.	Valor	Quantid.	Valor	
Espessura 13 cm	1,25	R\$ 11,75	10,4	R\$ 162,97	0,130	R\$ 71,36	<b>R\$ 246,08</b>

Fonte: A autora.

Sendo o custo da envoltória para a condição inicial do PAR Marcílio Dias de R\$ 186.850,06 e o custo total da envoltória do Caso 5 de R\$ 848.001,10, há um acréscimo de R\$ 661.151,04 sendo R\$ 197.400,00 referentes ao custo dos módulos fotovoltaicos.

O tempo de retorno desse investimento é de 9,34 anos, calculado pelo Valor Presente Líquido – VPL, conforme dados expostos na Tabela 43 e 44, a seguir.

Tabela 43 – Dados preliminares para a Análise de Investimento do Caso 5

DADOS	
Custo Envoltória Condição Inicial	R\$ 186.850,06
Investimento adicional - Usina Fotovoltaica	R\$ 197.400,00
Investimento adicional - Custo Envoltória Proposta	R\$ 463.751,04
Taxa Inflação Estimada Próximos Anos	10%
Investimento Adicional Total	R\$ 661.151,04
Valor Energia Gerada ao Ano	R\$ 70.768,21

Fonte: A autora.

Tabela 44 – Análise de Investimento do Caso 5

ANÁLISE INVESTIMENTO	
TMA - Taxa Mínima de Atratividade	10%
PB - Payback (anos)	9,34
VPL - Valor Presente Líquido (20 anos)	<b>-R\$ 53.328,55</b>
TIR - Taxa Interna de Retorno (20 anos)	9%

Fonte: A autora.

Com as Tabelas acima é possível perceber que o Caso 5 não é viável economicamente, visto que, o seu VPL é negativo, ou seja, possui despesas maiores que as receitas, além do fato da TIR ser inferior a TMA, logo, o projeto é inviável economicamente.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando as propriedades térmicas da envoltória, pode-se perceber que em todos os Casos a tendência foi uma só: transmitâncias de paredes e coberturas na ordem de  $0,50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ , que era a menor transmitância adotada pela metodologia deste trabalho. Notadamente, observa-se, que independente do sistema construtivo, obtém-se mesmos valores de transmitâncias de paredes e coberturas. Ou seja, o mais importante é o comportamento térmico do componente e não sua composição. Assim, a telha cerâmica adotada nos Casos 2 a 5 poderia ser substituída por uma telha metálica ou de fibrocimento, como a adotada no Caso 1, contanto que preservasse as propriedades térmicas da cobertura.

Quanto à capacidade térmica, nota-se que esta variação não proporcionou grandes variações nos consumos totais. Entretanto, o mesmo não se pode dizer quanto aos consumos de aquecimento e resfriamento. O Caso 1, com  $C_T = 25 \text{ J/m}^2\cdot\text{K}$ , apresentou os maiores consumos para resfriamento, compensado pelo menor consumo para aquecimento. Não é possível observar uma relação direta entre o aumento da capacidade térmica e o consumo com resfriamento. Por outro lado, nota-se uma tendência de redução do consumo com aquecimento a medida que se aumenta a capacidade térmica da envoltória. É importante salientar que o isolamento térmico situa-se no centro da parede e acima da laje de cobertura. Ou seja, a capacidade térmica da laje e parte (metade) da capacidade térmica da parede está vinculada ao interior do edifício, atuando como capacidade térmica interna, que é a estratégia bioclimática de massa térmica para aquecimento, adequada ao clima da ZB2, conforme a bibliografia.

Quanto aos consumos de aquecimento e resfriamento, com exceção do Caso 1, no qual aquecimento e resfriamento se equivalem, todos os demais Casos apresentaram um padrão, no qual o resfriamento responde por 40% e o aquecimento por 60% do consumo total de climatização, reforçando a importância das estratégias bioclimáticas de inverno, tais com a orientação solar, isolamento térmico, massa térmica interna e as cores das superfícies. Neste item, observa-se a predominância de cores com absorvância mais elevadas.

Observa-se, diante dos Casos estudados, que o Caso 1, com parede externa de *steel frame* (capacidade térmica de  $56,68 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$ ) e cobertura de telha fibro-

cimento e forro de madeira (capacidade térmica de 25 kJ/m<sup>2</sup>K) apresenta o maior valor para resfriamento (5,59) enquanto os demais casos ficam na ordem de 2,86 - 3,97, resultado do efeito da massa térmica interna representada pela camada da parede externa que fica voltada para o interior e separada por EPS da camada mais externa da parede externa.

O consumo total (aquecimento somado ao resfriamento) menor apresentado foi do Caso 5 de 8,86 kWh/m<sup>2</sup>.ano, seguido pelo Caso 2 que consumiu 9,14 kWh/m<sup>2</sup>.ano. A comparação dos menores consumos dos resultados ótimos de cada Caso está apresentada na Tabela 45 a seguir:

Tabela 45 – Comparação entre os resultados ótimos de cada Caso.

nº ident.	Orientação Solar (°)	Absortância Solar Telha cerâmica	Absortância Solar - Parede ext.	Espessura EPS Parede ext. (m)	Transmitância Térmica Parede ext. (W/(m².K))	Espessura EPS Cobertura (m)	Transmitância Térmica Cobertura (W/(m².K))	Consumo p/ Resfriamento (kWh/m².ano)	Consumo p/ Aquecimento (kWh/m².ano)	Consumo Termoenergético Total (kWh/m².ano)
<b>Caso Base</b>	90,00	0,70	0,60	0,00	1,61	0,00	2,10	16,74	23,05	39,79
<b>Caso 1 ótimo</b>	359,16	0,71	0,87	0,05	0,53	0,04	0,51	5,59	5,32	10,91
<b>Caso 2 ótimo</b>	341,86	0,76	0,65	0,05	0,50	0,04	0,53	2,86	6,28	9,14
<b>Caso 3 ótimo</b>	16,13	0,72	0,87	0,05	0,51	0,04	0,51	3,79	6,04	9,83
<b>Caso 4 ótimo</b>	352,38	0,77	0,67	0,04	0,61	0,04	0,56	3,77	6,57	10,34
<b>Caso 5 ótimo</b>	354,66	0,86	0,81	0,05	0,52	0,04	0,51	3,97	4,90	8,86

Fonte: A autora.

Considerando a viabilidade econômica, a Tabela 46 apresenta um comparativo dos preços totais médios das intervenções dos Casos estudos, conforme segue:

Tabela 46 – Comparativos dos preços totais médios

<b>Casos</b>	<b>Custo da Envolória</b>	<b>Custo da Geração Fotovoltaica</b>	<b>Preço Médio Total da Implementação</b>
Condição Inicial	R\$ 186.850,06	-	R\$ 186.850,06
Caso 1	R\$ 339.833,20	R\$ 207.900,00	R\$ 547.733,20
Caso 2	R\$ 264.472,80	R\$ 197.400,00	R\$ 461.872,80
Caso 3	R\$ 388.335,30	R\$ 197.400,00	R\$ 585.735,30
Caso 4	R\$ 530.550,40	R\$ 197.400,00	R\$ 727.950,40.
Caso 5	R\$ 650.601,10	R\$ 197.400,00	R\$ 848.001,10

Fonte: A autora.

Tabela 47 – Comparativos dos dados de cada Caso.

	Consumo total (kWh/ano)	Custo de execução da envolória	Diferença do Custo de Implementação	Custo do kWh.ano (R\$0,90)	Economia de Energia (anual)	Tempo de Retorno (anos)
Caso base	258.957,76	R\$ 186.850,06	-	R\$ 233.061,98	-	-
Caso1	127.184,00	R\$ 547.733,20	R\$ 360.883,14	R\$ 114.465,60	R\$ 118.596,38	4,53
Caso2	149.933,60	R\$ 461.872,80	R\$ 275.022,74	R\$ 134.940,24	R\$ 98.121,74	3,89
Caso3	145.609,76	R\$ 585.735,30	R\$ 398.885,24	R\$ 131.048,78	R\$ 102.013,20	5,64
Caso4	147.980,96	R\$ 727.950,40	R\$ 541.100,34	R\$ 133.182,86	R\$ 99.879,12	7,65
Caso5	142.455,84	R\$ 848.001,10	R\$ 661.151,04	R\$ 128.210,26	R\$ 104.851,73	9,34

Fonte: A autora.

Através da Tabelas 47 é possível perceber que o Caso 2 possui tempo de retorno mais rápido. Dentre os Casos otimizados, o Caso 2 apresenta o menor custo de execução da envolória, e conseqüente menor tempo de retorno. Já o Caso 5 possui o maior investimento para implementação das propriedades térmicas propostas na envolória, assim como maior tempo de retorno.

Cruzando as informações da Tabela 45, 46 e 47 verifica-se que se consegue praticamente o mesmo resultado com custos extremamente distintos, e conseqüentemente, tempos de retorno também distintos. As opções abarcadas neste trabalho, reforçam a ideia de que é possível obter desempenhos característicos de NZEB com tempo de retorno relativamente baixo, mesmo para habitações de interesse social na zona bioclimática 2, provavelmente a mais desafiadora em função da sazonalidade anual extrema e a baixa produção de energia fotovoltaica no inverno.

Quanto a isso, fica comprovado que se adotado o telhado de uma só água, a geração fotovoltaica atende a mais de 50% da demanda, sendo possível ser considerada NZEB em todos os Casos.

Na Tabela 48 a seguir é possível perceber um resumo comparativo dos Casos estudados:

Tabela 48 – Comparativos dos preços totais médios

Casos	Composição Parede	Composição da Cobertura	Consumos (kWh/m <sup>2</sup> .ano)			Custo Total da Intervenção/ Tempo Retorno
			Resfriamento	Aquecimento	Total	
Caso 1	Placa cimentícia 10mm	Telha de fibrocimento 0,7 cm	5,59	5,32	10,91	R\$ 535.564,20 4,53 anos
	<b>EPS 50mm</b>					
	Placa OSB 8mm	Camada de ar				
	Perfil metálico 0,95mm	<b>EPS 44mm</b>				
	Placa cimentícia 6mm	Forro de madeira 1 cm				
	<b>(U= 0,53 W/m<sup>2</sup>.K; C<sub>T</sub> = 56,68 kJ/m<sup>2</sup>.K)</b>	<b>U= 0,51 W/m<sup>2</sup>.K C<sub>T</sub> = 25 kJ/m<sup>2</sup>.K</b>				
Caso 2	Concreto maciço 3,25cm	Telha cerâmica 12,5 mm	2,86	6,28	9,14	R\$ 461.872,80 3,89 anos
		Camada de ar				
	<b>EPS 50mm</b>	<b>EPS 40mm</b>				
	Concreto maciço 3,25cm	Laje 8 cm				
	<b>U= 0,50 W/m<sup>2</sup>.K C<sub>T</sub> = 143 kJ/m<sup>2</sup>.K</b>	<b>U= 0,53 W/m<sup>2</sup>.K C<sub>T</sub> = 194,4 kJ/m<sup>2</sup>.K</b>				
Caso 3	Concreto maciço 5 cm	Telha cerâmica 12,5 mm	3,79	6,04	9,83	R\$ 585.735,30 5,64 anos
		Camada de ar				
	<b>EPS 50mm</b>	<b>EPS 40mm</b>				
	Concreto maciço 5 cm	Laje 8 cm				
	<b>U= 0,51 W/m<sup>2</sup>.K C<sub>T</sub> = 240 kJ/m<sup>2</sup>.K</b>	<b>U= 0,51 W/m<sup>2</sup>.K C<sub>T</sub> = 194,4 kJ/m<sup>2</sup>.K</b>				
Caso 4	Concreto maciço 7,5 cm	Telha cerâmica 12,5 mm	3,77	6,57	10,34	R\$ 727.950,40 7,65 anos
		Camada de ar				
	<b>EPS 40mm</b>	<b>EPS 40mm</b>				
	Concreto maciço 7,5 cm	Laje 12 cm				
	<b>U= 0,61 W/m<sup>2</sup>.K C<sub>T</sub> = 330 kJ/m<sup>2</sup>.K</b>	<b>U= 0,56W/m<sup>2</sup>.K C<sub>T</sub> = 282,4 kJ/m<sup>2</sup>.K</b>				
Caso 5	Concreto maciço 10 cm	Telha cerâmica 12,5 mm	3,97	4,90	8,86	R\$ 848.001,10 9,34 anos
		Camada de ar				
	<b>EPS 50mm</b>	<b>EPS 40mm</b>				
	Concreto maciço 10 cm	Laje 13 cm				
	<b>U= 0,52 W/m<sup>2</sup>.K C<sub>T</sub> = 440 kJ/m<sup>2</sup>.K</b>	<b>U= 0,51 W/m<sup>2</sup>.K C<sub>T</sub> = 304,4 kJ/m<sup>2</sup>.K</b>				

Fonte: A autora.

Conclui-se que os resultados ótimos dos Casos estudados atingem o desempenho termoenergético considerado para uma NZEB.

Logo, a partir dos resultados obtidos, é possível recomendar os componentes analisados para diminuir o consumo termoenergético de habitações multifamiliares na ZB2.

## 6. CONCLUSÕES

O presente estudo foi realizado com o objetivo de analisar a viabilidade do conceito NZEB para o uso residencial multifamiliar de interesse social em um contexto climático complexo, a ZB2, no sul do Brasil.

Para isso, foi aplicada uma ferramenta da inteligência artificial, o algoritmo evolutivo multiobjetivo NSGA-II, que verificou o quanto de melhoria as edificações poderiam ter em seus desempenhos, até atingirem um nível NZEB. Para tanto, foi identificado um projeto padrão de HIS no sul do Brasil (condição de Caso Base), de forma pouco complexa e bem representativa dos padrões brasileiros, conforme Curcio (2011), baseado em edifícios construídos no contexto do Programa de Arrendamento Residencial - PAR na cidade de Pelotas - RS. O Caso Base (PAR Marcílio Dias) possui geometria simples e apartamentos com orientações solares bem definidas, tem 4 andares e possui tijolos maciços nas paredes externas, do 1º ao 3º pavimento, e tijolos furados no 4º pavimento ambos com 25 cm de espessura. Laje pré-fabricada (espessura de 8 cm) e telha cerâmica, ou seja, características construtivas reais do edifício construído na cidade de Pelotas, RS.

Foram avaliados os indicadores de desempenho termoenergético; determinadas as propriedades térmicas da envoltória através da definição dos sistemas construtivos avaliados (Paredes externas compostas por: *Steel frame* e concreto maciço com espessuras de 6,5 cm 10 cm 15 cm e 20 cm e coberturas compostas por telha de fibro cimento ou cerâmica), em função da variação da capacidade térmica das paredes externas e da cobertura. Assim como, determinada a orientação solar da edificação que melhor atende à obtenção de uma edificação NZEB. Foram também definidas as variáveis consideradas (orientação solar, absortância solar das paredes e da cobertura e espessura do EPS de isolamento), assim como seus limites inferior e superior.

Foi caracterizada a importância da qualidade do projeto para atingir o conceito NZEB, justamente porque partiu-se do Caso Base, um projeto ineficiente e foi obtido um projeto eficiente, testando a capacidade térmica de diferentes métodos construtivos, que foram convergindo.

Diante dos resultados, o valor de transmitância térmica foi preponderante, tendendo a 0,5 (menor valor estabelecido), mostrando a necessidade de

isolamento. As cores variavam pouco, indo a absorvância de 0,5 à 0,7 pois ainda assim atendem os parâmetros dos melhores casos testados.

Cabe destacar que, foi dada maior ênfase às propriedades térmicas em detrimento dos custos, pois quaisquer técnicas construtivas que apresentem as propriedades térmicas da envoltória também proporcionariam desempenho compatível com NZEB. Até mesmo as técnicas construtivas do Caso Base poderiam alcançar tal desempenho se possuísem o isolamento adequado.

Aliado ao resultado dos componentes analisados, que apresentam melhor desempenho termoenergético, obtido pelo algoritmo NSGA-II juntamente com o software *EnergyPlus*, uma análise econômica foi importante para a determinação dos menores custos e dessa forma das opções de mais fácil implementação. A geração localizada de energia se deu através da implantação de módulos fotovoltaicos na cobertura, através da qual foi possível que o conceito NZEB fosse atendido.

Os resultados obtidos demonstram que o referido método pode ser aplicado com sucesso na busca de um desempenho NZEB em edificações residenciais multifamiliares. De modo que, o uso de algoritmos genéticos e simulações computacionais contribuem na tomada de decisão do sistema construtivo utilizado na envoltória visando o melhor desempenho da edificação.

Como limitação do estudo houve a impossibilidade de variar o Percentual de Área de Abertura na Fachada Total (PAFT), para diferentes orientações, na análise multiobjetivo, através da abordagem de otimização NSGA-II.

Os resultados porém convergem claramente com as estratégias bioclimáticas para o clima da ZB2, que é implantação com as maiores faces para as fachadas norte e sul, aquecimento solar passivo e alto isolamento de paredes e coberturas.

Portanto, os resultados obtidos demonstram ser possível apresentar uma análise da implementação do conceito NZEB para o uso residencial multifamiliar de interesse social na ZB2.

## 7. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Como proposta de continuidade do presente estudo é sugerido:

- Avaliar outras possibilidades de otimização de desempenho energético;
- Avaliar as aberturas das edificações, tanto em transmitância térmica quanto em área e sombreamento para diferentes orientações;
- Expandir a pesquisa a outros contextos climáticos;
- Explorar, além dos módulos FV, outras fontes de geração localizada de energia.
- Analisar o uso de sistemas solares de aquecimento de água conjuntamente com a geração de energia elétrica.
- Avaliar a relevância da absorvância das superfícies no desempenho final dos Casos otimizados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAHÃO, Karla Cristina de Freitas Jorge; SOUZA, Roberta Gonçalves Vieira de. Estimativa da evolução do uso final de energia elétrica no setor residencial do Brasil por região geográfica. **Ambiente Construído**, v. 21, p. 383-408, 2021.

ADENE. (2014). **Guia da Eficiência Energética**. Disponível em: <http://www.adene.pt/legislacao>. Acesso em 02/2014.

AELENEI, L. et al. (2012). **Design issues for net-zero energy buildings**. In: ZEMCH, Glasgow, 20 – 22 - agosto, 2012.

AELENEI, D. et al. (2013). **Design strategies for non-residential zero - energy buildings**. Lessons learned from Task 40/Annex 52 “Towards Net Zero - Energy Solar Buildings”. In proceedings of CLIMA2013 Prague.

ALMEIDA, Laiane Susan Silva *et al.* **Influência de parâmetros físicos e geométricos no desempenho termoenergético de habitações unifamiliares**. Repositório Universidade Federal de Santa Catarina UFSC - 2014.

ALMEIDA, M. A.; SCHAEFFER, R.; LA ROVERE, E. L. The potential for electricity conservation and peak load reduction in the residential sector of Brazil. **Energy**, v. 26, n. 4, p. 413-429, 2001.

ANEEL, Banco de Informações da Geração. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Brasília. Decreto**, n. 5143, 2012.

ANEEL, Banco de Informação de Geração. Big. **Agência Nacional Energia Elétrica**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm> Acesso em, v. 9, n. 02, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT **NBR 15220**: Desempenho Térmico de Edificações. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT **NBR 16401-2**: Instalações de Ar Condicionado – Sistemas Centrais e Unitários Parte 2: Parâmetros de Conforto Térmico. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT **NBR 15575**: Edificações Habitacionais - Desempenho Térmico. Rio de Janeiro, 2013.

AVILA, Antonio Victorino; LIBRELOTTO, Liziane Ilha; LOPES, Oscar Ciro. **Orçamento de obras**. Santa Catarina: Edição dos autores, 2003. 66p.

BADESCU, V.; LAASER, N.; CRUTESCU, R. Warm season cooling requirements for passive buildings in Southeastern Europe (Romania). **Energy**, v. 35, n. 8, p. 3284–3300, 2010. Acesso em: 19/11/2013.

BALLARINI, I., DE LUCA, G., PARAGAMYAN, A., PELLEGRINO, A., & CORRADO, V. (2019). Transformation of an office building into a nearly zero energy building (NZEB): Implications for thermal and visual comfort and energy performance. **Energies**, 12(5), 895.

BESANT, R.W., DUMONT, R. S. E SCHOENAU, G., 1979. The Saskatchewan conservation house: some pre-liminary performance results, **Energy and Buildings** 2 (2):163–174

BUONFIGLIO, Leda Velloso. Habitação de Interesse Social. **Mercator (Fortaleza)**, v. 17, 2018.

BRASIL. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. Portaria nº 50, de 01 de fevereiro de 2013. **Requisitos de Avaliação da Conformidade para a Eficiência Energética de Edificações (RAC)**. Rio de Janeiro, 2013.

BRASIL. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. Portaria nº 372, de 17 de setembro de 2010. **Regulamento Técnico da Qualidade – RTQ para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C)**. Rio de Janeiro, 2010.

BRASIL. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. Portaria nº 449, de 25 de novembro de 2010. **Regulamento Técnico da Qualidade – RTQ para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R)**. Rio de Janeiro, 2010.

BRASIL. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia, Inmetro. Portaria nº 42, de 24 de fevereiro de 2021. **Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (INI-C)**. Diário Oficial da União, Brasília - DF, 2021.

BRASIL. Lei nº 10.295, de 17 de outubro de 2001. **Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia e dá outras providências**. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 18 outubro 2001. Seção 1, p. 1, v. 138, n. 2001.

BRASIL. Lei nº 10.438, de 26 de abril 2002. **Dispõe sobre a expansão da oferta de energia elétrica emergencial, recomposição tarifária extraordinária, cria o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa), a Conta de Desenvolvimento Energético (CDE), dispõe sobre a universalização do serviço público de energia elétrica**. 2002.

BRASIL, Ministério de Minas e Energia. **Plano Nacional de Eficiência Energética: premissas e diretrizes básicas**. Brasília, MME / EPE, 2011. Disponível em: Acesso em: 20 jul. 2012.

BRE, Facundo; FACHINOTTI, Víctor D. A computational multi-objective optimization method to improve energy efficiency and thermal comfort in dwellings. **Energy and Buildings**, v.154, 283–294, 2017.

BPIE. (2013). **Principles for Nearly Zero Energy Buildings. Buildings Performance Institute Europe (BPIE).**

BUTTI, K., et al. (1980). **2500 Years of Solar Architecture and Technology**, Van Nostrand Reinhold Company.

CABRAL, I.; VIEIRA, R. Viabilidade econômica x viabilidade ambiental do uso de energia fotovoltaica no caso brasileiro: uma abordagem no período recente. **III Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental**. Goiânia: Ibeas - Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais, 2012. p. 1 - 12. Disponível em: <<http://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2012/X-003.pdf>>. Acesso em: 06/08/2021.

CÂNDIDO, C.; DE DEAR, R. J.; LAMBERTS, R.; BITTENCOURT, L. Air movement acceptability limits and thermal comfort in Brazil's hot humid climate zone. **Building and Environment**, v. 45, n. 1, p. 222– 229, 2010. Acesso em: 30/3/2011.

CARLO, J. C., & LAMBERTS, R. (2010). Parâmetros e métodos adotados no regulamento de etiquetagem da eficiência energética de edifícios–parte 1: método prescritivo. **Ambiente Construído**, 10(2), 7–26.

CAIXA ECONÔMICA FEDERAL. **SINAPI: Metodologias e Conceitos**. 7. ed. Brasília: Gerência Nacional Padronização e Normas Técnicas de Governo, 2019.

CHARRON, R.; ATHIENITIS, A. Design and Optimization of Net Zero Energy Solar Homes. **ASHRAE Transactions**, v. 112, n. 2, p. 285–295, 2006.

CHIARADIA, Carlos Edilson. **Aplicação do conceito de edificações de energia zero e seu impacto nas cidades por meio de parâmetros técnicos, tecnológicos e ambientais**. 2020. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, 2020.

**Conservação e Uso Racional de Energia**. Lex: Diário Oficial da União, Brasília 2001. Decreto nº 4059, 19 de dezembro de 2001. Regulamenta a lei nº 10.295, 17 de outubro de 2001 Disposições sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia.

COSTA, F. *et al* **Estudo de impacto regulatório: diretrizes gerais e estudo de caso para condicionadores de ar tipo split system no Brasil**. Projeto Kigali, Instituto Clima e Sociedade, Rio de Janeiro, mar. 2019. Disponível em: <http://kigali.org.br/publicacoes/>. Acesso em: 16 fev. 2020.

COSTA, João Francisco Walter. **Edifícios de balanço energético nulo: um estudo para escritórios em Brasília**. Dissertação de Mestrado em Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, 2018.

CRAWLEY, D. B. *et al*. EnergyPlus: a new generation building energy simulation program. In: **BUILDING SIMULATION; INTERNATIONAL IBPSA**

CONFERENCE, 6., Kyoto, 1999. **Anais Kyoto**: BS, 1999. 1 CD-ROM.

CRUZ, Alexandre Santana. **Zero Energy Building (NZEB) using the BIM approach**. Tese de Doutorado. PUC-Rio, 2020.

CURCIO D. Desempenho termo-energético de Habitações de Interesse Social produzidas pelo Programa de Arrendamento Residencial – PAR na cidade de Pelotas/RS. Dissertação de Mestrado em Arquitetura e Urbanismo, UFPel, 2011.

DA CUNHA, Filipe Alexandre Oliveira da. **Estudo de Estratégias e tecnologias de climatização para atingir Edifícios NZEB**. 2015. 188p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). – Universidade do Porto; Porto, Portugal. 2015.

DALBEM, Renata. **Desempenho de edificação residencial no Sul do Brasil sob a ótica energética e econômica: da NBR 15575 à Passive House**. Dissertação de Mestrado, PROGRAU-UFPel. Pelotas-RS, 2018.

DALBEM, Renata; DE FREITAS, Julye Moura Ramalho; DA CUNHA, Eduardo Grala. Conceito *Passivhaus* aplicado ao clima brasileiro. **Revista de Arquitetura IMED**, v. 4, n. 1, p. 26-36, 2015.

DALBEM, Renata et al. Discussão do Desempenho da Envoltória de uma Passive House Adaptada à Zona Bioclimática 2 em acordo com o RTQ-R. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 1, p. 201-222, 2017.

DEAR, R. DE; BRAGER, G.; COOPER, D. **Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference** FINAL REPORT ASHRAE RP- 884.,1997.

DEB, K. PRATAP, A., AGARWAL, S., & MEYARIVAN, T. A. M. T. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. **IEEE transactions on evolutionary computation**, v. 6, n. 2, p. 182-197, 2002.

DE LACERDA, E. G., & DE CARVALHO, A. C. P. L. F. Introdução aos algoritmos genéticos. **Sistemas inteligentes: Aplicações a recursos hídricos e ciências ambientais**, v. 1, p. 99-148, 1999.

DIDONÉ, E. L.; PEREIRA, F. O. R. Simulação computacional integrada para a consideração da luz natural na avaliação do desempenho energético de edificações. **Ambiente Construído**, v. 10, n. 4, p. 139-154, 2010.

DUTRA, L. P.; SALAMONI, I. T.; DA CUNHA, E. G. **A Aplicação De Metas nZEB a Edificação Residencial na Zona Bioclimática Brasileira 2**. 2019. Encontro Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído.

ELAIAB, F. M. **Thermal comfort investigation of multi-storey residential buildings in mediterranean climate with reference to Darnah, Libya**. 2014. 250 p. Tese (Doutorado em Arquitetura) – Universidade de Nottingham, Nottingham, 2014.

ELETROBRAS. Pesquisa de posse e hábitos de uso de equipamentos elétricos na classe residencial. Relatório Técnico, 2019. Eletrobras, Procel, 2019. Disponível em: <https://eletrobras.com/pt/AreasdeAtuacao> Acesso em: 14 de agosto de 2021.

ENTRANZE. **Total unit consumption per m2 in residential (at normal climate)**, 2008. Disponível em: <http://www.entranze.enerdata.eu/#/total-unit-consumption-per-m2-inresidential-at-normal-climate.html>

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2020: ano base 2019**. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2020>. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2020>. Acesso em: 13 de agosto de 2021.

EPE, EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2018**. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dadosabertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>>. Acesso em: 25 de agosto, 2019.

EPBD, (2010). **Directiva 2010/31/UE do Parlamento Europeu e do Conselho de 19 de Maio de 2010 relativa ao desempenho energético dos edifícios (reformulação)**. Estrasburgo, Jornal Oficial das Comunidades Europeias.

ESBENSEN, T. V.; KORSGAARD, V. Dimensioning of the solar heating system in the zero energy house in Denmark. **Solar Energy**, v. 19, n. 2, p. 195–199, 1977.

FEIST, W. Passive House Definition Independent of Climate. Disponível em: [http://www.passivhaustagung.de/Passive\\_House\\_E/passivehouse\\_definition.html](http://www.passivhaustagung.de/Passive_House_E/passivehouse_definition.html)>. Acesso em: 24/10/2011.

FERNANDES, Natâny Margraf; HADDAD, Assed Naked. Análise da teoria NET Zero Energy Building aplicada no Brasil. **Operations & Production Management**, p. 79, 2019.

FERRADOR Filho, ANTONIO Luiz; AGUIAR, Alexandre de Oliveira. **Eficiência Energética de Edifícios—panorama e perspectivas das certificações no Brasil**. 2016.

FERREIRA, Camila Carvalho; SOUZA, Henor Artur de; ASSIS, Eleonora Sad de. Discussão dos limites das propriedades térmicas dos fechamentos opacos segundo as normas de desempenho térmico brasileiras. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 1, p. 183-200, 2017.

FREITAS, J.; DALBEM, R.; CUNHA, E.; KREBS, L.; RODRIGUES, M.; VICENTE, R. **Aplicabilidade do conceito Passivhaus no contexto brasileiro**. Artigo. IV Simpósio de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, 2013.

FOSSATI, Michele et al. Building energy efficiency: An overview of the Brazilian residential labeling scheme. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 65, p. 1216-1231, 2016.

GHISI, E.; GOSCH, S.; LAMBERTS, R. Electricity end-uses in the residential sector of Brazil. **Energy Policy**, v. 35, n. 8, p. 789-202, 2007.

GILL, Z. M.; TIERNEY, M. J.; PEGG, I. M.; ALLAN, N. Low-energy dwellings: the contribution of behaviours to actual performance. **Building Research & Information**, v. 38, n. 5, p. 491–508, 2010. Acesso em: 26/9/2013.

GIVONI, B. Comfort Climate Analysis and Building Design Guidelines. **Energy and Buildings**, v. 18, n. 1, p.11-23, 1992.

GONÇALVES, J. C. S.; BODE, K. **Edifício Ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

GONÇALVES, H. & GRAÇA, J. (2004). **Conceitos Bioclimáticos para os Edifícios em Portugal**. DGGE, Lisboa.

GOLDEMBERG, José; LUCON, Oswaldo. Energia e meio ambiente no Brasil. **Estudos avançados**, v. 21, n. 59, p. 7-20, 2007.

HEMPEL, Wilca Barbosa. **A importância do ICMS ecológico para a sustentabilidade ambiental no Ceará**. Revista Eletrônica do Prodem, 2008.

HOLLADAY, M. **The History Of Superinsulated Houses In North America**. 22. set. 2010. pdf, Vancouver, British Columbia. Disponível em: <<http://homepage.mac.com/aleaman2/UBToverflow/HolladaySuperinsulationHistory22Sep10.pdf>>.

HOLLAND, J. H. **Adaptation in Natural and Artificial Systems**. The University of Michigan Press, 1975.

HUANG, Y.; NIU, J. L. Optimal building envelope design based on simulated performance: History, current status and new potentials. **Energy and Buildings**, v. 117, p. 387–398, apr. 2016.

INMETRO. **Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (INI-C)**. [S. l.: s. n.], 2021.

INMETRO. Portaria nº 309, de 06 de setembro de 2022, 2022.

ISAMU, O. **Zero Energy House**. **Refrigeration**, v. 75, n. 869, p. 200– 204, 2000. Acesso em: 6/4/2011.

KRUSE, R., BORGELT, C., BRAUNE, C., MOSTAGHIM, S., & STEINBRECHER, M. **Computational intelligence: a methodological introduction**. Springer, 2016.

KURNITSKI, Jarek et al. Cost Optimal and Nearly Zero (nZEB) Energy Performance Calculations for Residential Buildings with REHVA Definition for nZEB National Implementation. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 11, p. 3279-3288, 2011.

LAUSTSEN, J. (2008). Energy Efficiency Requirements in Building Codes, Energy Efficiency Policies for new buildings. **International Energy Agency**

LABORDA, David. "**Net Zero Buildings**" - **Aplicação do Conceito a um Edifício Existente**. 2015. Tese de Doutorado. ISPGAYA, Portugal.

LAMBERTS *et al.* **Desempenho Térmico de Edificações**. Apostila de Desempenho Térmico de Edificações, curso de graduação em Engenharia Civil da UFSC, p. 28-33, Florianópolis, 2011.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3. ed., Rio de Janeiro, RJ: Eletrobras/PROCEL/PROCEL Edifica, 2014.

LAMBERT, T., GILMAN P. e LILIENTHAL P. "**Micropower system modeling with homer.**" 2006. Disponível em: <https://www.homerenergy.com/documents/MicropowerSystemModelingWithHOMER.pdf> (acesso em maio 28, 2018).

MACHADO, J. M., NICO-RODRIGUES E. A. e ALVAREZ C. E. Desempenho Térmico x Sustentabilidade x Custo Para Sistemas De Vedação Em Habitações De Interesse Social. **Euro Elecs**, 2017.

MACHADO, R. C. P., **Ferramenta Computacional Para Geração Distribuída a Partir de Sistemas Híbridos Renováveis**, Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, 2013.

MALTA, Nayara Salera. **Habitação de interesse social na ZB8: Uma abordagem termoenergética**. Dissertação de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Espírito Santo, 2020.

MARCONDES, M. P. **Soluções Projetuais de Fachadas para Edifícios de Escritórios com Ventilação Natural em São Paulo**. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2010.

MAZZAFERRO, Leonardo; MELO, Ana Paula; LAMBERTS, Roberto. Manual de simulação computacional de edifícios com o uso do objeto Ground Domain no programa EnergyPlus. **Relatório LabEEE**, 2015.

MCLEOD, Rob; MEAD, Kym; STANDEN, Mark. **Passivhaus Primer: designer's guide: a guide for the design team and local authorities**. **BRE Trust: Watford, UK**, 2010.

MCLEOD, R. S.; HOPFE, C. J.; KWAN, A. An investigation into future performance and overheating risks in Passivhaus dwellings. **Building and Environment**, v. 70, p. 189–209, 2013. Acesso em: 19/11/2013.

MEBRATU, Desta. **Sustainability and Sustainable Development: Historical and Conceptual Review**. Environmental Impact Assessment Review, v. 18, n. 6, p. 493-520, 1998.

MENDES, N., *et al.* Uso de instrumentos computacionais para análise do desempenho térmico e energético de edificações no Brasil. **Ambiente Construído**, 5(4), 47-68, 2005.

MENKES, M. **Eficiência energética, políticas públicas e sustentabilidade**. Brasília, 2004

MEUSEL, M. D. Z. VON. **Investigação da simulação computacional de desempenho energético integrada às etapas iniciais do processo de projeto**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2016.

MICHALEWICZ, Z. Genetic algorithms + data structures = evolution programs. 3 ed. Springer, Berlin, 1996.

MORENO, Ana Cecilia Rodrigues. **Minha Casa Minha Vida: análise de desempenho térmico pela NBR 15.220-3, NBR 15.575, Selo Casa Azul e RTQ-R. 2013**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais.

MORISHITA C. Impacto do Regulamento para Eficiência Energética em Edificações no Consumo de Energia Elétrica do Setor Residencial Brasileiro. **Dissertação de Mestrado**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil Florianópolis, SC, Brasil: Universidade Federal De Santa Catarina, 2011.

MLAKAR, J.; ŠTRANCAR, J. Overheating in residential passive house: Solution strategies revealed and confirmed through data analysis and simulations. Energy and Buildings, v. 43, n. 6, p. 1443–1451, 2011. Acesso em: 1/10/2013.

NORMA, A. *Passivhaus* em Climas Quentes da Europa. **Directrizes de projecto para casas confortáveis de baixo consumo energético. Parte**, v. 2, 2007.

PACHECO, Marco Aurélio Cavalcanti *et al.* Algoritmos genéticos: princípios e aplicações. **ICA: Laboratório de Inteligência Computacional Aplicada. Departamento de Engenharia Elétrica. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro**, 1999.

PACHECO, M.; LAMBERTS, R. Assessment of technical and economical viability for large-scale conversion of single-family residential buildings into zero energy buildings in Brazil: **Climatic and cultural considerations**. Energy Policy, v. 63, p. 716–725, 2013. Acesso em: 7/11/2013.

PACHECO, Miguel Teixeira Gomes. **Ventilação Natural e Climatização**

**Artificial: Crítica ao modelo Super-isolado para residência de energia zero em Belém e Curitiba.** 2013. Tese de Doutorado. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

PAIM, M.P, MARINOSKI, D.L. E GUTHS, S. Simulação termoenergética e análise econômica do uso de telhados frios em uma residência unifamiliar. In: CIES2020: As Energias Renováveis na Transição Energética: Livro de Comunicações do XVII **Congresso Ibérico e XIII Congresso Ibero-americano de Energia Solar**. Helder Gonçalves, Manuel Romero (Ed.). Lisboa, Portugal: LNEG, 3-5 Novembro, 2020, p. 1107-1114

PARKER, D. Very low energy homes in the United States: Perspectives on performance from measured data. **Energy and Buildings**, v. 41, n. 5, p. 512–520, 2009. Acesso em: 19/9/2011.

PASSIPEDIA. **Passive Houses in tropical climates** - passipedia.org. Disponível em: [http://passipedia.passiv.de/passipedia\\_en/basics/passive\\_houses\\_in\\_different\\_climates/passive\\_house\\_in\\_tropical\\_climates](http://passipedia.passiv.de/passipedia_en/basics/passive_houses_in_different_climates/passive_house_in_tropical_climates)>. Acesso em: 19/9/2013.

Passive House Institute. **Information on passive houses**, 2007. Disponível em: <<https://passivhaustagung.de/en/>>. Acesso em: 26 agosto, 2019.

PASSIVE ON. Technical Guidelines for Passive House. Disponível em: <http://www.passiveon.org/CD/1.%20Technical%20Guidelines/Part%202/Passivhaus%20UK/Part%202%20-%20UK%20Passivhaus%20in%20Detail.pdf>>. Acesso em: 6/4/2011.

PARK, J. S.; KIM, H. J. A field study of occupant behavior and energy consumption in apartments with mechanical ventilation. **Energy and Buildings**, v. 50, p. 19–25, 2012.

PEREIRA MG, CAMACHO CF, FREITAS MAV, SILVA NF. The renewable energy market in Brazil: current status and potential. **Renew Sustain Energy Rev** 2012; 16:3786–802.

PÉREZ-LOMBARD, Luis, et al. A review of benchmarking, rating and labelling concepts within the framework of building energy certification schemes. **Energy and Buildings**, 2009, 41.3: 272-278.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. (Orgs.). **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Edição revisada e atualizada. Rio de Janeiro: CEPEL-CRESESB, mar. 2014. Disponível em: [http://www.ecovolts.net.br/downloads/Manual\\_de\\_Engenharia\\_FV\\_2014.pdf](http://www.ecovolts.net.br/downloads/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf). Acesso em: 19 de agosto de 2021.

PLESS, Shanti; TORCELLINI, Paul. Net-zero energy buildings: **A classification system based on renewable energy supply options**. National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States), 2010. REVISTA ÁREA. Disponível em

<<http://www.revistaarea.com.br/wpcontent/themes/area/images/edicao5/Bioarquitetura.pdf>> Acesso em 08/12/2011.

ROTTA, R. **Desempenho Térmico de Edificações Multifamiliares de Interesse Social em Conjuntos Habitacionais na Cidade De Santa Maria – RS**. Dissertação de Mestrado de Engenharia Civil, UFSM, 2009.

RORIZ, M. Uma Proposta de Revisão do Zoneamento Bioclimático Brasileiro. ANTAC – **Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**. Grupo de Trabalho sobre Conforto e Eficiência Energética de Edificações, 2012. RUAS, A. C., **Sistematização da avaliação de conforto térmico em ambientes edificadas e sua aplicação num software**. Tese de doutorado Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Campinas, São Paulo, 2002.

RUEGG, R. T. e MARSHALL, H. E. **Building Economics Theory and Practice**. New York: Springer Science + Business Media, LCC, 1990.

SANTO, H. M. I. do E. (2010). **Procedimentos para uma certificação da construção sustentável**. Faculdade de Ciências e Tecnologia. Acesso em: <http://run.unl.pt/handle/10362/4045>

SANTOS, H. R. R.; LEAL, V. M. S. Energy vs. ventilation rate in buildings: A comprehensive scenario-based assessment in the European context. **Energy and Buildings**, v. 54, p. 111–121, 2012. Acesso em: 30/9/2013.

SAWIN, J.; RUTOVITZ, J.; SVERRISSON, F. **Advancing the global renewable energy transition**. Tech. rep, 2018.

SCHNIEDERS, J. Passive Houses in South West Europe — **A quantitative investigation of some passive and active space 271 conditioning techniques for highly energy efficient dwellings in the South West European region, 2009**. Darmstadt: Darmstadt. Disponível em: <[http://www.passivhaustagung.de/Passive\\_House\\_E/PH\\_MedClim.html](http://www.passivhaustagung.de/Passive_House_E/PH_MedClim.html)>.

SHAYANI, Rafael Amaral; OLIVEIRA, MAG de; CAMARGO, IM de T. Comparação do custo entre energia solar fotovoltaica e fontes convencionais. In: **Congresso Brasileiro de Planejamento Energético (V CBPE)**. Brasília. 2006. p. 60.

SHURCLIFF, W. A. Superinsulated Houses. **Annual Review of Energy**, v. 11, p. 1–24, 1986. Acesso em: 19/9/2011.

SCHRIBER, T.J., **Simulation Using GPSS**, Wiley, NY, 1974.

SILVA, S. B. **Dimensionamento Ótimo de Sistemas Híbridos, com Geração Fotovoltaica e Célula a Combustível, para Atendimento a Comunidades Isoladas na Amazônia**. Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 132p. 2010.

SILVA, T. G. N. **Proposta e Avaliação de um Método para Gerar a População Inicial de Algoritmos Genéticos Multiobjetivos**. Dissertação de Mestrado Acadêmico em Ciência da Computação do Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual do Ceará. 2015.

SIQUEIRA, M. L.; CORDEIRO JUNIOR, H. H.; CASTELAR, I. **A demanda por energia elétrica no Nordeste brasileiro após racionamento de 2001-2002: previsões de longo prazo**. Pesquisa e Planejamento Econômico, v. 36, n. 1, p. 137-178, 2006.

SOARES, Maicon Motta. **Avaliação dos Parâmetros de Desempenho Térmico da NBR 15.575/2013: Habitações de Interesse Social na Zona Bioclimática 2**. 2014. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pelotas.

SORGATO MJ, MELO AP, MARINOSKI DL, LAMBERTS R. Análise do procedimento de simulação da NBR 15575 para avaliação do desempenho térmico de edificações residenciais. **Ambiente Construído** 2014;14:83–101.

SOUZA, A. J. T. S. F., **Análise de Viabilidade do Sistema Híbrido Biogás-Solar na Geração de Energia e seus Impactos nas Emissões de Gases**. Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, 2019.

SOUSA, J. Energy simulation software for buildings: review and comparison. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON INFORMATION TECHNOLOGY FOR ENERGY APPLICATIONS-IT4ENERGY, LISABON, 2012. **Anais**[S.l.: s.n.], 2012.

SZABÓ, Tamás; BERKESI, Ottó; DÉKÁNY, Imre. **DRIFT study of deuterium-exchanged graphite oxide**. Carbon, v. 43, n. 15, p. 3186-3189, 2005.

OLIVEIRA, A.; SILVEIRA, G. B.; BRAGA, J. M. Diversidade sazonal do consumo de energia elétrica no Brasil. **Pesquisa Planejamento Econômico**, v. 30, n. 2, p. 211-257, ago. 2000.

TICONA, Waldo Gonzalo Cancino; DELBÉM, Alexandre Claudio Botazzo. **Algoritmos evolutivos para otimização multiobjetivo**. Relatório técnico. Notas Didáticas do ICMC-USP, v. 76, 2008.

TUBELO, R.; RODRIGUES, L. T.; GILLOTT, M. A comparative study of the brazilian energy labelling system and the Passivhaus standard for housing. **Buildings**, v. 4, n. 2, p. 207-221, 2014.

UNITED STATES GREEN BUILDING COUNCIL. **LEED Green Building Rating System For New Construction & Major Renovations Version 2.2 - For Public Use and Display**. Disponível em: <[www.usgbc.org](http://www.usgbc.org)>. Acesso em: 25 ago. 2016

VEIGA, A. S. C., **Metodologias para a classificação de edifícios de balanço de energia nulo (NZEB) aplicadas a um edifício residencial**. 2015. Tese de

Doutorado.

VETTORAZZI, E. **Contribuições das estratégias do conceito Passive House para edificações energeticamente mais eficientes na Região Sul-Brasileira.** Tese de Doutorado em Arquitetura, UFRGS, Porto Alegre, 2019.

VOSS, K., et al. **Load Matching and Grid Interaction of Net Zero Energy Buildings, in: EuroSun Conference, Graz, Austria, 2011.**

WASSOUF, M. Da casa passiva à norma Passivhaus: A Arquitetura Passiva em climas quentes. **Barcelona: Anman Gràfiques del Vallès, 2014.**

## APÊNDICE 1 - Cálculos Preliminares para as Simulações

### Caso 1

	Sistema Construtivo Parede Externa	Composição Parede <sub>ext</sub>	Sistema Construtivo Cobertura	Composição da Cobertura
Caso 1	Steel Frame $C_T = 56,68 \text{ kJ/m}^2\text{K}$	Placa cimentícia 10mm	Telha fibrocimento $C_T = 25 \text{ kJ/m}^2\text{K}$	Telha de fibrocimento 0,7 cm
		<b>EPS</b>		Camada de ar
		Placa OSB 8mm		<b>EPS</b>
		Perfil metálico 0,95mm		Forro de madeira 1 cm
		Placa cimentícia 6mm		

Para variar a Transmitância Térmica ( $U - \text{W/m}^2\text{K}$ ) da Parede Externa e da Cobertura foi inserida 1 camada de isolante (EPS) em cada uma delas, de forma a variar a  $U$  de  $0,5 \text{ W/m}^2\text{K}$  à  $2,5 \text{ W/m}^2\text{K}$  para a parede externa e de  $0,5 \text{ W/m}^2\text{K}$  à  $2 \text{ W/m}^2\text{K}$  para a cobertura.

- Parede Externa:

$$U = \frac{1}{R_{total}}$$

$$R_{total} = R_{se} + r_{total} + R_{si}$$

$$U = \frac{1}{R_{total}}$$

$$0,5 = \frac{1}{R_{total}}$$

$$R_{total} = 2$$

$$2 = 0,13 + r_{total} + 0,04$$

$$r_{total} = 1,83$$

$$r_{total} = \sum R$$

$$r_{total} = r_{placa\ cimentícia} + r_{EPS} + r_{OSB} + r_{perfil\ metálico} + r_{placa\ cimentícia}$$

$$1,83 = \frac{e}{\lambda_{placa\ cimentícia}} + \frac{e}{\lambda_{EPS}} + \frac{e}{\lambda_{OSB}} + \frac{e}{\lambda_{perfil\ metálico}} + \frac{e}{\lambda_{placa\ cimentícia}}$$

$$1,83 = \frac{0,01}{0,95}_{placa\ cimentícia} + \frac{e}{0,03}_{EPS} + \frac{0,008}{0,15}_{OSB} + \frac{0,00095}{55}_{perfil\ metálico} + \frac{0,006}{0,95}_{placa\ cimentícia}$$

$$1,83 = \frac{e}{0,03_{EPS}} + 0,0702$$

$$e_{EPS} = 0,0528\ m\ (U = 0,5\ W/m^2K)$$

$$U = \frac{1}{R_{total}}$$

$$2,5 = \frac{1}{R_{total}}$$

$$R_{total} = 0,4$$

$$0,4 = 0,13 + r_{total} + 0,04$$

$$r_{total} = 0,23$$

$$r_{total} = \sum R$$

$$r_{total} = r_{placa\ cimentícia} + r_{EPS} + r_{OSB} + r_{perfil\ metálico} + r_{placa\ cimentícia}$$

$$0,23 = \frac{e}{\lambda_{placa\ cimentícia}} + \frac{e}{\lambda_{EPS}} + \frac{e}{\lambda_{OSB}} + \frac{e}{\lambda_{perfil\ metálico}} + \frac{e}{\lambda_{placa\ cimentícia}}$$

$$0,23 = \frac{0,010}{0,95}_{placa\ cimentícia} + \frac{e}{0,03}_{EPS} + \frac{0,008}{0,15}_{OSB} + \frac{0,00095}{55}_{perfil\ metálico} + \frac{0,006}{0,95}_{placa\ cimentícia}$$

$$0,23 = \frac{e}{0,03_{EPS}} + 0,0702$$

$$e_{EPS} = 0,0048 \text{ m (U = 2,5 W/m}^2\text{K)}$$

- Cobertura:

$$U = \frac{1}{R_{total}}$$

$$R_{total} = R_{se} + r_{total} + R_{si}$$

$$U = \frac{1}{R_{total}}$$

$$0,5 = \frac{1}{R_{total}}$$

$$R_{total} = 2$$

$$2 = 0,17 + r_{total} + 0,04 \text{ (Fluxo descendente, conforme orientação do RTQ-C)}$$

$$r_{total} = 1,79$$

$$r_{total} = \sum R$$

$$r_{total} = r_{forro\ madeira} + r_{EPS} + r_{ar} + r_{telha\ fibro-cimento}$$

$$1,79 = \frac{e}{\lambda}_{forro\ madeira} + \frac{e}{\lambda}_{EPS} + 0,21 + \frac{e}{\lambda}_{telha\ fibro\ cimento}$$

$$1,79 = \frac{0,01}{0,15}_{forro\ madeira} + \frac{e}{0,03}_{EPS} + 0,21 + \frac{0,007}{0,65}_{telha\ fibro\ cimento}$$

$$1,79 = \frac{e}{0,03}_{EPS} + 0,287$$

$$e_{EPS} = 0,045 \text{ m (U = 0,5 W/m}^2\text{K)}$$

$$U = \frac{1}{R_{total}}$$

$$2 = \frac{1}{R_{total}}$$

$$R_{total} = 0,5$$

$$0,5 = 0,17 + r_{total} + 0,04$$

$$r_{total} = 0,29$$

$$r_{total} = \sum R$$

$$r_{total} = r_{forro\ madeira} + r_{EPS} + r_{ar} + r_{telha\ fibro-cimento}$$

$$0,29 = \frac{e}{\lambda_{forro\ madeira}} + \frac{e}{\lambda_{EPS}} + 0,21 + \frac{e}{\lambda_{telha\ fibro\ cimento}}$$

$$0,29 = \frac{0,01}{0,15}_{forro\ madeira} + \frac{e}{0,03}_{EPS} + 0,21 + \frac{0,007}{0,65}_{telha\ fibro\ cimento}$$

$$0,29 = \frac{e}{0,03_{EPS}} + 0,287$$

$$e_{EPS} = 0,00009\ m \ (U = 2,0\ W/m^2K)$$

## Caso 2

	Sistema Construtivo Parede Externa	Composição Parede <sub>ext</sub>	Sistema Construtivo Cobertura	Composição da Cobertura
<b>Caso 2</b>	Concreto maciço $C_T = 143 \text{ kJ/m}^2\text{K}$	Concreto maciço 3,25 cm	Telha cerâmica $C_T = 194,4 \text{ kJ/m}^2\text{K}$	Telha cerâmica 12,5 mm
		EPS		Camada de ar
		Concreto maciço 3,25 cm		EPS
				Laje 8 cm

- Parede Externa:

$$U = \frac{1}{R_{total}}$$

$$R_{total} = R_{se} + r_{total} + R_{si}$$

$$U = \frac{1}{R_{total}}$$

$$0,5 = \frac{1}{R_{total}}$$

$$R_{total} = 2$$

$$2 = 0,13 + r_{total} + 0,04$$

$$r_{total} = 1,83$$

$$r_{total} = \sum R$$

$$r_{total} = r_{EPS} + r_{conc}$$

$$1,83 = \frac{e}{0,03}_{EPS} + \frac{0,065}{1,75}_{conc}$$

$$e_{EPS} = 0,05378 \text{ m } (U = 0,5 \text{ W/m}^2\text{K})$$

$$U = \frac{1}{R_{total}}$$

$$2,5 = \frac{1}{R_{total}}$$

$$R_{total} = 0,4$$

$$0,4 = 0,13 + r_{total} + 0,04$$

$$r_{total} = 0,23$$

$$r_{total} = \sum R$$

$$r_{total} = r_{EPS} + r_{conc}$$

$$0,23 = \frac{e}{0,03}_{EPS} + \frac{0,065}{1,75}_{conc}$$

$$e_{EPS} = 0,005785 \text{ m (U = 2,5 W/m}^2\text{K)}$$

- Cobertura:

$$U = \frac{1}{R_{total}}$$

$$R_{total} = R_{se} + r_{total} + R_{si}$$

$$U = \frac{1}{R_{total}}$$

$$0,5 = \frac{1}{R_{total}}$$

$$R_{total} = 2$$

$$2 = 0,17 + r_{total} + 0,04$$

$$r_{total} = 1,79$$

$$r_{total} = \sum R$$

$$r_{total} = r_{laje} + r_{EPS} + r_{ar} + r_{telha \text{ cerâmica}}$$

$$1,79 = \frac{e}{\lambda_{laje}} + \frac{e}{\lambda_{EPS}} + 0,21 + \frac{e}{\lambda_{telha\ cerâmica}}$$

$$1,79 = \frac{0,08}{1,75}_{laje} + \frac{e}{0,03}_{EPS} + 0,21 + \frac{0,0125}{1}_{telha\ cerâmica}$$

$$1,79 = \frac{e}{0,03_{EPS}} + 0,27$$

$$e_{EPS} = 0,045\ m \ (U = 0,5\ W/m^2K)$$

$$U = \frac{1}{R_{total}}$$

$$R_{total} = R_{se} + r_{total} + R_{si}$$

$$U = \frac{1}{R_{total}}$$

$$2,0 = \frac{1}{R_{total}}$$

$$R_{total} = 0,5$$

$$0,5 = 0,17 + r_{total} + 0,04$$

$$r_{total} = 0,29$$

$$r_{total} = \sum R$$

$$r_{total} = r_{laje} + r_{EPS} + r_{ar} + r_{telha\ cerâmica}$$

$$0,29 = \frac{e}{\lambda_{laje}} + \frac{e}{\lambda_{EPS}} + 0,21 + \frac{e}{\lambda_{telha\ cerâmica}}$$

$$0,29 = \frac{0,08}{1,75}_{laje} + \frac{e}{0,03}_{EPS} + 0,21 + \frac{0,0125}{1}_{telha\ cerâmica}$$

$$0,29 = \frac{e}{0,03_{EPS}} + 0,27$$

$$e_{EPS} = 0,0006 \text{ m } (U = 2,0 \text{ W/m}^2\text{K})$$

### Caso 3

	Sistema Construtivo Parede Externa	Composição Parede <sub>ext</sub>	Sistema Construtivo Cobertura	Composição da Cobertura
Caso 3	Concreto maciço $C_T = 240 \text{ kJ/m}^2\text{K}$	Concreto maciço 5 cm	Telha cerâmica $C_T = 194,4 \text{ kJ/m}^2\text{K}$	Telha cerâmica 12,5 mm
		EPS		Camada de ar
		Concreto maciço 5 cm		EPS
				Laje 8 cm

- Parede Externa:

$$U = \frac{1}{R_{total}}$$

$$R_{total} = R_{se} + r_{total} + R_{si}$$

$$U = \frac{1}{R_{total}}$$

$$0,5 = \frac{1}{R_{total}}$$

$$R_{total} = 2$$

$$2 = 0,13 + r_{total} + 0,04$$

$$r_{total} = 1,83$$

$$r_{total} = \sum R$$

$$r_{total} = r_{EPS} + r_{conc}$$

$$1,83 = \frac{e}{0,03_{EPS}} + \frac{0,10}{1,75_{conc}}$$

$$e_{EPS} = 0,0532 \text{ m (U = 0,5 W/m}^2\text{K)}$$

$$U = \frac{1}{R_{total}}$$

$$2,5 = \frac{1}{R_{total}}$$

$$R_{total} = 0,4$$

$$0,4 = 0,13 + r_{total} + 0,04$$

$$r_{total} = 0,23$$

$$r_{total} = \sum R$$

$$r_{total} = r_{EPS} + r_{conc}$$

$$0,23 = \frac{e}{0,03_{EPS}} + \frac{0,10}{1,75_{conc}}$$

$$e_{EPS} = 0,0052 \text{ m (U = 2,5 W/m}^2\text{K)}$$

- Cobertura:

$$U = \frac{1}{R_{total}}$$

$$R_{total} = R_{se} + r_{total} + R_{si}$$

$$U = \frac{1}{R_{total}}$$

$$0,5 = \frac{1}{R_{total}}$$

$$R_{total} = 2$$

$$2 = 0,17 + r_{total} + 0,04$$

$$r_{total} = 1,79$$

$$r_{total} = \sum R$$

$$r_{total} = r_{laje} + r_{EPS} + r_{ar} + r_{telha\ cerâmica}$$

$$1,79 = \frac{e}{\lambda_{laje}} + \frac{e}{\lambda_{EPS}} + 0,21 + \frac{e}{\lambda_{telha\ cerâmica}}$$

$$1,79 = \frac{0,08}{1,75}_{laje} + \frac{e}{0,03}_{EPS} + 0,21 + \frac{0,0125}{1}_{telha\ cerâmica}$$

$$1,79 = \frac{e}{0,03_{EPS}} + 0,27$$

$$e_{EPS} = 0,045\ m \ (U = 0,5\ W/m^2K)$$

$$U = \frac{1}{R_{total}}$$

$$R_{total} = R_{se} + r_{total} + R_{si}$$

$$U = \frac{1}{R_{total}}$$

$$2,0 = \frac{1}{R_{total}}$$

$$R_{total} = 0,5$$

$$0,5 = 0,17 + r_{total} + 0,04$$

$$r_{total} = 0,29$$

$$r_{total} = \sum R$$

$$r_{total} = r_{laje} + r_{EPS} + r_{ar} + r_{telha\ cerâmica}$$

$$0,29 = \frac{e}{\lambda_{laje}} + \frac{e}{\lambda_{EPS}} + 0,21 + \frac{e}{\lambda_{telha\ cerâmica}}$$

$$0,29 = \frac{0,08}{1,75}_{laje} + \frac{e}{0,03}_{EPS} + 0,21 + \frac{0,0125}{1}_{telha\ cerâmica}$$

$$0,29 = \frac{e}{0,03}_{EPS} + 0,27$$

$$e_{EPS} = 0,0006\ m\ (U = 2,0\ W/m^2K)$$

#### Caso 4

	Sistema Construtivo Parede Externa	Composição Parede ext	Sistema Construtivo Cobertura	Composição da Cobertura
<b>Caso 4</b>	Concreto maciço $C_T = 330\ kJ/m^2K$	Concreto maciço 7,5 cm	Telha cerâmica $C_T = 282,4\ kJ/m^2K$	Telha cerâmica 12,5 mm
		EPS		Camada de ar
		Concreto maciço 7,5 cm		EPS
				Laje 12 cm

- Parede Externa:

$$U = \frac{1}{R_{total}}$$

$$R_{total} = R_{se} + r_{total} + R_{si}$$

$$U = \frac{1}{R_{total}}$$

$$0,5 = \frac{1}{R_{total}}$$

$$R_{total} = 2$$

$$2 = 0,13 + r_{total} + 0,04$$

$$r_{total} = 1,83$$

$$r_{total} = \sum R$$

$$r_{total} = r_{EPS} + r_{conc}$$

$$1,83 = \frac{e}{0,03_{EPS}} + \frac{0,15}{1,75_{conc}}$$

$$e_{EPS} = 0,0523 \text{ m (U = 0,5 W/m}^2\text{K)}$$

$$U = \frac{1}{R_{total}}$$

$$2,5 = \frac{1}{R_{total}}$$

$$R_{total} = 0,4$$

$$0,4 = 0,13 + r_{total} + 0,04$$

$$r_{total} = 0,23$$

$$r_{total} = \sum R$$

$$r_{total} = r_{EPS} + r_{conc}$$

$$0,23 = \frac{e}{0,03_{EPS}} + \frac{0,15}{1,75_{conc}}$$

$$e_{EPS} = 0,00433 \text{ m (U = 2,5 W/m}^2\text{K)}$$

- Cobertura:

$$U = \frac{1}{R_{total}}$$

$$R_{total} = R_{se} + r_{total} + R_{si}$$

$$U = \frac{1}{R_{total}}$$

$$0,5 = \frac{1}{R_{total}}$$

$$R_{total} = 2$$

$$2 = 0,17 + r_{total} + 0,04$$

$$r_{total} = 1,79$$

$$r_{total} = \sum R$$

$$r_{total} = r_{laje} + r_{EPS} + r_{ar} + r_{telha\ cerâmica}$$

$$1,79 = \frac{e}{\lambda_{laje}} + \frac{e}{\lambda_{EPS}} + 0,21 + \frac{e}{\lambda_{telha\ cerâmica}}$$

$$1,79 = \frac{0,12}{1,75}_{laje} + \frac{e}{0,03}_{EPS} + 0,21 + \frac{0,0125}{1}_{telha\ cerâmica}$$

$$1,79 = \frac{e}{0,03}_{EPS} + 0,29$$

$$e_{EPS} = 0,045\ m\ (U = 0,5\ W/m^2K)$$

$$U = \frac{1}{R_{total}}$$

$$R_{total} = R_{se} + r_{total} + R_{si}$$

$$U = \frac{1}{R_{total}}$$

$$2,0 = \frac{1}{R_{total}}$$

$$R_{total} = 0,5$$

$$0,5 = 0,17 + r_{total} + 0,04$$

$$r_{total} = 0,29$$

$$r_{total} = \sum R$$

$$r_{total} = r_{laje} + r_{EPS} + r_{ar} + r_{telha\ cerâmica}$$

$$0,29 = \frac{e}{\lambda_{laje}} + \frac{e}{\lambda_{EPS}} + 0,21 + \frac{e}{\lambda_{telha\ cerâmica}}$$

$$0,29 = \frac{0,12}{1,75}_{laje} + \frac{e}{0,03}_{EPS} + 0,21 + \frac{0,0125}{1}_{telha\ cerâmica}$$

$$e_{EPS} = 0 \text{ m (U = 2,0 W/m}^2\text{K)}$$

### Caso 5

	Sistema Construtivo Parede Externa	Composição Parede <sub>ext</sub>	Sistema Construtivo Cobertura	Composição da Cobertura
<b>Caso 5</b>	Concreto maciço $C_T = 440 \text{ kJ/m}^2\text{K}$	Concreto maciço 10 cm	Telha cerâmica $C_T = 304,4 \text{ kJ/m}^2\text{K}$	Telha cerâmica 12,5 mm
		EPS		Camada de ar
		Concreto maciço 10 cm		EPS
				Laje 13 cm

- Parede Externa:

$$U = \frac{1}{R_{total}}$$

$$R_{total} = R_{se} + r_{total} + R_{si}$$

$$U = \frac{1}{R_{total}}$$

$$0,5 = \frac{1}{R_{total}}$$

$$R_{total} = 2$$

$$2 = 0,13 + r_{total} + 0,04$$

$$r_{total} = 1,83$$

$$r_{total} = \sum R$$

$$r_{total} = r_{EPS} + r_{conc}$$

$$1,83 = \frac{e}{0,03}_{EPS} + \frac{0,20}{1,75}_{conc}$$

$$e_{EPS} = 0,0515 \text{ m (U = 0,5 W/m}^2\text{K)}$$

$$U = \frac{1}{R_{total}}$$

$$2,5 = \frac{1}{R_{total}}$$

$$R_{total} = 0,4$$

$$0,4 = 0,13 + r_{total} + 0,04$$

$$r_{total} = 0,23$$

$$r_{total} = \sum R$$

$$r_{total} = r_{EPS} + r_{conc}$$

$$0,23 = \frac{e}{0,03_{EPS}} + \frac{0,20}{1,75_{conc}}$$

$$e_{EPS} = 0,0035 \text{ m (U = 2,5 W/m}^2\text{K)}$$

- Cobertura:

$$U = \frac{1}{R_{total}}$$

$$R_{total} = R_{se} + r_{total} + R_{si}$$

$$U = \frac{1}{R_{total}}$$

$$0,5 = \frac{1}{R_{total}}$$

$$R_{total} = 2$$

$$2 = 0,17 + r_{total} + 0,04$$

$$r_{total} = 1,79$$

$$r_{total} = \sum R$$

$$r_{total} = r_{laje} + r_{EPS} + r_{ar} + r_{telha\ cerâmica}$$

$$1,79 = \frac{e}{\lambda_{laje}} + \frac{e}{\lambda_{EPS}} + 0,21 + \frac{e}{\lambda_{telha\ cerâmica}}$$

$$1,79 = \frac{0,13}{1,75} + \frac{e}{0,03} + 0,21 + \frac{0,0125}{1}$$

$$1,79 = \frac{e}{0,03_{EPS}} + 0,297$$

$$e_{EPS} = 0,0448 \text{ m (U = 0,5 W/m}^2\text{K)}$$

$$U = \frac{1}{R_{total}}$$

$$R_{total} = R_{se} + r_{total} + R_{si}$$

$$U = \frac{1}{R_{total}}$$

$$2,0 = \frac{1}{R_{total}}$$

$$R_{total} = 0,5$$

$$0,5 = 0,17 + r_{total} + 0,04$$

$$r_{total} = 0,29$$

$$r_{total} = \sum R$$

$$r_{total} = r_{laje} + r_{EPS} + r_{ar} + r_{telha\ cerâmica}$$

$$0,29 = \frac{e}{\lambda_{laje}} + \frac{e}{\lambda_{EPS}} + 0,21 + \frac{e}{\lambda_{telha\ cerâmica}}$$

$$0,29 = \frac{0,13}{1,75} \text{ laje} + \frac{e}{0,03} \text{ EPS} + 0,21 + \frac{0,0125}{1} \text{ telha cerâmica}$$

$$e_{EPS} = 0 \text{ m (U = 2,0 W/m}^2\text{K)}$$