

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Selton Fernandes de Sousa Lima

**DECISÃO MULTICRITÉRIO APLICADA À OTIMIZAÇÃO DA
ENVOLTÓRIA DE EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS DE ENERGIA
ZERO NO RIO GRANDE DO SUL**

Santa Maria, RS
2021

Selton Fernandes de Sousa Lima

**DECISÃO MULTICRITÉRIO APLICADA À OTIMIZAÇÃO DA ENVOLTÓRIA DE
EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS DE ENERGIA ZERO NO RIO GRANDE DO SUL**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração de Construção Civil e Preservação Ambiental da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

Orientador: Prof. Dr. Joaquim Cesar Pizzutti dos Santos

Santa Maria, RS
2021

Lima, Selton
Decisão Multicritério Aplicada à Otimização da
Envoltória de Edificações Residenciais de Energia Zero no
Rio Grande do Sul / Selton Lima.- 2021.
92 p.; 30 cm

Orientador: Joaquim Cesar Pizzutti dos Santos
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, RS, 2021

1. Zero Energy Buildings 2. Eficiência Energética 3.
Energia Solar Fotovoltaica 4. Custo Inicial 5. Conforto
Térmico I. Pizzutti dos Santos, Joaquim Cesar II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

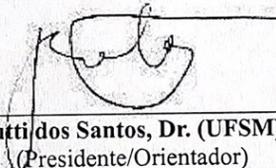
Declaro, SELTON LIMA, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Dissertação) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

Selton Fernandes de Sousa Lima

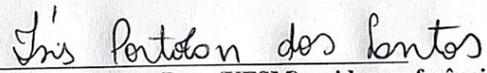
**DECISÃO MULTICRITÉRIO APLICADA À OTIMIZAÇÃO DA ENVOLTÓRIA DE
EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS DE ENERGIA ZERO NO RIO GRANDE DO SUL**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração de Construção Civil e Preservação Ambiental da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

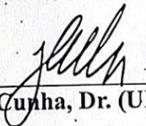
Aprovado em 09 de agosto de 2021:



Joaquim Cesar Pizzutti dos Santos, Dr. (UFSM) - videoconferência
(Presidente/Orientador)



Ísis Portolan dos Santos, Dra. (UFSM) - videoconferência



Eduardo Grala da Cunha, Dr. (UFPEL) - videoconferência

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pelas pessoas que colocou no meu caminho e pelas conquistas que me ajudou a alcançar.

Aos meus pais, Adão e Maria Aparecida, agradeço o apoio nos momentos de dificuldade.

Aos meus irmãos, Herikson e Kananda, agradeço pelos momentos de alegria que trouxeram, tornando essa tarefa mais fácil.

À minha noiva, Liliane, agradeço por estar ao meu lado sempre, trazendo leveza e amor até nos momentos mais difíceis.

Aos meus sogros, Luís Alberto e Eliséte, agradeço por terem me acolhido como filho.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Joaquim, que acreditou em mim e me deu condições para realizar esse trabalho.

À Prof^a Dra. Ísis, por todos os conhecimentos compartilhados nas aulas, que foram fundamentais para a construção desse trabalho.

Ao Prof. Dr. Eduardo, pela disponibilidade de compor a banca examinadora desse trabalho.

À Universidade Federal de Santa Maria, por ter sido uma segunda casa para mim, proporcionando grandes contribuições para a minha vida pessoal, acadêmica e profissional.

Aos meus amigos Bruna, Eduardo e Tobias, que me acompanharam nesse desafio, meu muito obrigado!

"Não podemos resolver nossos problemas com o mesmo pensamento que tínhamos quando os criamos". (Albert Einstein).

RESUMO

DECISÃO MULTICRITÉRIO APLICADA À OTIMIZAÇÃO DA ENVOLTÓRIA DE EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS DE ENERGIA ZERO NO RIO GRANDE DO SUL

AUTOR: Selton Fernandes de Sousa Lima

ORIENTADOR: Joaquim Cesar Pizzutti dos Santos

O projeto e construção de Edifícios de Energia Zero (*Zero Energy Buildings*) pode auxiliar na redução do consumo energético mundial e, conseqüentemente, na minimização de impactos ambientais. Para projetar uma edificação energeticamente eficiente é possível utilizar ferramentas computacionais de otimização, que irão simular conjuntos de variáveis para encontrar as melhores soluções. Diante de uma variedade de possíveis soluções, destaca-se a necessidade de utilizar uma metodologia de decisão multicritério para ordená-las. O presente estudo tem como objetivo determinar a configuração de envoltória mais adequada para a obtenção de edificações residenciais de energia zero em condições climáticas representativas do Rio Grande do Sul. Dessa forma, foi utilizado o *software* BEopt, versão 2.8, para a obtenção dos casos ótimos do ponto de vista do consumo energético e do custo da envoltória para as Zonas Bioclimáticas 1, 2 e 3, no Rio Grande do Sul. Então, foram determinados os sistemas fotovoltaicos necessários para compensar o consumo de energia elétrica de cada caso ótimo. A partir disso, foram determinados os custos iniciais dos casos ótimos, considerando o custo da envoltória, o custo do sistema fotovoltaico e os demais custos para a construção da edificação, obtidos por orçamentação. Além disso, foram avaliados os índices de conforto térmico adaptativo dos casos ótimos. Por fim, foram considerados quatro cenários para avaliar os casos ótimos a partir do método de decisão multicritério ELECTRE III. Cada cenário considerou um peso diferente para cada um dos critérios de avaliação (consumo de ar-condicionado, custo inicial e índice de conforto térmico), para determinar a melhor solução. Em todos os cenários, verificou-se que as melhores configurações de envoltória para as Zonas Bioclimáticas 1, 2 e 3 apresentam a fachada principal ao Sul, paredes de bloco cerâmico (14 cm) e argamassa interna e externa (2,5 cm), barreira radiante de 2 mm na cobertura, percentual de elementos transparentes de 16% e distribuição desses elementos de 30% nas fachadas frontal e posterior e 20% nas fachadas laterais. Para a ZB1, as paredes externas na cor preta e a cobertura em cores escuras, e as janelas com vidros simples de 3 mm também são indicados. Na ZB2, os resultados mostram que paredes na cor pérola, cobertura branca e a aplicação de vidros simples de 3 mm caracterizam a melhor solução. Na ZB3, recomenda-se paredes na cor pérola, cobertura branca e janelas com vidros simples de 6 mm. Além disso, foi possível ordenar os demais casos ótimos resultantes da otimização, facilitando a escolha da configuração de envoltória mais adequada diante de eventuais restrições. Assim, foi possível verificar que os resultados do processo de otimização podem ser avaliados a partir de um conjunto de critérios, auxiliando em decisões no projeto de uma edificação residencial de energia zero.

Palavras-chave: Zero Energy Buildings. Eficiência Energética. Energia Solar Fotovoltaica. Custo Inicial. Conforto Térmico.

ABSTRACT

MULTI-CRITERIA DECISION-MAKING PROCESS APPLIED TO NET ZERO ENERGY BUILDING'S ENVELOPE OPTIMIZATION IN RIO GRANDE DO SUL

AUTHOR: Selton Fernandes de Sousa Lima

ADVISOR: Joaquim Cesar Pizzutti dos Santos

The design and construction of Zero Energy Buildings can help reduce global energy consumption and, consequently, minimize environmental impacts. To design an energy-efficient building it is possible to use computational optimization tools, which will simulate sets of variables to find the best solutions. Faced with a variety of possible solutions, it is important to use a multi-criteria decision-making methodology to order them. The present study aims to determine the most suitable envelope configuration for obtaining residential Zero Energy Buildings in representative climate conditions of Rio Grande do Sul. Thus, the BEopt 2.8 software was used to obtain the optimal cases from the energy consumption and envelope costs point of view for Bioclimatic Zones 1, 2 and 3, in Rio Grande do Sul. Then, photovoltaic systems to balance the electrical energy consumption of each optimal case were determined. From this, the initial costs of the optimal cases were calculated, considering the cost of the envelope, the cost of the photovoltaic system and the other costs for the construction of the building. Furthermore, the adaptive model was used to assess thermal comfort indices of the optimal cases. Finally, four scenarios were considered to evaluate the optimal cases using the ELECTRE III multi-criteria decision-making process. Each scenario considered a different weight for each of the evaluation criteria (air conditioning consumption, initial cost, and thermal comfort index) to determine the best solution. The results show that in all scenarios, the best envelopes for Bioclimatic Zones 1, 2 and 3 have the main facade to the south, ceramic block walls (14 cm) and internal and external mortar (2.5 cm), 2 mm radiant barrier on the roof, percentage of transparent elements of 16% and distribution of these elements of 30% on the front and rear façades and 20% on the side façades. For the ZB1, as black exterior walls, a roof in dark colors, and windows with 3 mm single glazing are also indicated. In ZB2, the results show that pearl-colored walls, white roof, and the application of 3 mm glass characterize the best solution. On ZB3, we recommend pearl-colored walls, white roof, and 6 mm single glazed windows. In addition, it was possible to order the other optimal cases resulting from the optimization, facilitating the choice of the most adequate envelope configuration in face of possible restrictions. Thus, it was possible to verify that the results of the optimization process can be evaluated based on a set of criteria, assisting in decisions regarding the design of a residential Zero Energy Building.

Keywords: Zero Energy Buildings. Energy Efficiency. Photovoltaics. Initial Cost. Thermal Comfort.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de conexão entre edifícios e a rede de abastecimento de energia	18
Figura 2 – Mapa de radiação solar global horizontal média anual do Brasil	22
Figura 3 – Custo de energia solar (em dólar por Watt).....	24
Figura 5 - Fronteira Pareto-ótima	25
Figura 4 - Fluxograma da metodologia	33
Figura 5 - Planta baixa e perspectiva da edificação.....	35
Figura 6 - Otimização da envoltória na ZB1	51
Figura 7 - Otimização da envoltória na ZB2	52
Figura 8 - Otimização da envoltória na ZB3	52
Figura 9 - Consumo para aquecimento e resfriamento.....	54
Figura 10 - Consumo de energia ar-condicionado dos casos da ZB1.....	56
Figura 11 - Consumo de energia para ar-condicionado dos casos da ZB2.....	59
Figura 12 - Consumo de energia para ar-condicionado dos casos da ZB3.....	61
Figura 13 - Geração de energia nos casos da ZB1	62
Figura 14 - Geração de energia nos casos da ZB2	62
Figura 15 - Geração de energia nos casos da ZB3	63
Figura 16 - Custo inicial dos casos da ZB1	67
Figura 17 - Custo inicial dos casos da ZB2	67
Figura 18 - Custo inicial dos casos da ZB3	68
Figura 19 - Índices de conforto e desconforto dos casos da ZB1	70
Figura 20 - Índices de conforto e desconforto dos casos da ZB2.....	72
Figura 21 - Índices de conforto e desconforto dos casos da ZB3.....	74

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Comparação de ferramentas de otimização	26
Quadro 2 – Trabalhos que utilizaram o BEopt	28
Quadro 3 - Métodos de decisão multicritério	30
Quadro 4 - Descrição dos casos de cada sistema fotovoltaico	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características do sistema de condicionamento de ar	36
Tabela 2 - Composição das vedações verticais.....	37
Tabela 2 - Composição das vedações verticais.....	38
Tabela 3 - Propriedades térmicas dos materiais das vedações verticais	39
Tabela 4 - Cores de pintura externa das vedações verticais	39
Tabela 5 - Cores da cobertura	40
Tabela 6 - Propriedades dos vidros.....	40
Tabela 7 - Distribuição do percentual de área de janela	41
Tabela 8 - Variáveis discretas consideradas na otimização	41
Tabela 9 - Cidades consideradas.....	42
Tabela 10 - Caracterização climática.....	42
Tabela 11 - Orçamento da construção.....	46
Tabela 12 - Custo de itens do sistema fotovoltaico	46
Tabela 13 - Escala numérica para o julgamento de alternativas.....	48
Tabela 14 - Cenários de julgamento	48
Tabela 15 - Índice de consistência randômico.....	49
Tabela 16 - Limiares adotados.....	49
Tabela 17 - Variação do consumo para aquecimento e resfriamento.....	53
Tabela 18 – Configuração dos casos da ZB1	55
Tabela 19 - Configuração dos casos da ZB2	57
Tabela 20 - Configuração dos casos da ZB3	60
Tabela 21 - Índices de avaliação dos casos da ZB1	64
Tabela 22 - Índices de avaliação dos casos da ZB2.....	64
Tabela 23 - Índices de avaliação dos casos da ZB3.....	65
Tabela 24 - Custo dos sistemas fotovoltaicos.....	66
Tabela 25 - Temperaturas dos casos da ZB1	69
Tabela 26 - Temperaturas dos casos da ZB2	71
Tabela 27 - Temperaturas dos casos da ZB3	73
Tabela 28 - Desempenho normalizado das alternativas da ZB1.....	75
Tabela 29 - Ordenação final das alternativas da ZB1	76
Tabela 30 - Desempenho normalizado das alternativas da ZB2.....	77
Tabela 31 - Ordenação final das alternativas da ZB2.....	77
Tabela 32 - Desempenho normalizado das alternativas da ZB3.....	79
Tabela 33 - Ordenação final das alternativas da ZB3.....	79
Tabela 34 - Comparação das envoltórias dos melhores casos	80
Tabela 35 - Comparação dos resultados com os casos de referência	81

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	24
Equação 2	24
Equação 3	31
Equação 4	32
Equação 5	32
Equação 6	32
Equação 7	32
Equação 8	44
Equação 9	44
Equação 10	44
Equação 11.....	44
Equação 12	44
Equação 13	45
Equação 14	45
Equação 15	47
Equação 16	47
Equação 17	47
Equação 18	49

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVOS	15
1.1.1	Objetivo Geral	15
1.1.2	Objetivos Específicos	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	<i>ZERO ENERGY BUILDINGS</i>	17
2.2	MEDIDAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	20
2.3	ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NO BRASIL	22
2.4	OTIMIZAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	24
2.5	DECISÃO MULTICRITÉRIO	29
3	METODOLOGIA	33
3.1	DETERMINAÇÃO DE NET ZERO ENERGY BUILDINGS	34
3.1.1	Otimização da envoltória	34
3.1.2	Geração de energia fotovoltaica	43
3.2	ESTIMATIVA DE CUSTO INICIAL	45
3.3	MODELO ADAPTATIVO	47
3.4	DECISÃO MULTICRITÉRIO	48
4	RESULTADOS	51
4.1	<i>NET ZERO ENERGY BUILDINGS</i>	51
4.1.1	Otimização da envoltória	51
4.1.2	Geração de energia fotovoltaica	61
4.2	CUSTO INICIAL	66
4.3	ÍNDICE DE CONFORTO TÉRMICO	69
4.4	DECISÃO MULTICRITÉRIO	75
4.4.1	Zona Bioclimática 1	75
4.4.2	Zona Bioclimática 2	77
4.4.3	Zona Bioclimática 3	78
4.5	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS	80
5	CONCLUSÃO	82
5.1	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	83
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o consumo de energia elétrica tem aumentado significativamente. Em 1973, o consumo mundial de eletricidade era de 5,1 PWh e em 2018 atingiu 22,3 PWh (IEA, 2020). Além disso, grande parte da energia elétrica é produzida a partir de fontes não renováveis, o que impacta a preservação dos recursos naturais. Em 2017, apenas 17,3% de toda a energia elétrica utilizada no mundo foi produzida por fontes renováveis (IEA *et al.*, 2020).

A utilização de matrizes energéticas não renováveis associa o crescimento da demanda energética ao aumento de emissões de CO₂. Previsões indicam que, em 2050, o consumo de energia elétrica pelo setor residencial resultará na emissão de cerca de 3,0 Gt de CO₂ (OECD, 2012). Este estudo também sugere que, seguindo a tendência atual de aumento da concentração de CO₂ na atmosfera, a temperatura no planeta será elevada em até 4,0 °C no ano de 2100, em relação a 2020. Portanto, a demanda energética para o conforto térmico em edificações deve aumentar, promovendo o comportamento cíclico desse processo.

O conforto térmico do indivíduo no ambiente exerce influência sobre os seus hábitos e, conseqüentemente, sobre o uso de aparelhos elétricos como ventilador, aquecedor e ar-condicionado (YANG; YAN; LAM, 2014). Estima-se que no Brasil, de 2005 a 2017, o consumo de energia elétrica por condicionadores de ar somente pelo setor residencial tenha aumentado 237% (EPE, 2020a). Desse modo, destaca-se a necessidade de se projetar edificações termicamente confortáveis, que demandem menor condicionamento artificial.

Entretanto, a redução da demanda energética para resfriamento ou aquecimento dos ambientes não é suficiente para mitigar os impactos das edificações no meio ambiente. No Brasil, o setor residencial foi responsável por 26,1% do consumo de eletricidade em 2019 (EPE, 2020b), o que inclui os demais usos de energia elétrica, como eletrodomésticos e iluminação. Assim, a utilização de energia renovável em edificações torna-se necessária para a redução dos impactos ambientais.

O Brasil possui grande potencial para aproveitamento da energia solar por ser um país localizado na sua maior parte na região intertropical. Apesar da variedade de características climáticas, a média diária anual de irradiação global é compreendida entre 4,25 kWh/m² e 6,5 kWh/m². A irradiação solar global incidente no Brasil tem valores totais anuais de 1500 kWh/m² a 2500 kWh/m², superior a diversos países com intenso investimento em aproveitamento desse recurso, como Alemanha (900 kWh/m² a 1250 kWh/m²) e França (900 kWh/m² a 1650 kWh/m²).

Diante da forte dependência dos combustíveis fósseis durante a crise do petróleo de 1973, surgiram pesquisas buscando a integração de energias renováveis ao ambiente construído (KYLILI; FOKAIDES, 2015). A combinação entre a redução da demanda energética e a produção de energia renovável na edificação culminou no surgimento do conceito de *Zero Energy Building* (ZEB), ou Edifício de Energia Zero. Dessa forma, ZEB é compreendido como um edifício energeticamente eficiente e capaz de gerar energia necessária para compensar sua própria demanda em um determinado período (MARSZAL *et al.*, 2011; SARTORI; NAPOLITANO; VOSS, 2012).

A redução da demanda energética deve ser obtida por meio da adoção de medidas de eficiência energética, seja na envoltória, na carga de calor produzida internamente ou nos sistemas prediais de condicionamento ambiental (ATTIA *et al.*, 2013). Por outro lado, o suprimento de energia depende da tecnologia adotada, mas deve ser proveniente de fontes renováveis (DENG; WANG; DAI, 2014). A grande variedade de alternativas de medidas de eficiência energética e de tecnologias de geração de energia transforma a escolha da estratégia mais eficiente em uma atividade manualmente trabalhosa para o projetista (SHI; YANG, 2013).

Existem diversas ferramentas computacionais que podem auxiliar o projeto de edificações com foco em eficiência energética. Simuladores de desempenho termoenergético atuam na melhoria do conforto térmico e na diminuição do consumo de energia (NGUYEN; REITER; RIGO, 2014). Porém, procedimentos de tentativa e erro em meio a tantas variáveis e restrições são demasiadamente demorados e não garantem a escolha da solução mais eficiente (MAGNIER; HAGHIGHAT, 2010). A aplicação de algoritmos de otimização aos programas de simulação surge como uma alternativa para encontrar a melhor solução. Nesse tipo de abordagem, a otimização do desempenho termoenergético influencia efetivamente na escolha de estratégias para se atingir um objetivo específico, seja ele econômico, ambiental ou energético (D'AGOSTINO; PARKER, 2018a).

O *software* BEopt (*Building Energy Optimization Tool*), desenvolvido pelo *National Renewable Energy Laboratory* (NREL), combina ferramentas de simulação e otimização, oferecendo flexibilidade na avaliação de edificações residenciais ZEB (GUERELLO *et al.*, 2020). O programa utiliza a Técnica de Busca Sequencial (*Sequential Search Technique*) para avaliar edificações residenciais e apontar o caso ótimo global e casos ótimos intermediários no processo de obtenção de um ZEB. Cada caso simulado é definido por uma configuração, ou seja, um conjunto de valores para cada variável analisada. Nesta metodologia, as variáveis inseridas são combinadas, criando diferentes configurações para determinar a alternativa de menor custo a cada ponto sequencial, definida como solução ótima (HOROWITZ *et al.*, 2008).

A criação de casos ótimos intermediários colabora na identificação de alternativas para o projetista (CHRISTENSEN; BARKER; HOROWITZ, 2004). Portanto, como o processo de otimização resulta em diversas alternativas, é necessário utilizar uma metodologia de decisão multicritério para escolher a solução mais adequada (HARKOUSS; FARDOUN; BIWOLE, 2018). O método ELECTRE III, criado por Roy (1991), pode ser aplicado para ordenar as soluções, fornecendo ao projetista uma diretriz para a escolha da configuração mais vantajosa.

O interesse de estudar a otimização do desempenho termoenergético em edificações cresceu nos últimos anos (FERRARA *et al.*, 2014). Grande parte dos estudos aborda a alteração das variáveis relacionadas à envoltória com o intuito de minimizar a demanda energética (ASCIONE *et al.*, 2016; IHM; KRARTI, 2012). Outros trabalhos focam no custo ótimo aliado à redução do consumo de energia (CONGEDO *et al.*, 2015; KURNITSKI *et al.*, 2011; TADEU *et al.*, 2015). Entretanto, o nível de consumo energético de edificações pode variar, dependendo de condições climáticas específicas de cada local (ÇILDIR; KÖKTÜRK; TOKUÇ, 2020).

O Brasil, por possuir um território vasto, apresenta características climáticas variadas. O país foi dividido e classificado em 8 Zonas Bioclimáticas, nas quais estão agrupadas regiões homogêneas quanto ao clima (temperaturas máximas, mínimas e umidade relativa do ar), de acordo com a NBR 15220 (ABNT, 2005). As cidades pertencentes ao estado do Rio Grande do Sul estão classificadas nas Zonas Bioclimáticas 1, 2 e 3.

Estudos de otimização de edificações no Brasil têm buscado a adaptação de habitações de interesse social à Norma de *Passive House* na região Sul (DALBEM *et al.*, 2019), a obtenção de geometrias de edificações residenciais mais eficientes energeticamente em Chapecó-SC (BERLEZE; BRASILEIRO; SILVOSO, 2021) e em Viçosa-MG (SANTANA, 2016), ou ainda a melhoria do desempenho térmico de uma edificação residencial em Curitiba-PR (LINCZUK; BASTOS, 2020). Entretanto, apesar das pesquisas encontradas, a região sul ainda carece de trabalhos que apliquem ferramentas de otimização à obtenção de Edifícios de Energia Zero.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desse trabalho é determinar a configuração de envoltória mais adequada para a obtenção de edificações residenciais de energia zero em condições climáticas representativas do Rio Grande do Sul.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Realizar a otimização da envoltória de uma edificação residencial unifamiliar localizada no estado do Rio Grande do Sul;
- Dimensionar o sistema fotovoltaico necessário para suprir a demanda energética dos casos ótimos;
- Calcular o custo inicial dos casos ótimos, considerando os custos da envoltória, do sistema fotovoltaico e demais custos relacionados à construção da edificação;
- Avaliar o índice de conforto térmico dos casos ótimos;
- Avaliar os casos ótimos por meio do método ELECTRE III diante de diferentes cenários de prioridade dos critérios.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo será abordada a revisão bibliográfica de temas pertinentes ao presente trabalho, que serviram de base para o delineamento da pesquisa. Primeiramente serão apresentadas as definições de *Zero Energy Building* (ZEB). Em seguida, serão descritas medidas de eficiência energética adotadas nos edifícios para torná-los ZEB, com foco na envoltória, nas condições internas e em sistemas prediais. Então, a revisão apresentará o panorama brasileiro referente à energia solar fotovoltaica. Na sequência, serão elencados trabalhos que aplicaram o *software* BEOpt para problemas de otimização de edificações residenciais. Por fim, serão apresentadas as metodologias de decisão multicritério, especialmente para problemas de otimização de edificações residenciais.

2.1 ZERO ENERGY BUILDINGS

Apesar de haver um entendimento a respeito do conceito de *Zero Energy Building* (Edifícios de Energia Zero), não há um censo comum quanto a sua definição, levando cada pesquisador a especificar a compreensão adotada em sua pesquisa (DENG; WANG; DAI, 2014; HARKOUSS, 2018; MARSZAL *et al.*, 2011). Entretanto, estas definições culminam para a compreensão de ZEB como um edifício eficiente energeticamente capaz de gerar energia necessária para compensar sua própria demanda em um determinado período (D'AGOSTINO, 2015; DENG; WANG; DAI, 2014; DOE, 2015; JUAN; GAO; WANG, 2010; KAPSALAKI; LEAL; SANTAMOURIS, 2012; KYLILI; FOKAIDES, 2015; MARSZAL *et al.*, 2011; SARTORI; NAPOLITANO; VOSS, 2012).

Implicamente, os estudos referentes a este tema são comumente direcionados a edifícios conectados à rede elétrica, não a edifícios energeticamente autônomos. Dessa forma, o termo Net ZEB pode ser usado para se referir aos edifícios conectados à infraestrutura urbana, enquanto o termo ZEB é mais geral e pode incluir ainda edifícios autônomos. O vocábulo “Net ZEB” (traduzido do inglês como Edifícios de Energia Líquida Zero), acentua o fato de haver um balanço energético entre a energia produzida pelo próprio edifício e a energia consumida da rede elétrica (SARTORI; NAPOLITANO; VOSS, 2012).

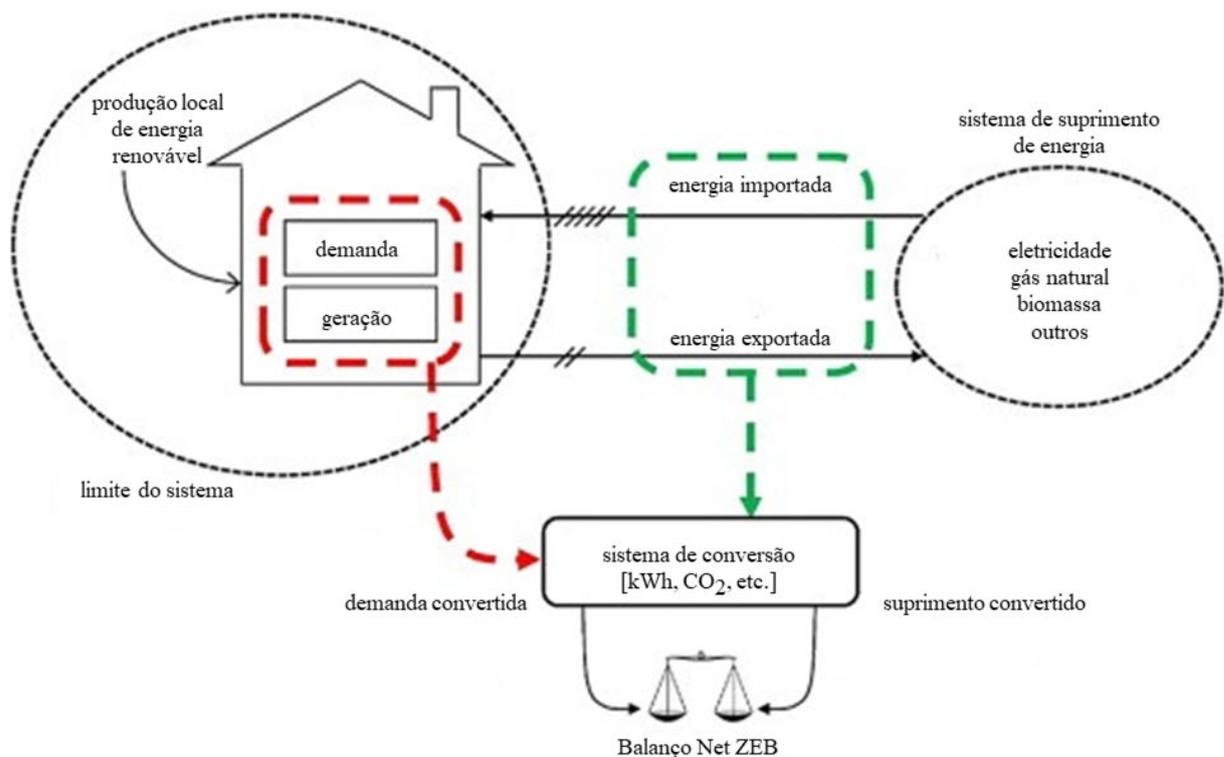
De acordo com (TORCELLINI *et al.*, 2006), algumas das definições de ZEB são:

- **Zero Net Energy Buildings:** são edifícios que, após um ano de operação, produzem e exportam à rede elétrica tanta energia quando importam;

- **Zero Stand Alone Buildings:** são edifícios que não necessitam de conexão à rede elétrica ou apenas se conectam por segurança, pois operam de forma autônoma, armazenando energia para o uso noturno ou em período em que a geração de energia renovável seja reduzida por conta de condições climáticas;
- **Plus Energy Buildings:** são edifícios que produzem mais energia do que consomem em um ano de uso;
- **Zero Carbon Buildings:** são edifícios que, após um ano de operação, não utilizam nenhuma fonte de energia que emita dióxido de carbono.

A Figura 1 mostra a representação da conexão entre um ZEB e a rede de energia, ressaltando que o balanço energético promovido deve levar em consideração todas as fontes energéticas utilizadas, as quais devem ser convertidas para uma unidade comum. Dessa forma, a subtração da demanda energética pelo suprimento implica no balanço Net ZEB (SARTORI; NAPOLITANO; VOSS, 2012).

Figura 1 - Esquema de conexão entre edifícios e a rede de abastecimento de energia



Fonte: adaptado de Sartori, Napolitano e Voss (2012).

Para atingir o balanço Net ZEB igual a zero é preciso reduzir a demanda de energia a partir de medidas de eficiência energética; e gerar energia renovável suficiente para suprir a demanda residual, ou seja, o consumo energético que não pode ser reduzido. Dessa forma, é evidente a importância de aplicar medidas de eficiência antes da utilização das fontes renováveis de energia (MARSZAL *et al.*, 2011). Entretanto, Sartori, Napolitano e Voss (2012) destacam outros critérios que devem ser levados em consideração durante a caracterização de um Net ZEB: os limites do sistema, o sistema de conversão, o balanço Net ZEB, a correspondência entre o consumo, a geração de energia e o período de análise, e validação.

Definir os limites do sistema é crucial para a identificação dos fluxos de energia que são importados e exportados. Dessa forma, este parâmetro é formado pela combinação do limite físico com o limite de balanço, pois somente os fluxos energéticos que cruzam ambos os limites são considerados no balanço do Net ZEB. O limite físico pode compreender um edifício ou um grupo de edifícios e é necessário para identificar se a geração de energia renovável ocorre no mesmo local de utilização (*on-site*) ou distante do ponto de consumo (*off-site*). O limite de balanço descreve quais formas de energia serão consideradas no balanço Net ZEB. Assim, pode ser considerado até mesmo o consumo energético do ciclo de vida do edifício, como a energia incorporada dos materiais utilizados. A definição coerente dos limites implica na possibilidade de comparação de edifícios similares em climas similares, portanto também é necessário identificar condições de contorno tais como funcionalidade, clima e conforto (SARTORI; NAPOLITANO; VOSS, 2012).

O sistema de conversão é utilizado para padronizar as unidades de medida das energias consideradas e, assim, promover o cálculo do balanço energético. Torcellini *et al.* (2006) considera quatro métricas distintas: energia local, fonte de energia, custos de energia e emissões de dióxido de carbono relacionados ao uso de energia. Diante disso, os fatores de conversão utilizados na importação da energia da rede elétrica também podem ser aplicados na sua exportação, de forma simétrica (DENG; WANG; DAI, 2014).

As metodologias de cálculo do balanço Net ZEB, levam em consideração alguns aspectos, dentre eles o período de balanço, o tipo de balanço e a eficiência energética do edifício. Geralmente o tempo utilizado é de um ano, pois é um período que contempla as grandes variações de condições climáticas, como as estações, por exemplo. Entretanto, é possível adotar períodos menores para buscar medidas de eficiência específicas para um período crítico, como o inverno. Por outro lado, a utilização de períodos maiores possibilita a análise do ciclo de vida do edifício, levando em consideração a energia incorporada (SARTORI; NAPOLITANO; VOSS, 2012).

Marszal *et al.* (2011) realizou um levantamento de metodologias de balanço Net ZEB, relacionando os respectivos critérios adotados. Dentre as 12 diferentes metodologias que o estudo apresenta, 8 levam em conta o uso total de energia da edificação, que inclui a energia consumida pelo edifício e o consumo energético do usuário. Além disso, observou-se que a energia incorporada não é comumente considerada no cálculo. Em relação ao tipo de balanço energético, 11 das 12 metodologias consideram a relação entre o consumo e a geração de energia.

O edifício Net ZEB é caracterizado pela possibilidade de contribuir à rede de infraestrutura com a geração de energia. Nesse sentido, dois indicadores podem ser usados para expressar a correspondência entre o consumo, a geração de energia e o período de análise: correspondência de carga (*load matching*) e interação com a rede de energia (*grid interaction*). O primeiro se refere à relação entre a demanda e a geração de energia do edifício. O segundo diz respeito aos fluxos de energia importada e exportada da rede. Ambos os indicadores devem ser realizados para cada tipo de energia separadamente e auxiliam no projeto de redes inteligentes (*smart grids*) (DENG; WANG; DAI, 2014).

2.2 MEDIDAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Apesar da geração de energia por meio de fontes renováveis compensar o consumo energético, em alguns casos há limitações (como aplicação de módulos fotovoltaicos em edifícios com limitações de área e excesso de sombreamento), e pode ser que a geração de energia não atinja a capacidade necessária para abastecer o edifício. As medidas de eficiência energética ajudam a reduzir o consumo energético e, conseqüentemente, superar as limitações físicas da geração de energia renovável, podendo atuar na envoltória, em condições internas e em sistemas prediais (LI; YANG; LAM, 2013).

O principal objetivo da aplicação de medidas de eficiência energética na envoltória é a capacidade de limitar os ganhos de calor no verão e as perdas de calor no inverno, pois dessa forma a energia demandada para resfriar ou aquecer o ambiente seria minimizada (LI; YANG; LAM, 2013). Além disso, as estratégias adotadas em relação à envoltória devem levar em consideração as condições climáticas do local de implantação do edifício (GIVONI, 1992). Assim, Li, Yang e Lam (2013) apresentam algumas estratégias sobre a envoltória, tais como: isolamento térmico; massa térmica; área de janelas e vidros; e telhados verdes ou refletivos.

Em teoria, quanto maior o isolamento térmico, menores são as trocas térmicas, o que implicaria em maior eficiência energética. Entretanto, existem casos em que o aumento do

isolamento térmico pode causar o acréscimo do consumo energético. Isso acontece pela dificuldade de perda de calor em determinados períodos do ano (geralmente em meia-estação), que tende a aumentar a necessidade de resfriamento, resultando no crescimento da demanda de ar-condicionado. Assim, o ponto em que o isolamento deixa de ser benéfico para a eficiência energética é chamado de “ponto de inflexão térmica” (MASOSO; GROBLER, 2008).

A atenção à massa térmica dos materiais durante a fase de projeto de edificações tem sido alavancada pelas contribuições de Givoni (1992). O aquecimento solar passivo é um exemplo da aplicação da massa térmica para promover o aquecimento de ambientes. Para o uso efetivo da massa térmica dos elementos, é necessário levar em consideração as características físicas da estrutura, a natureza dinâmica das cargas térmicas no edifício, a relação entre a massa e zona térmica, estratégias para acumular e liberar a energia armazenada (KALOGIROU; FLORIDES; TASSOU, 2002). A ventilação noturna (natural ou mecânica) deve ser associada à massa térmica para melhorar o potencial de eficiência energética da edificação, visto que esta medida aumenta o conforto térmico do usuário (GIVONI, 1992).

De forma geral, as janelas e vidros influenciam no consumo energético por meio do Percentual de Área de Abertura de Fachada total, da transmitância térmica e do fator solar do vidro adotado. Isso ocorre porque através dos fechamentos transparentes há trocas térmicas significativas. Entretanto, é preciso compreender que a adoção de um menor Percentual de Área de Abertura de Fachada total pode afetar na iluminação natural do ambiente e, conseqüentemente, no consumo de energia elétrica do edifício, a depender da orientação solar adotada. Logo, é válido encontrar o equilíbrio entre o uso da iluminação natural adequada e as trocas térmicas relacionadas aos fechamentos transparentes (YANG; YAN; LAM, 2014).

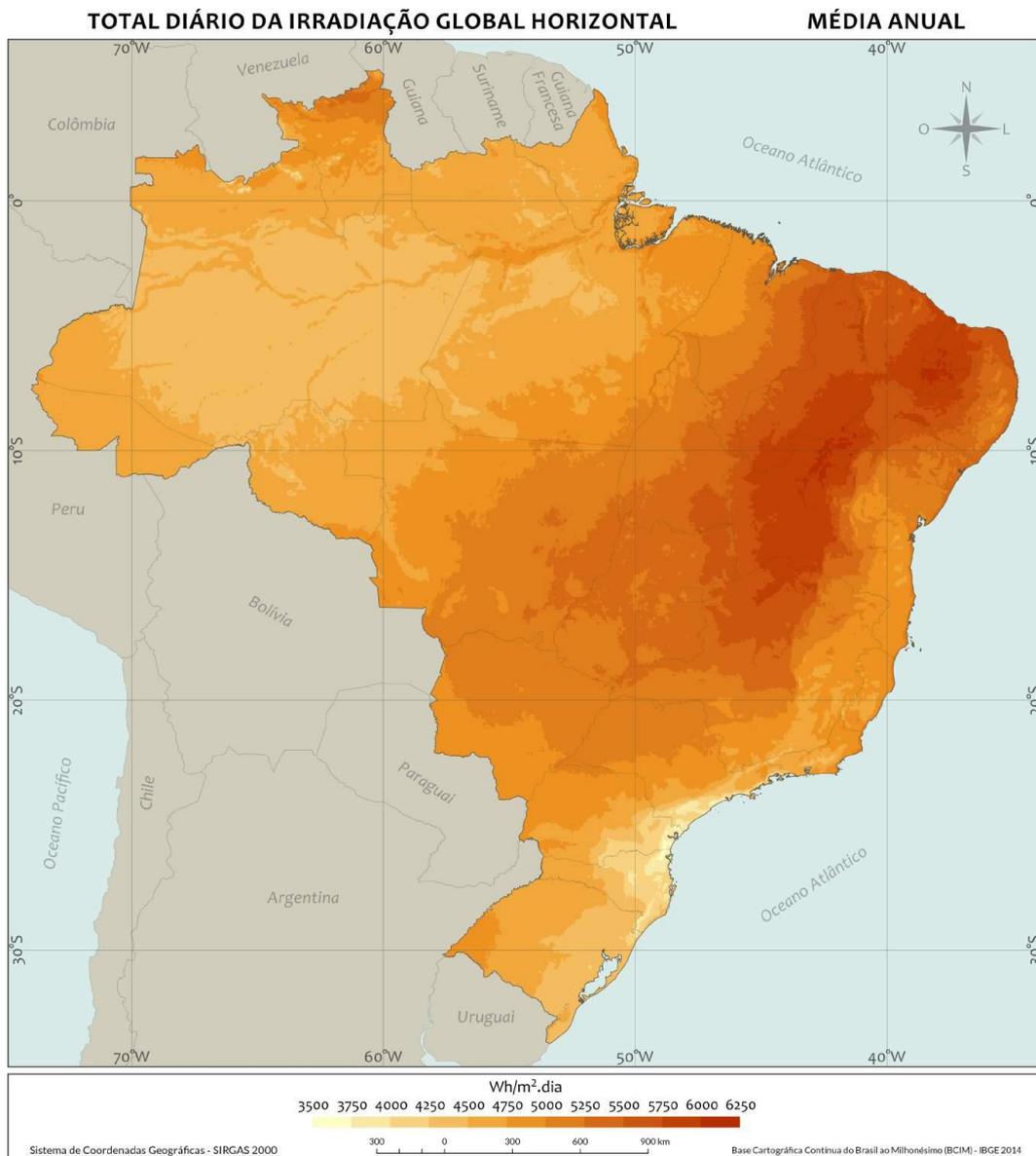
A cobertura do edifício pode ser responsável por ganhos térmicos consideráveis, especialmente em edificações de um único pavimento. Nesse sentido, a utilização de coberturas refletivas pode ajudar a reduzir o calor no interior do ambiente e, portanto, reduzir o consumo de energia elétrica (AKBARI; KONOPACKI; POMERANTZ, 1999).

As fontes de calor internas e o conforto térmico do usuário exercem influência significativa na demanda de aquecimento e resfriamento do ambiente construído (BADESCU; LAASER; CRUTESCU, 2010). Pesquisas recentes sobre o impacto das mudanças de temperatura no consumo de energia elétrica dos edifícios apontam que medidas relacionadas às condições internas de temperatura e à densidade de carga de iluminação têm grande potencial de mitigar o consumo energético (LI; YANG; LAM, 2012). Assim, as cargas internas dos equipamentos e de iluminação devem ser estipuladas a fim de reduzir a demanda energética.

2.3 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NO BRASIL

Em um ZEB a demanda energética é suprida por fontes renováveis. Esse tipo de edifício requer energia em forma de calor e de eletricidade e a energia solar tem grande potencial para atender aos dois requisitos, promovendo o consumo nulo. Desse modo, sistemas solares térmicos e fotovoltaicos podem contribuir para atingir este objetivo (GOOD; ANDRESEN; HESTNES, 2015). A Figura 2 apresenta o mapa de radiação solar global horizontal média anual do Brasil, a partir da qual são estimados as componentes global, direta e difusa.

Figura 2 – Mapa de radiação solar global horizontal média anual do Brasil



Fonte: Pereira *et al.* (2017).

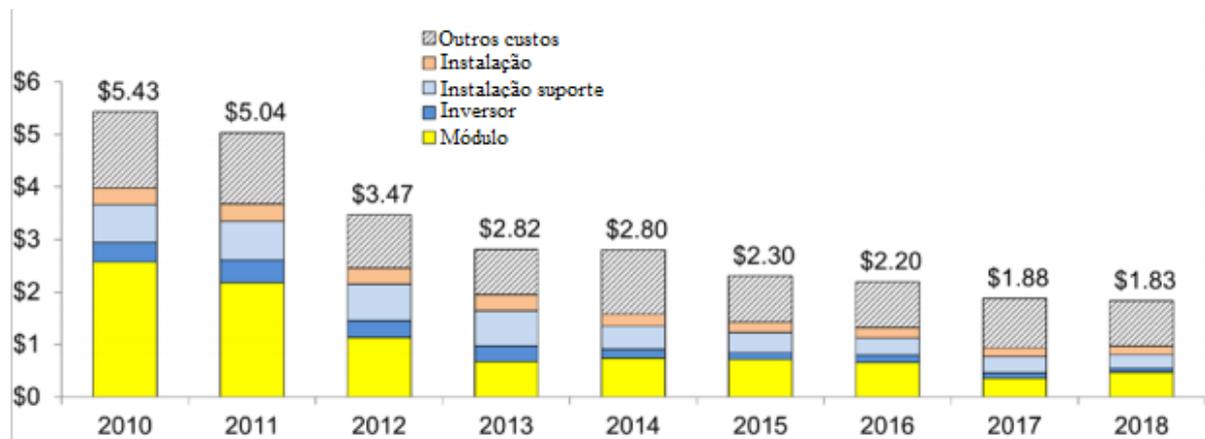
A geração fotovoltaica depende diretamente da quantidade de radiação recebida pelo módulo. Além disso, a irradiação que incide sobre o sistema varia de acordo com a localização, orientação e inclinação do módulo (SANTOS; RÜTHER, 2014). De acordo com o Atlas Brasileiro de Energia Solar (PEREIRA *et al.*, 2017), por ser um país localizado na sua maior parte na região intertropical, o Brasil possui grande potencial para aproveitamento da energia solar. Apesar da variedade de características climáticas, a irradiação solar global incidente no país é de 1500 kWh/m² a 2500 kWh/m² por ano.

O estudo de Santos e Rütther (2014) analisou a influência da orientação solar e da inclinação do módulo fotovoltaico na irradiação incidente em todas as capitais brasileiras. Por meio da construção de ábacos, foram apresentadas as reduções de irradiação para inclinações de 0° a 90°, variando a cada 10°, e para azimutes variando a cada 30° a partir do Norte (0°), de -180° a 180°. O trabalho concluiu que a região Norte do Brasil apresenta maior tolerância a desvios azimutais, enquanto a região Sul tem maior restrição de posicionamento dos módulos. Entretanto, para inclinações de ±10° e desvios azimutais de 0° a 60°, as perdas de irradiação ficam abaixo de 10%, o que corresponde a um valor bastante aceitável. Desse modo, torna-se evidente que o sistema fotovoltaico é bastante flexível, sobretudo para a realidade brasileira, garantindo a possibilidade de instalação de módulos fotovoltaicos em qualquer orientação e diversas inclinações com perdas relativamente pequenas de radiação.

Dantas e Pompermayer (2018) realizaram um estudo de viabilidade econômica de sistemas fotovoltaicos no Brasil, publicado pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA). Foram estimados os custos de compra de equipamentos e instalação de três sistemas fotovoltaicos: com 6, 10 e 18 placas respectivamente. Os resultados mostram que para um sistema fotovoltaico com 18 placas, 48% dos custos são referentes às placas, 29% ao inversor, 16% para a instalação e 7% para o sistema de proteção.

A Figura 3 mostra o histórico de custos de sistemas fotovoltaicos entre 2010 e 2018. Percebe-se a diminuição de 66% do custo de um sistema fotovoltaico comercial entre 2010 e 2018. Entretanto, aproximadamente 79% desta redução pode ser atribuída à queda do preço de componentes físicos necessários à instalação, como módulos, inversores e suportes (FU; FELDMAN; MARGOLIS, 2018). Portanto, o custo do sistema fotovoltaico tem ficado cada vez mais competitivo, reduzindo o período de retorno do investimento.

Figura 3 – Custo de energia solar (em dólar por Watt)



Fonte: Adaptado de Fu, Feldman e Margolis (2018).

2.4 OTIMIZAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Simulações computacionais permitem a avaliação prévia do comportamento térmico e energético de um edifício. Dessa forma, é possível relacionar o conforto térmico e lumínico com a geometria da edificação e os materiais utilizados como fechamento, definindo parâmetros que contribuam para a redução do consumo de energia. Entretanto, em um Net ZEB é necessário que se obtenha a maior eficiência energética possível. Como existem diversas possibilidades de configuração da envoltória do edifício, a simulação torna-se manualmente inviável pela quantidade de execuções necessárias para se atingir a melhor solução (SHI; YANG, 2013).

Matematicamente, a descrição de um problema de otimização (Equação 1 e Equação 2) relaciona: funções-objetivo (F), que por convenção tendem a ser minimizadas; restrições (G), que delimitam as funções-objetivo; e variáveis (x), definidas a partir de valores discretos ou condições de contorno (S) (WANG; RIVARD; ZMEUREANU, 2005).

$$\text{Minimizar : } F(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1)$$

Sujeita a:

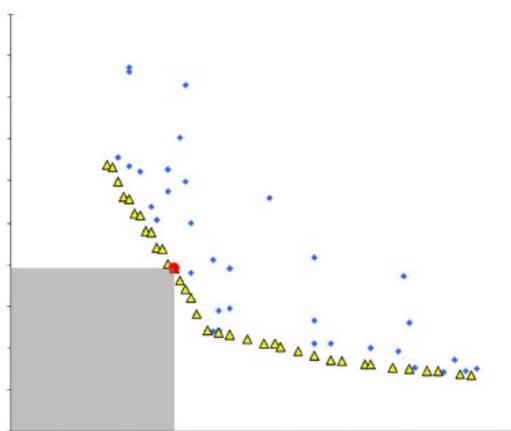
$$G(x_1, x_2, \dots, x_n) \geq 0 \quad x_i \in S_i \quad (2)$$

Problemas relacionados a otimização de parâmetros de edifícios geralmente requerem a solução de mais de um objetivo ao mesmo tempo. Existem duas formas de resolver problemas de otimização multi-objetivo: por meio do método de somatória de pesos, em que os vários

objetivos são combinados para formar um só, que então é processado; ou pelo método de otimização Pareto, na qual são geradas diversas soluções que atendem concomitantemente todas as funções-objetivo e, a partir de então, é realizada a escolha de uma solução dominante (EVINS, 2013).

A Figura 5 mostra um conjunto de soluções de um problema de otimização (pontos azuis). Os pontos mais próximos aos eixos (triângulos amarelos), são as soluções geradas a partir da otimização Pareto, também chamadas de Pareto-ótimas, e juntos formam a Fronteira Pareto-ótima.

Figura 4 - Fronteira Pareto-ótima



Fonte: Evins (2013).

Portanto, a otimização de edifícios mostra-se uma técnica efetiva para avaliar parâmetros de projeto e escolher a melhor solução para proposições específicas expressas em funções-objetivo (eficiência energética, redução de custo ou redução da emissão de dióxido de carbono, por exemplo) sujeitas a restrições (como conforto térmico) (HARKOUSS, 2018).

Assim, a aplicação de métodos computacionais de otimização se mostra como uma alternativa vantajosa (EVINS, 2013). O processo de otimização corresponde à busca da melhor solução possível para um determinado problema (KENNEDY; EBERHART, 1995). A otimização de edifícios mostra-se uma técnica efetiva para avaliar parâmetros de projeto e escolher a melhor solução para proposições específicas e (HARKOUSS, 2018). Entretanto, determinar as melhores alternativas a partir da variação dos muitos parâmetros possíveis a partir da utilização de apenas *softwares* de simulação pode ser uma tarefa árdua (KHEIRI, 2018).

Diante disso, surgiram diversas ferramentas de otimização do desempenho de edificações (*Building Performance Optimization Tools*) para auxiliar profissionais a avaliar diferentes opções de projeto para a obtenção de soluções ótimas ou quase ótimas. Tais

ferramentas podem ser utilizadas para a realização de estudos sobre: geometria, posição, composição da envoltória, iluminação natural e controle automatizado de persianas, estratégias de ventilação natural, dimensionamento de aparelhos de ar-condicionado, conforto térmico, gerenciamento do armazenamento de energia, entre outros (ATTIA *et al.*, 2013).

Attia *et al.* (2013) realizaram uma revisão acerca da tendência de utilização de ferramentas de otimização de edificações por meio da análise de 165 publicações e entrevistas com 28 especialistas em otimização. A pesquisa apontou que as ferramentas mais utilizadas pelos entrevistados são o Matlab e o Genopt, seguidos de BEopt, OptEPlus, OwnPackage e Excell.

Tian *et al.* (2015) avaliaram diversas ferramentas de otimização a partir da aplicabilidade na fase de concepção do projeto sob a perspectiva de arquitetos. Os resultados da pesquisa estão apresentados no Quadro 1. A partir dos resultados, os autores afirmaram que todas as ferramentas analisadas possuem vantagens e desvantagens, mas destaca-se que o Opt-E-Plus, o BEopt 2.3.02 e o DesignBuilder V4.2 foram os mais bem avaliados.

Quadro 1 – Comparação de ferramentas de otimização

(continua)

Critério e Subcritérios	BEopt 2.3.02	jEPlus+EA 1.51	MOBO 0.3b	DesignBuilder V4.2	Opt-E-Plus	GENE_ARCH	MultiOpt 2
Completeness de dados							
Base de dados	S	N	N	S	P	P	S
Conformidade padrão automática	P	N	N	P	?	N	N
Interoperabilidade							
Importação de arquivos externos	S	N	N	S	S	N	N
Interface gráfica	S	P	P	S	S	P	S
Parâmetros de otimização							
Análise de incerteza	N	N	N	N	N	N	N
Computação paralela	S	S	S	S	S	N	?
Seleção de algoritmo	N	N	S	N	?	N	N
Características do algoritmo	N	N	S	N	?	N	N
Fechamentos opacos	S	S	P	S	S	S	S
Fechamentos transparentes	S	S	P	S	S	S	S

Quadro 1 – Comparação de ferramentas de otimização

(continuação)

Critério e Subcritérios	BEopt 2.3.02	jEPlus+EA 1.51	MOBO 0.3b	DesignBuilder V4.2	Opt-E-Plus	GENE_ARCH	MultiOpt 2
Ventilação natural	P	?	N	P	P	N	?
Iluminação natural	N	S	N	N	S	S	?
Sombreamento	P	P	N	P	P	P	P
Pós-processamento							
Definição da função-objetivo	N	S	S	N	N	?	N
Gráficos	N	N	S	N	N	N	N
Colunas	S	N	N	N	S	N	N
Diagrama de pontos	S	N	S	S	S	S	S
Exportação de dados	S	S	?	S	S	?	S

Legenda: “S” significa totalmente capaz; “P” é parcialmente capaz; “N” significa incapaz; e “?” não é possível inferir.

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

Mahmud *et al.* (2018) avaliaram ferramentas computacionais para projeto, análise e gerenciamento de sistemas energéticos residenciais. Foram analisadas 14 ferramentas de otimização, entre gratuitas e comerciais, destacando os pontos fortes e as limitações de cada uma. Os autores concluíram que nenhuma ferramenta contempla todas as aplicações, cabendo ao projetista analisar a ferramenta mais viável para cada caso específico.

Os métodos de otimização podem considerar dois tipos de variáveis: contínuas e discretas. Variáveis contínuas são aquelas que consideram valores fracionais, enquanto as variáveis discretas são descritas por um conjunto de números finitos. Entretanto, dificilmente os parâmetros das edificações são exclusivamente variáveis contínuas. Desse modo, métodos que utilizam variáveis discretas, como algoritmos genéticos (*genetic algorithms*), enxame de partículas (*particle swarm*) e busca sequencial (*sequential search*) são mais adequados a esse tipo de estudo (JUNGHANS, 2013).

Os algoritmos genéticos são uma técnica de busca probabilística para obter soluções ótimas a partir de variáveis discretas. A cada interação, um caminho diferente para a obtenção

da solução ótima é definido, o que pode resultar em diferentes resultados a cada execução. A técnica do enxame de partículas também se mostrou uma alternativa bem-sucedida para aplicações em edificações. Porém, esses métodos não realizam a classificação de soluções marginais. O algoritmo de busca sequencial, em contrapartida, identifica a solução mais efetiva a cada interação por meio da comparação com estratégias e parâmetros definidos anteriormente. Desse modo, esse algoritmo apresenta uma vantagem significativa sobre os demais, pois não apenas identifica a melhor solução, mas também classifica as possíveis soluções que podem ser selecionadas caso sejam identificadas restrições (JUNGHANS, 2013).

Christensen, Barker e Horowitz (2004), do *National Renewable Energy Laboratory* (NREL), desenvolveram a ferramenta de otimização BEopt baseada em um algoritmo de busca sequencial. O BEopt (acrônimo de *Building Energy Optimization Tool*) é uma interface que utiliza o EnergyPlus como plataforma de simulação (WILSON, Eric, 2015). A principal vantagem desse *software* é a busca da combinação ótima de variáveis para a determinação de *Zero Energy Buildings* considerando custos operacionais (JUNGHANS, 2013).

O *software* BEopt tem sido amplamente utilizado para executar otimização de edificações residenciais. O Quadro 2 apresenta o levantamento de trabalhos relevantes que utilizaram o *software* BEopt, relacionando a diversidade de aplicações possíveis.

Quadro 2 – Trabalhos que utilizaram o BEopt

(continua)

Referência	Objetivo	Principais resultados
Bichou e Krarti (2011).	Otimizar a envoltória e o sistema de ar-condicionado de edificações residenciais localizadas em cinco cidades dos Estados Unidos.	A otimização pode reduzir o custo do ciclo de vida da edificação entre 10 e 25% dependendo do clima e do tipo de edificação.
Griego, Krarti e Hernández-Guerrero (2012).	Otimizar a eficiência energética e as medidas de conforto térmico em uma edificação residencial localizada em Salamanca, México.	Os resultados mostram que a combinação das variáveis adotadas pode reduzir o consumo energético de uma edificação em 52%.
Hemsath (2016).	Avaliar o efeito da orientação solar de 7.000 edificações residenciais existentes e o impacto coletivo da comunidade no uso de energia e no custo anual relacionado à energia.	Individualmente, a orientação solar tem impacto reduzido no custo da energia, mas quando analisado em conjunto com as demais edificações da comunidade, o impacto é significativo.

Quadro 2 – Trabalhos que utilizaram o BEopt

(continuação)

Referência	Objetivo	Principais resultados
Medrano-Gómez e Izquierdo (2017).	Melhorar a eficiência energética e o conforto térmico de habitações de interesse social no México.	Foi possível reduzir o consumo anual de energia elétrica entre até 47%.
D'Agostino e Parker (2018b).	Identificar as melhores medidas de eficiência energética de custo ótimo para <i>Nearly Zero Energy Buildings</i> em climas representativos da Europa.	Foi possível reduzir o consumo de energia primária em até 90%, enfatizando a importância da integração entre medidas de eficiência energética e produção de energia renovável.
Setter <i>et al.</i> (2019).	Analisar numericamente o potencial de economia de energia a partir da utilização de CLT (<i>Cross Laminated Timber</i>) em uma edificação residencial unifamiliar em diferentes climas dos Estados Unidos.	O uso de CLT em edificações residenciais resultou em economia de energia em todos os climas analisados, sendo maior em climas frios.
Bruno <i>et al.</i> (2020).	Analisar projeções financeiras e macroeconômicas e compará-las às soluções custo ótimo de uma edificação multifamiliar localizada no Mediterrâneo.	Ambas as projeções produziram as mesmas soluções de custo ótimo. Mas em projeções macroeconômicas, os <i>benchmarks</i> corresponderam às soluções de custo ótimo apenas em climas frios.
Garriga, Dabbagh e Krarti (2020).	Determinar soluções ótimas de <i>retrofit</i> de comunidades residenciais para a emissão de carbono neutra em Barcelona, na Espanha.	A combinação de estratégias passivas e ativas pode gerar economia de energia primária em 57% e reduzir o pico da demanda de eletricidade em 29%.
Guerello <i>et al.</i> , (2020).	Identificar medidas de eficiência energética de baixo custo a configuração de sistemas híbridos de energia para edificações residenciais desconectadas da rede de energia elétrica (<i>off grid</i>).	Atingiu-se a economia de custo de 10% em relação ao caso base.

Fonte: Autor.

2.5 DECISÃO MULTICRITÉRIO

O processo de otimização resulta em diversas possíveis soluções para o problema proposto. Portanto, essas soluções precisam ser avaliadas e classificadas para se determinar a

melhor solução possível para a situação imposta (HARKOUSS; FARDOUN; BIWOLE, 2018). Métodos de decisão multicritério tem sido aplicados na literatura para auxiliar na seleção de tecnologias sustentáveis para edificações, pois têm a capacidade de desconstruir o problema em etapas discretas, comparando a importância relativa dos critérios analisados e aplicando modelos matemáticos rigorosos para definir a melhor solução (SI *et al.*, 2016).

Os métodos de decisão multicritério são considerados uma ferramenta complexa que avalia fatores quantitativos e qualitativos (MARDANI *et al.*, 2015). Os critérios para a seleção da melhor opção podem considerar os mais diversos parâmetros, sejam técnicos, econômicos, ambientais ou sociais. A definição dos critérios de análise reflete as prioridades consideradas a partir da atribuição de pesos a cada um deles. Os métodos de decisão multicritério utilizam modelos matemáticos para definir o peso de cada critério, atribuir notas às alternativas e apresentar o resultado final (SI *et al.*, 2016). O Quadro 3 apresenta uma síntese dos métodos de decisão multicritério mais utilizados.

Quadro 3 - Métodos de decisão multicritério

Método	Descrição
Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT)	Modelo de somatório de pesos (WSM): recomendado para problemas unidimensionais; Modelo do produto de pesos (WPM): aplicável para problemas unidimensionais e multidimensionais, mas não para avaliação qualitativa de critérios.
Processo Analítico Hierárquico (AHP)	Decompõe o problema em uma hierarquia de alternativas e critérios ponderados para gerar uma classificação de alternativas.
Sobreclassificação (como ELECTRE, PROMETHEE e TOPSIS)	Adequado para problemas de decisão com poucos critérios e com várias alternativas.

Fonte: Adaptado de D'Agostino, Parker e Melià (2019).

Os métodos de decisão multicritério podem ser classificados em compensatórios e não-compensatórios. Em modelos compensatórios, o mau desempenho de uma alternativa em determinado critério pode ser compensado por um bom desempenho em outro critério; portanto, uma alternativa pode ser falsamente classificada como a melhor. Para modelos não-compensatórios, por sua vez, o desempenho significativamente ruim de uma alternativa em

determinado critério não é compensado por um bom desempenho em outro critério; dessa forma cada critério contribui individualmente para o desempenho final da alternativa. Modelos MAUT, como o WSM e o WPM e modelos da escola americana, como o AHP, são classificados como compensatórios, enquanto os modelos de sobreclassificação são não-compensatórios (BANIHABIB; HASHEMI-MADANI; FORGHANI, 2017).

O *Elimination et Choix Traduisant la Réalité* (ELECTRE) é um método de sobreclassificação desenvolvido por Roy (1991). Ao longo dos anos, surgiram diversas versões, baseadas na natureza do problema (encontrar uma solução ou ordenar as alternativas), no grau de significância dos critérios (critério verdadeiro ou pseudo-critério) e em informações de preferência (pesos, índice de concordância, índice de discordância e veto) (TZENG; HUANG, 2011). Para problemas que envolvem variáveis ambientais, recomenda-se a utilização do ELECTRE III (SALMINEN; HOKKANEN; LAHDELMA, 1998).

Para realizar a análise de alternativas pelo método ELECTRE III, é necessário estabelecer limiares de preferência, indiferença e veto e os pesos dos critérios considerados. A partir desses dados, são produzidas as matrizes de concordância para cada critério, a matriz de concordância global, a matriz de discordância e a matriz de credibilidade. Então, é feito o ranqueamento das alternativas utilizando o algoritmo de destilação de forma descendente (da melhor para a pior alternativa) e ascendente (da pior para a melhor alternativa). Por fim, as ordenações são avaliadas para produzir a matriz de dominância (ROY, 1991; TZENG; HUANG, 2011).

Considerando que: a_i é a alternativa i ; g_j é o critério j ; $g_j(a_i)$ é o desempenho da alternativa i em relação ao critério j ; w_j é o peso do critério j ; $c_{lk}(a_l, a_k)$ é o grau de concordância parcial entre as alternativas l e k ; $C(a_l, a_k)$ é o grau de concordância global entre as alternativas l e k ; $d_{lk}(a_l, a_k)$ é o grau de discordância entre as alternativas l e k ; $\sigma(a_l, a_k)$ é o índice de credibilidade entre as alternativas l e k ; p_j é a preferência estrita do critério j , q_j é a preferência fraca do critério j ; v_j é o veto do critério j ; $v_j \geq p_j \geq q_j$; e λ é o nível de corte. As equações de concordância parcial (3), índice de concordância global (4), discordância (5) e credibilidade (6) estão apresentados abaixo, de acordo com (ROY, 1991; TZENG; HUANG, 2011).

$$c_j(a, b) = \begin{cases} 0, & \text{se } g_j(b) - g_j(a) \geq p_j \\ 1, & \text{se } g_j(b) - g_j(a) < q_j \\ \frac{p_j - g_j(b) + g_j(a)}{p_j - q_j}, & \text{se } q_j \leq g_j(b) - g_j(a) < p_j \end{cases} \quad (3)$$

$$C(a,b) = \frac{\sum_{j=1}^n w_j c_j(a,b)}{\sum_{j=1}^n w_j} \quad (4)$$

$$d_j(a,b) = \begin{cases} 0, & \text{se } g_j(b) - g_j(a) < p_j \\ 1, & \text{se } g_j(b) - g_j(a) \geq v_j \\ \frac{-p_j - g_j(b) + g_j(a)}{v_j - p_j}, & \text{se } p_j \leq g_j(b) - g_j(a) < v_j \end{cases} \quad (5)$$

$$\sigma(a,b) = \begin{cases} C(a,b) \times \prod_{j=1}^n \frac{1-d_j(a,b)}{1-c(a,b)}, & \text{se } d_j(a,b) > C(a,b) \\ C(a,b), & \text{ao contrário} \end{cases} \quad (6)$$

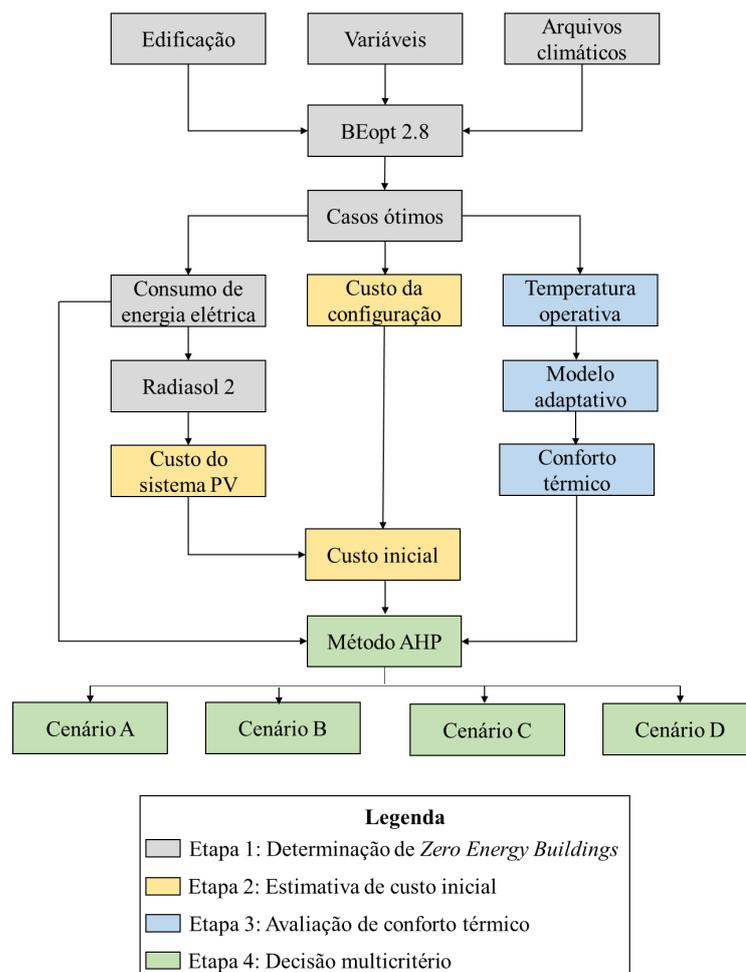
De acordo com Tzeng e Huang (2011), após a execução desses cálculos, deve ser aplicado o algoritmo de destilação para pré-ordenar as alternativas de forma descendente (Z_1) e ascendente (Z_2). Para determinar Z_1 , primeiramente é necessário definir o máximo valor do índice de credibilidade, a partir da Equação 7. Para cada alternativa, deve ser determinado o λ -forte, ou seja, o número de alternativas no conjunto atual para as quais a alternativa não é fortemente sobreclassificada por nenhuma outra. Além disso, para cada alternativa, deve ser determinado o λ -fraco, ou seja, o número de alternativas no conjunto atual para as quais a alternativa é preferida de forma fraca. Então, para cada alternativa definir sua qualificação, ou seja, λ -forte menos o λ -fraco. A alternativa com a maior qualificação é definida como a primeira na pré-ordem descendente. O procedimento se repete para determinar a posição das demais alternativas. Para determinar o Z_2 , o procedimento é semelhante, diferindo apenas na etapa final, em que a menor qualificação é definida como a primeira na pré-ordem ascendente. Por fim, a ordenação final será composta pela média aritmética das pré-ordenações descendente e ascendente de cada alternativa. Caso haja empate entre alternativas, o processo deve ser repetido apenas com as alternativas empatadas.

$$\lambda_{\text{máx}} = \text{máx } \sigma(a, b) \quad (7)$$

3 METODOLOGIA

O presente trabalho foi realizado em quatro etapas: (i) determinação de Edifícios de Energia Zero; (ii) estimativa de custo inicial; (iii) avaliação de conforto térmico; (iv) decisão multicritério. Para a definição dos edifícios de energia zero, foi utilizada uma tipologia arquitetônica representativa do Brasil. Então, foi realizada a determinação de *Zero Energy Buildings* em cada Zona Bioclimática inserida no Rio Grande do Sul. Após essa etapa, foi calculado o custo inicial de cada ZEB. Posteriormente, o conforto térmico das soluções foi avaliado. Por fim, foi realizada a decisão multicritério da solução mais adequada, em 4 cenários distintos, considerando diferentes pesos ao consumo de ar-condicionado, ao custo inicial e ao índice de conforto térmico de cada caso ótimo. O processo de execução da metodologia é apresentado na Figura 4.

Figura 5 - Fluxograma da metodologia



3.1 DETERMINAÇÃO DE NET ZERO ENERGY BUILDINGS

Nesta etapa, foram definidas as envoltórias ótimas para a determinação de *Net Zero Energy Buildings* nas Zonas Bioclimáticas 1, 2 e 3. Inicialmente, foi realizada a redução do consumo de energia elétrica para aquecimento e para resfriamento a partir da otimização da envoltória para cada Zona Bioclimática, resultando em casos ótimos. Em seguida, foi determinado o sistema fotovoltaico para suprir a demanda residual de cada caso ótimo.

3.1.1 Otimização da envoltória

O *software* BEopt, versão 2.8, desenvolvido pelo *National Renewable Energy Laboratory* (NREL), foi utilizado no processo de otimização da envoltória. Este *software* é utilizado para otimizar consumo energético de edificações residenciais. Para isso, é utilizado o algoritmo de busca sequencial (*Sequential Search Optimization Technique*), que combina as variáveis inseridas, determinando a alternativa de menor custo a cada ponto sequencial, buscando a redução do consumo energético (CHRISTENSEN *et al.*, 2005). O BEopt possibilita a definição da geometria da edificação, de parâmetros construtivos e cargas e realiza simulações a partir do *software* EnergyPlus (WILSON, Eric, 2015).

A etapa de otimização iniciou-se com a inserção dos dados de entrada no *software* BEopt, divididos em: edificação, variáveis e arquivos climáticos. Na sequência, foi executada a otimização. Os consumos e as orientações solares dos casos ótimos foram utilizados no dimensionamento do sistema fotovoltaico. Foram obtidas as irradiações solares em cada caso com o *software* Radiasol 2 e, então, foi determinado o sistema fotovoltaico para suprir a demanda energética de cada caso ótimo. Por fim, foi realizado o balanço energético dos casos ótimos para verificar se a demanda energética da edificação foi anulada pelo sistema fotovoltaico dimensionado.

3.1.1.1 Dados de entrada

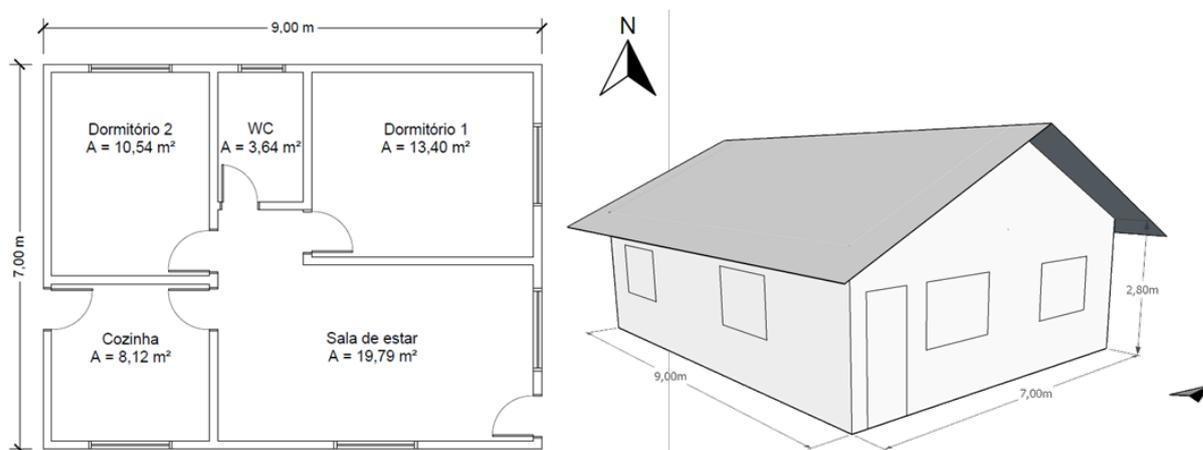
Para realizar a otimização com o *software* BEopt, foi necessário definir dados de entrada em três ambientes: *geometry screen*; *options screen*; e *site screen*. Em *geometry screen* foi feita a modelagem da edificação, na qual foram inseridas informações a respeito da geometria da edificação, como comprimento, largura e altura, quantidade de dormitórios e banheiros e a forma e inclinação do telhado. No ambiente *options screen* foram definidas configurações referentes a orientação solar, vedações verticais, forros, telhados, piso, portas e janelas, fluxos

de ar, equipamentos de condicionamento artificial, equipamentos elétricos, iluminação, entre outros. Nesta aba, foi necessário definir as configurações que seriam fixas e as que seriam variáveis para o processo de otimização. Em *site screen*, foi inserido o arquivo climático e puderam ser modificados alguns parâmetros de cálculo do consumo energético, como custo da energia elétrica, por exemplo. A seguir são descritos os dados de entrada inseridos no *software* BEopt.

3.1.1.1 Definição da edificação

De acordo com IBGE (2011), 86,85% das residências brasileiras são unifamiliares e 45,21% possuem dois dormitórios. Portanto, com o objetivo de analisar uma edificação residencial unifamiliar representativa do padrão brasileiro, foi definida a edificação apresentada por Sorgato, Melo e Lamberts (2016), com dois dormitórios, sala de estar, cozinha e banheiro, totalizando 63 m² de área, com pé direito de 2,80 m. A planta baixa e a perspectiva da edificação são apresentadas na Figura 5.

Figura 6 - Planta baixa e perspectiva da edificação



Fonte: Adaptado de Sorgato, Melo e Lamberts (2016).

O *software* BEopt, considera a edificação dividida em duas zonas térmicas, a primeira no ambiente interno da edificação e a segunda na região entre a cobertura e a laje. Entretanto, ainda é necessário informar a quantidade de dormitórios e banheiros e classificar a área da edificação como garagem ou espaço de utilização do usuário.

O consumo de energia elétrica de equipamentos adotado para a simulação foi de 140 kWh/mês, conforme o perfil de posse apresentado no estudo de Tavares (2006). Desse modo, foram considerados os seguintes equipamentos: televisor, ferro elétrico, refrigerador, ventilador, liquidificador, aparelho de som e chuveiro elétrico. Além disso, a densidade de carga de iluminação artificial de 5,0 W/m² foi considerada, conforme o RTQ-R (INMETRO, 2014).

Os termostatos de resfriamento e aquecimento e o período de acionamento do ar-condicionado foram definidos com base no Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência de Edificações Residenciais, o RTQ-R (INMETRO, 2014). A Tabela 1 descreve as características consideradas para o sistema de condicionamento de ar.

Tabela 1 - Características do sistema de condicionamento de ar

Categoria	Descrição
Termostato de resfriamento	24°C
Termostato de aquecimento	22°C
Período de acionamento	21:00 às 08:00
Índice de desempenho de resfriamento sazonal	3,00 W/W
Índice de desempenho de aquecimento sazonal	2,75 W/W
Fator de calor sensível	70%
Capacidade de resfriamento e aquecimento	Dimensionada automaticamente

Fonte: Adaptado de (INMETRO, 2012).

3.1.1.1.2 Variáveis da envoltória da edificação

Foram consideradas como variáveis as seguintes características da envoltória da edificação: (i) orientação solar; (ii) tipo de vedação vertical externa (transmitância térmica); (iii) cor da vedação vertical (absortância solar); (iv) espessura da barreira radiante na cobertura; (v) cor da cobertura (absortância solar); (vi) fator solar do vidro; (vii) percentual de área de janela total; (viii) distribuição do percentual de área de janela nas fachadas.

Quanto às orientações solares consideradas no trabalho, foram utilizados os pontos cardeais (Norte, Sul, Leste e Oeste) e colaterais (Nordeste, Sudeste, Sudoeste e Noroeste). As orientações foram inseridas no formato de grau, partindo do Norte (0°) até o Noroeste (315°).

Foram definidas 7 composições de vedações verticais, a partir do Anexo Geral V da Portaria n° 50/2013 do INMETRO, descritas na Tabela 2. As composições foram selecionadas com base nos valores mínimos admissíveis apresentados na NBR 15575-4 (ABNT, 2013a), com

capacidade térmica (CT) maior ou igual a 130 kJ/(m².K) e transmitância térmica (U) menor ou igual a 2,5 W/(m².K) para as Zonas Bioclimáticas 1, 2 e 3.

Tabela 2 - Composição das vedações verticais

(Continua)

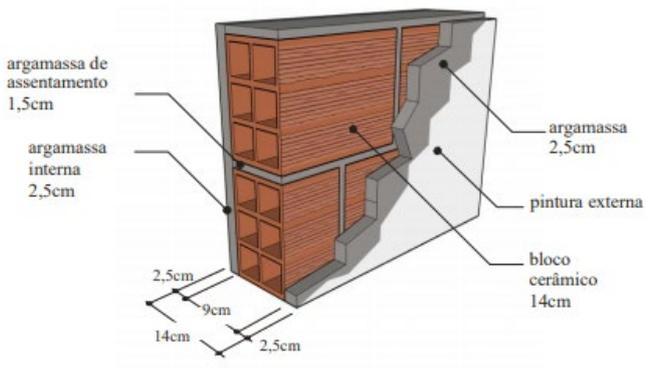
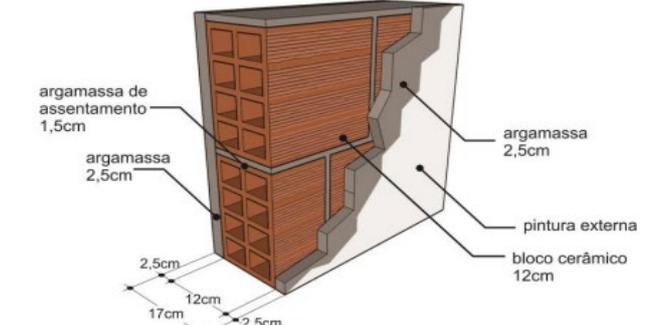
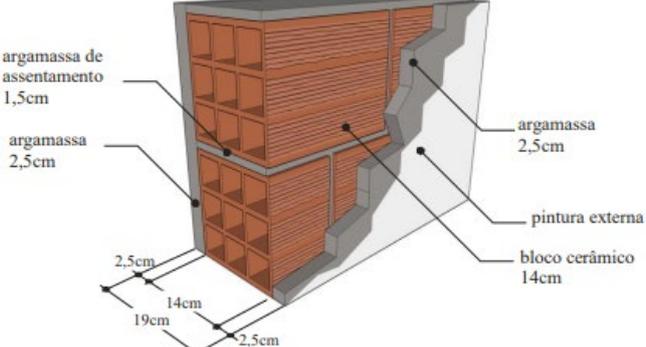
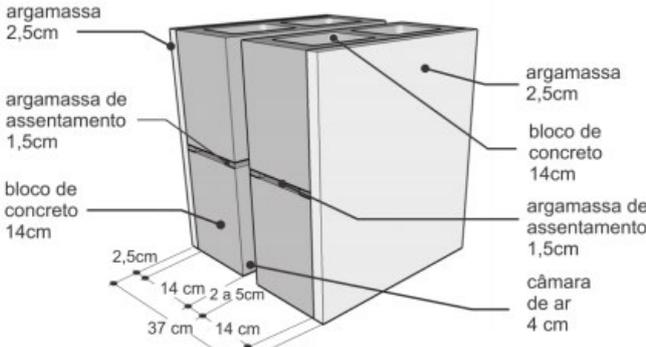
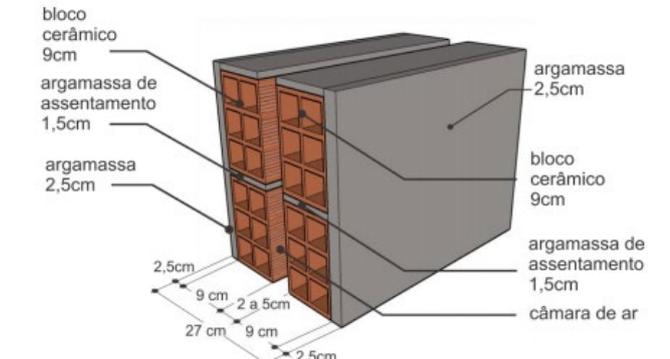
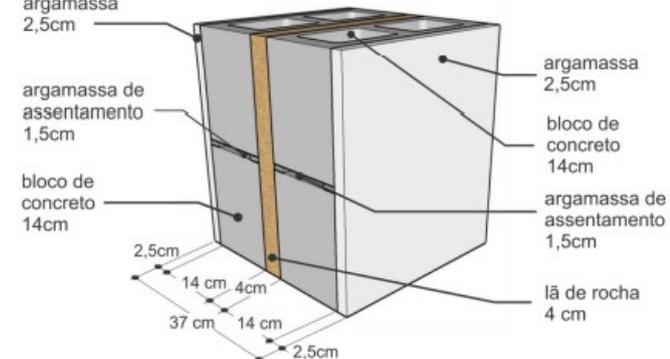
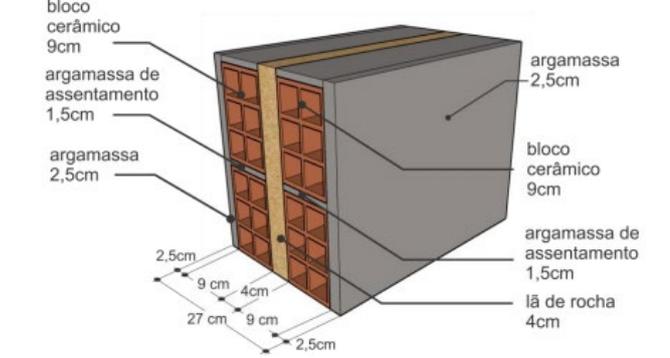
Item	Composição (cm)	U [W/(m ² .K)]	CT [kJ/(m ² .K)]
1	 <p>argamassa de assentamento 1,5cm argamassa interna 2,5cm argamassa 2,5cm pintura externa bloco cerâmico 14cm</p> <p>2,5cm 9cm 14cm 2,5cm</p>	2,46	150
2	 <p>argamassa de assentamento 1,5cm argamassa 2,5cm argamassa 2,5cm pintura externa bloco cerâmico 12cm</p> <p>2,5cm 12cm 17cm 2,5cm</p>	2,24	155
3	 <p>argamassa de assentamento 1,5cm argamassa 2,5cm argamassa 2,5cm pintura externa bloco cerâmico 14cm</p> <p>2,5cm 14cm 19cm 2,5cm</p>	1,85	161
4	 <p>argamassa 2,5cm argamassa de assentamento 1,5cm bloco de concreto 14cm argamassa 2,5cm bloco de concreto 14cm argamassa de assentamento 1,5cm câmara de ar 4 cm</p> <p>2,5cm 14 cm 37 cm 14 cm 2,5cm</p>	1,43	439

Tabela 3 - Composição das vedações verticais

(Continuação)

Item	Composição (cm)	U [W/(m ² .K)]	CT [kJ/(m ² .K)]
5	 <p>bloco cerâmico 9cm argamassa de assentamento 1,5cm argamassa 2,5cm argamassa 2,5cm bloco cerâmico 9cm argamassa de assentamento 1,5cm câmara de ar</p>	1,25	195
6	 <p>argamassa 2,5cm argamassa de assentamento 1,5cm bloco de concreto 14cm argamassa 2,5cm bloco de concreto 14cm argamassa de assentamento 1,5cm lã de rocha 4 cm</p>	0,90	441
7	 <p>bloco cerâmico 9cm argamassa de assentamento 1,5cm argamassa 2,5cm argamassa 2,5cm bloco cerâmico 9cm argamassa de assentamento 1,5cm lã de rocha 4cm</p>	0,63	199

Fonte: Autor, adaptado de INMETRO (2013).

As propriedades térmicas dos materiais que compõem as vedações verticais analisadas foram obtidas a partir da ABNT NBR 15220-2 (ABNT, 2005), que trata dos métodos de cálculo de características térmicas de elementos e componentes de edificações. Na Tabela 3 estão apresentadas propriedades térmicas dos materiais.

Tabela 4 - Propriedades térmicas dos materiais das vedações verticais

Material	Condutividade [W/(m.K)]	Densidade [kg/m³]	Calor específico kJ/(kg.K)
Argamassa	1,150	1800	1,00
Bloco cerâmico	0,900	1600	0,92
Bloco de concreto	1,750	2400	1,00
Lã de rocha	0,045	100	0,75

Fonte: Autor, adaptado de ABNT (2005).

A pintura externa das vedações verticais também foi definida a partir do Anexo Geral V, da Portaria n° 50/2013 do INMETRO. As cores de tinta acrílica semibrilho utilizadas na otimização são apresentadas na Tabela 4, bem como a sua absorvância solar (α) e a respectiva referência na portaria.

Tabela 5 - Cores de pintura externa das vedações verticais

Referência	Cor	Nome	α (%)
28		Pérola	33,9
27		Palha	39,6
18		Amarelo antigo	49,7
23		Cinza BR	61,1
30		Telha	69,6
32		Verde quadra	75,5
20		Azul	79,9
22		Cinza	86,6
29		Preto	97,1

Fonte: Autor, adaptado de INMETRO (2013).

A cobertura do modelo é composta por uma camada de laje pré-moldada cerâmica (12 cm), camada de ar (>5cm) e telhas cerâmicas, resultando em transmitância térmica de 1,79 W/(m².K) e capacidade térmica de 185 kJ/(m².K). Foram consideradas duas composições de cobertura: sem a presença de barreira radiante e com a utilização de barreira radiante aluminizada com 2 mm de espessura. Quanto à definição das cores da cobertura, foi utilizada a base de dados de absorvância de telhas de Dornelles (2021). A Tabela 5 apresenta as cores definidas, sua respectiva absorvância solar (α) e a referência no texto original.

Tabela 6 - Cores da cobertura

Referência	Cor	Nome	α (%)
TCE01		Branco	16
TCE03		Areia	27
TCE04		Cinza claro	34
TCE09		Cinza	40
TCE11		Ravena	47
TCE14		Verde claro	56
TCE17		Caramelo	62
TCE19		Grafite	73
TCE22		Bordô	79

Fonte: Autor, adaptado de INMETRO (2013).

Para as janelas, foram considerados dois tipos de vidros: simples (3mm), simples (6mm) e duplo (3+3mm) incolor. As propriedades dos vidros foram obtidas por meio do *Handbook of Fundamentals* (ASHRAE, 2017). A Tabela 6 apresenta o Fator Solar (FS) com ângulo de incidência normal (0°) dos vidros analisados.

Tabela 7 - Propriedades dos vidros

Descrição	Espessura (mm)	FS (%)
Simple, incolor	3	86
Simple, incolor	6	81
Duplo, incolor	3 + 3	76

Fonte: Autor, adaptado de ASHRAE (2017).

De acordo com a ABNT NBR 15575-4 (ABNT, 2021), áreas de permanência prolongada (como sala e dormitórios) com menos de 20 m², devem apresentar percentual de elementos transparentes menor ou igual a 20% em relação à área de piso. Como a edificação considera uma única zona térmica no ambiente interno, este índice foi considerado como o limite máximo para toda a edificação.

Para definir o limite mínimo a ser considerado no percentual de elementos transparentes, considerou-se o percentual mínimo de aberturas para ventilação de 7% para as Zonas Bioclimáticas 1, 2 e 3 e o desconto de 45% da janela para abertura de ventilação natural (ABNT, 2021). Dessa forma, o percentual de elementos transparentes mínimo foi definido em 16%. Portanto, foram considerados os seguintes valores: 16%, 17%, 18%, 19% e 20%. A Tabela 7

apresenta as distribuições do percentual de elementos transparentes em relação às fachadas frontal, posterior, lateral direita e lateral esquerda (FPDE) utilizadas no trabalho.

Tabela 8 - Distribuição do percentual de área de janela

Descrição FPDE	Fachada frontal (%)	Fachada posterior (%)	Fachada lateral direita (%)	Fachada lateral esquerda (%)
25FP-25DE	25	25	25	25
20FP-30DE	20	20	30	30
30FP-20DE	30	30	20	20

Fonte: Autor.

A Tabela 8 relaciona os valores das variáveis discretas consideradas neste estudo. São apresentados os valores de orientação solar (OS), transmitância térmica da vedação vertical (U_{vv}), absorvância solar da vedação vertical (α_{vv}), absorvância solar da cobertura (α_c), a espessura da barreira radiante (BR), o fator solar dos vidros (FS), o percentual de elementos transparentes (PET) e a distribuição de área de janela nas fachadas frontal, posterior, lateral direita e esquerda (FPDE).

Tabela 9 - Variáveis discretas consideradas na otimização

Variável	Unidade	Valores
OS	°	{0; 45; 90; 135; 180; 225; 270; 315}
U_{vv}	W/(m ² .K)	{2,46; 2,24; 1,85; 1,43; 1,25; 0,90; 0,63}
α_{vv}	%	{33,9; 39,6; 49,7; 61,1; 69,6; 75,5; 79,9; 86,6; 97,1}
α_c	%	{16; 27; 34; 40; 47; 56; 62; 73; 79}
BR	mm	{0, 2}
FS	%	{87; 81; 76}
PET	%	{16; 17; 18; 19; 20}
FPDE	%	{25,25,25,25; 20,20,30,30; 30,30,20,20}

Fonte: Autor.

3.1.1.1.3 Arquivos climáticos

Neste estudo, o processo de otimização foi executado para o clima do Rio Grande do Sul, considerando todas as Zonas Bioclimáticas inseridas no estado. Assim, foram definidos os arquivos climáticos para ZB1 (Zona Bioclimática 1), ZB2 (Zona Bioclimática 2) e ZB3 Zona

Bioclimática 3), do tipo TMY (*Typical Meteorological Year*). Os arquivos climáticos utilizados foram disponibilizados pela organização *Climate One Building* (2021). A Tabela 9 apresenta a descrição das cidades consideradas neste trabalho e a Tabela 10 mostra a temperatura de bulbo seco média, a umidade relativa média e a radiação solar média mensais das cidades analisadas.

Tabela 10 - Cidades consideradas

Cidade	Zona Bioclimática	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)
Bom Jesus	1	-28,667	-50,433	1048,0
Santa Maria	2	-29,700	-53,700	95,0
Porto Alegre	3	-29,994	-51,171	3,4

Fonte: Autor.

Tabela 11 - Caracterização climática

Mês	Temperatura de bulbo seco média (°C)			Umidade relativa média (%)			Radiação solar global média (Wh/m ²)		
	ZB1	ZB2	ZB3	ZB1	ZB2	ZB3	ZB1	ZB2	ZB3
Janeiro	20	24	25	78	79	79	498	524	472
Fevereiro	19	23	24	80	85	78	475	471	427
Março	18	21	23	80	84	76	450	441	401
Abril	16	18	20	79	87	77	376	362	329
Mai	13	14	16	83	88	80	295	281	271
Junho	11	13	14	79	87	79	269	243	241
Julho	11	12	14	76	83	83	291	261	239
Agosto	13	14	16	74	81	74	349	334	305
Setembro	14	15	17	72	83	84	410	376	342
Outubro	15	18	19	77	80	77	470	429	418
Novembro	17	21	22	71	76	76	524	506	458
Dezembro	19	22	23	76	73	74	498	544	497

Fonte: Autor.

3.1.1.2 Dados de saída

Durante o processo de otimização com o *software* BEopt, foi necessário definir o caso de referência, a partir do qual os valores das variáveis de envoltória eram combinados em busca da redução do consumo de energia elétrica para aquecimento e resfriamento da edificação. Portanto, foi realizada a otimização inicial para cada Zona Bioclimática e, então, foi definido o

caso de maior consumo como o caso de referência. Então, foi realizada a otimização definitiva da envoltória.

Após a execução da otimização, o *software* aponta casos ótimos encontrados no caminho percorrido até a obtenção do caso de menor consumo, também considerado um caso ótimo. São definidos como casos ótimos: o caso de menor consumo; o caso com a configuração (conjunto de valores para cada variável) de menor custo; e os casos com configuração de menor custo em cada interação de variáveis. Dessa forma, soluções intermediárias podem ser adotadas conforme a preferência do projetista (WILSON, Eric, 2015).

Os casos simulados e os casos ótimos definidos são apresentados em um gráfico, relacionando o consumo de energia elétrica e o custo da configuração. Assim, é possível identificar nos resultados as configurações dos casos, o consumo de energia elétrica, o consumo discriminado para aquecimento, resfriamento, iluminação e equipamentos, valores horários de consumo, temperatura, infiltração, umidade relativa, entre outros parâmetros.

3.1.2 Geração de energia fotovoltaica

Após a execução da otimização definitiva, resultou-se no consumo de energia elétrica para cada interação realizada entre as variáveis. Entretanto, de acordo com a Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012, é necessário o pagamento do custo de disponibilidade por parte de unidades consumidoras de baixa tensão, mesmo que a produção de energia supere o seu consumo. A Resolução Normativa ANEEL nº 414/2010 destaca que o faturamento mensal para esses casos deve ocorrer em moeda corrente equivalente a: 30 kWh, se monofásico ou bifásico a 2 condutores; 50 kWh, se bifásico a três condutores; ou 100 kWh, se trifásico. Portanto, como a edificação necessita de ligação bifásica, foi realizado o dimensionamento do sistema fotovoltaico considerando o consumo com desconto de 50 kWh como a energia a ser compensada para cada configuração ótima para todas as cidades analisadas.

Dessa forma, o dimensionamento do sistema fotovoltaico de geração de energia elétrica foi realizado a partir de dados obtidos por meio do *software Radasol*, desenvolvido pelo Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. A partir da orientação solar, da inclinação do módulo fotovoltaico e da posição geográfica são calculados os valores de irradiação média disponível. Com isso, foi possível calcular a quantidade de módulos fotovoltaicos necessários para produzir a energia elétrica para a edificação, baseando-se no seu consumo de energia elétrica.

Inicialmente, determinou-se a utilização da placa solar modelo Canadian CS3U-360PB-AG, com potência máxima nominal de 360 (Wp). Então, foi determinada a potência total (Pt) necessária para o funcionamento do sistema (8), a partir do consumo médio mensal de energia elétrica (E_{pv}), da irradiação média diária disponível para 30 dias (I_{rr}) e do rendimento do sistema (Pr), considerado 80%. Em seguida, foi calculada a quantidade de módulos (N) necessários para suprir a demanda (Equação 9), com base na potência necessária (P_n) e na potência do módulo (P_m). Em seguida, foi calculada a potência máxima instalada (P_{mi}), conforme a Equação 10. Na sequência, calculou-se a potência necessária para o inversor (P_i), considerando perda de 10% (Equação 11). Por fim, foi calculada a geração anual de energia elétrica (E_{pv}) a partir do sistema fotovoltaico (Equação 12).

$$P_n = \frac{E_{pv}}{(I_{rr} \times 30 \times Pr)} \quad (8)$$

$$N = \frac{P_n}{P_m} \quad (9)$$

$$P_{mi} = N \times P_m \quad (10)$$

$$P_i = P_{mi} \times 1,1 \quad (11)$$

$$E_{pv} = P_{mi} \times I_{rr} \times 365 \times Pr \quad (12)$$

Então, foi realizada a análise de correspondência de carga, por meio do *load matching index*. De acordo com Sartori, Napolitano e Voss (2012), esse índice avalia a correspondência temporal entre a produção e a utilização da energia elétrica, indicando a sinergia entre o padrão de uso da edificação e a rede de energia elétrica. Quando o *load matching index* resulta em um valor baixo, significa que a edificação dependerá mais da rede de energia elétrica, mas se for alto, o consumo e a produção de energia estão mais correlacionados e a edificação tem maior possibilidade de atingir o autoconsumo. A Equação 13 apresenta a equação para o cálculo do *load matching index*, onde “N” é o número de dados; “g” e “l” são a geração e o consumo de energia elétrica, respectivamente; e “t” é o intervalo de tempo.

$$f_{\text{load}, i} = \frac{1}{N} \times \sum_{\text{ano}} \text{mín} \left[1, \frac{g_i(t)}{l_i(t)} \right] \quad (13)$$

Também foi necessário analisar a interação do sistema fotovoltaico com a rede de energia elétrica, utilizando o *grid interaction index*. Sartori, Napolitano e Voss (2012) definem esse índice como a representação do desvio padrão do fluxo de energia em um ano, normalizado no maior valor absoluto. Portanto, o *grid interaction index* descreve a variação da troca de energia da edificação com a rede de energia elétrica. A Equação 14 apresenta o método de cálculo do *grid interaction index*, onde “e” e “d” são a quantidade de energia exportada e importada, respectivamente; e “t” é o intervalo de tempo.

$$f_{\text{grid}, i} = \text{STD} \left\{ \frac{e_i(t) - d_i(t)}{|\text{máx}[e_i(t) - d_i(t)]|} \right\} \quad (14)$$

3.2 ESTIMATIVA DE CUSTO INICIAL

O custo inicial foi calculado a partir do somatório entre o custo da construção da edificação, o custo da envoltória e o custo do sistema fotovoltaico para cada caso ótimo. O custo da construção da edificação foi estimado a partir de orçamentação utilizando como referência o Sistema Nacional de Preços e Índices para a Construção Civil (SINAPI). O custo da envoltória foi obtido pelo processo de otimização, no qual os custos das variáveis consideradas foram somados para cada caso apontado como ótimo. Enquanto o custo do sistema fotovoltaico foi estimado a partir de pesquisa de preço, conforme o trabalho de Dantas e Pompermayer (2018).

Inicialmente foi realizada a descrição das etapas da construção da edificação e, então, foi feita a composição dos custos, considerando os valores indicados pelo SINAPI do tipo não desonerado para o estado do Rio Grande do Sul em janeiro de 2021, conforme a Tabela 11.

É importante ressaltar que, para a realização do orçamento da construção, não foram consideradas as paredes externas e as janelas da edificação, que variaram a cada caso e seus custos seriam adicionados posteriormente. Os custos relacionados à envoltória também foram levantados a partir de consulta às tabelas de insumos e composições do tipo não desonerado do SINAPI, para o estado do Rio Grande do Sul em janeiro de 2021. Foram inseridos no programa de otimização apenas os custos correspondentes ao tipo de vedação vertical, ao tipo de vidro e à presença de barreira radiante, pois os demais custos foram levantados durante a orçamentação.

Tabela 12 - Orçamento da construção

Código	Etapa	Custo (R\$)
B-1	Serviços iniciais	8.661,05
B-2	Infraestrutura e obras complementares	7.621,12
B-3	Superestrutura	11.324,85
B-4	Paredes internas	11.114,94
B-5	Coberturas e proteções	13.262,44
B-6	Revestimentos e pinturas	6.601,69
B-7	Pavimentações	4.630,68
B-8	Instalações e aparelhos	13.275,52
B-9	Complementação da obra	948,25
Total		77.440,54

Fonte: Autor.

É importante ressaltar que, para a realização do orçamento da construção, não foram consideradas as paredes externas e as janelas da edificação, que variaram a cada caso e seus custos seriam adicionados posteriormente. Os custos relacionados à envoltória também foram levantados a partir de consulta às tabelas de insumos e composições do tipo não desonerado do SINAPI, para o estado do Rio Grande do Sul em janeiro de 2021. Foram inseridos no programa de otimização apenas os custos correspondentes ao tipo de vedação vertical, ao tipo de vidro e à presença de barreira radiante, pois os demais custos foram levantados durante a orçamentação.

O custo do sistema fotovoltaico foi estimado a partir do somatório entre o preço das placas solares, do inversor, o quadro de proteção de corrente contínua (*stringbox*) e o custo de instalação. A placa solar utilizada no dimensionamento fotovoltaico é a Canadian CS3U-360PB-AG, de 360 Wp. Além disso, foi considerado o inversor Canadian CSI-3.0KTL1P-GI-FL, de 3,0 kWh. A Tabela 12 apresenta a descrição de cada item que contribui para o custo do sistema fotovoltaico.

Tabela 13 - Custo de itens do sistema fotovoltaico

Item	Descrição	Custo unitário (R\$)
Placa solar	Canadian CS3U-360PB-AG	1.069,99
Inversor	Canadian CSI-3.0KTL1P-GI-FL	3.474,90
<i>Stringbox</i>	SBC02/01 1000V	669,95
Instalação*	Aproximado, por placa	250,00

*De acordo com Dantas e Pompermayer (2018).

Fonte: Autor.

3.3 MODELO ADAPTATIVO

Nesta etapa foram estimados os percentuais de desconforto por frio e por calor e de conforto de cada configuração ótima para as Zonas Bioclimáticas 1, 2 e 3. Para isso, os casos ótimos determinados nas etapas anteriores foram simulados, considerando-os ventilados naturalmente ao longo de todo o ano de simulação e as temperaturas operativas foram utilizadas para o cálculo dos índices de conforto térmico pelo modelo adaptativo.

A ventilação natural foi considerada durante todo o ano, nos sete dias da semana, cuja operação ocorreu de acordo com os termostatos de resfriamento e aquecimento estabelecidos no *Building America House Simulation Protocols* (WILSON, E. *et al.*, 2014). Durante o inverno, a ventilação natural foi interrompida quando a temperatura operativa se encontrava abaixo de 24°C e, durante o restante do ano, quando a temperatura operativa estava abaixo de 22°C.

Após a simulação, a temperatura operativa da edificação (T_i) foi comparada com os limites superior e inferior descritos na Equação 15 e na Equação 16. O acréscimo de 3,5 °C para compor o limite superior à temperatura neutra (T_n) e a redução de 3,5 °C para o limite inferior são determinados pela norma ASHRAE 55 (2017) para aceitabilidade térmica de aproximadamente 80%. A Equação 17 foi utilizada para calcular a temperatura neutra (T_n), a partir da temperatura externa (T_e), de acordo com ASHRAE (2017).

$$L_{\text{sup}} = T_n + 3,5 \quad (15)$$

$$L_{\text{inf}} = T_n - 3,5 \quad (16)$$

$$T_n = 17,80 + 0,31T_e \quad (17)$$

Assim, considerou-se como hora de desconforto, quando a temperatura operativa da edificação (T_i) não se encontrava dentro dos limites estabelecidos. Quando a T_i era menor que o limite inferior, classificou-se o período como desconfortável por frio. Por outro lado, quando a T_i era maior que o limite superior, o período foi classificado como desconfortável por calor.

3.4 DECISÃO MULTICRITÉRIO

Para avaliar os casos ótimos, foi utilizado o modelo de decisão multicritério ELECTRE III, de modo a ordenar as alternativas. Foram considerados critérios de análise: consumo de ar-condicionado (C); custo inicial (Ci); e o índice de conforto térmico (Ct). Para definir os pesos dos critérios, foi utilizado o procedimento de julgamento de importância do modelo de Processo Hierárquico Analítico, desenvolvido por Saaty (1987), de acordo com a escala apresentada na Tabela 13.

Tabela 14 - Escala numérica para o julgamento de alternativas

Valor	Significância
1	Igual importância
3	Importância moderada
5	Grande importância
7	Importância muito grande
9	Extrema importância
2, 4, 6, 8	Valores intermediários entre dois julgamentos adjacentes

Fonte: Autor, adaptado de Saaty (1987).

Além disso, foram utilizados 4 cenários de julgamento dos critérios: o primeiro, considera igual importância para todos os critérios; o segundo cenário considera o consumo de condicionamento artificial com importância moderada intermediária (valor 2 da escala), frente aos demais critérios; o terceiro cenário atribui importância moderada intermediária para o custo inicial; e o quarto cenário considera o conforto térmico como de importância moderada intermediária. A Tabela 14 apresenta os pesos de cada critério para os cenários analisados.

Tabela 15 - Cenários de julgamento

Cenário	Peso (%)		
	C	Ci	Ct
A	33,33	33,33	33,33
B	50,00	25,00	25,00
C	25,00	50,00	25,00
D	25,00	25,00	50,00

Fonte: Autor.

Para cada cenário, foi calculado o autovetor normalizado de cada linha da matriz de critérios. A matriz resultante desta operação e a matriz da soma das colunas da matriz de critérios foram utilizadas no cálculo do autovalor. A taxa de consistência (CR), conforme a Equação 18, mede a coerência do julgamento dos critérios com base no índice de consistência (CR), no autovalor a matriz de critérios ($\lambda_{\text{máx}}$), na ordem da matriz de critérios (n) e no índice de consistência randômico (RI). O Índice de consistência randômico varia de acordo com a ordem da matriz de critérios (Tabela 15). Se o CR for maior que 10%, o julgamento deve ser refeito (SAATY, 1987). Em todos os cenários avaliados, o índice de consistência foi zero.

$$CR = \frac{\lambda_{\text{máx}} - n}{(n - 1) \times RI} \quad (18)$$

Tabela 16 - Índice de consistência randômico

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
CI	0,00	0,00	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Fonte: Adaptado de Saaty (1987).

Na sequência, foram definidos os valores dos limiares de indiferença, preferência e veto, necessários para a aplicação do ELECTRE III. O limiar de indiferença é descrito como o valor abaixo do qual a escolha de uma alternativa seja indiferente sobre outra. O limiar de preferência significa o valor a partir do qual o decisor prefere uma alternativa sobre outra. O limiar de veto representa o valor de discordância de uma alternativa sobre outra que demanda a negação desta alternativa por parte do decisor (ROGERS; BRUEN, 1998). Os valores dos limiares, na Tabela 16, foram expressos em função de porcentagem em relação à média de cada critério, conforme Harkouss, Fardoun e Biwole (2018).

Tabela 17 - Limiares adotados

Limiar	Percentual em relação à média
Indiferença	5%
Preferência	10%
Veto	30%

Fonte: Adaptado de Harkouss, Fardoun e Biwole (2018).

O próximo passo foi analisar os critérios de decisão. Para aplicar o método ELECTRE III, todos os critérios devem ser maximizados, ou seja, quanto maior o valor da alternativa naquele critério, melhor (ROY, 1991). Dessa forma, como os critérios de condicionamento artificial e custo inicial não satisfazem essa premissa, foi necessário realizar o procedimento de harmonização dos valores das alternativas referentes a esses critérios. A harmonização foi feita dividindo cada valor pelo somatório dos valores para todas as alternativas. Então, foi feita a normalização de todos os valores das alternativas. Após esse procedimento, foram inseridos no *software* J-ELECTRE versão 3.0 os limiares de indiferença, preferência e veto, os pesos e os valores correspondentes às alternativas, considerando os cenários A, B, C e D. Após a execução do cálculo, o *software* apresenta a ordenação das alternativas.

4 RESULTADOS

Neste capítulo, serão apresentados e discutidos os resultados do processo de determinação de *Net Zero Energy Buildings* para as Zonas Bioclimáticas 1, 2 e 3, da estimativa de custo inicial das soluções apresentadas, da determinação do índice de conforto térmico de cada caso ótimo e da aplicação do método de decisão multicritério ELECTRE III.

4.1 NET ZERO ENERGY BUILDINGS

4.1.1 Otimização da envoltória

Inicialmente, a otimização para cada Zona Bioclimática foi executada, o caso com maior consumo energético foi definido como edificação de referência, que foi utilizado como configuração inicial na segunda execução da otimização. A partir dessa configuração inicial, a otimização buscou a redução do consumo de energia elétrica comutando os valores das variáveis consideradas. A partir da execução da otimização definitiva da envoltória com o *software* BEOpt, foram realizadas 768 simulações para a ZB1, 830 para a ZB2 e 853 para a ZB3. A Figura 6 apresenta a relação entre o consumo de energia elétrica total das edificações da ZB1 em relação ao custo da sua envoltória, destacando os 13 casos ótimos encontrados. Na Figura 7 são apresentados os resultados da ZB2, evidenciando os 11 casos ótimos obtidos. Enquanto na Figura 8 são exibidos os casos simulados para a ZB3 e seus 11 casos ótimos.

Figura 7 - Otimização da envoltória na ZB1

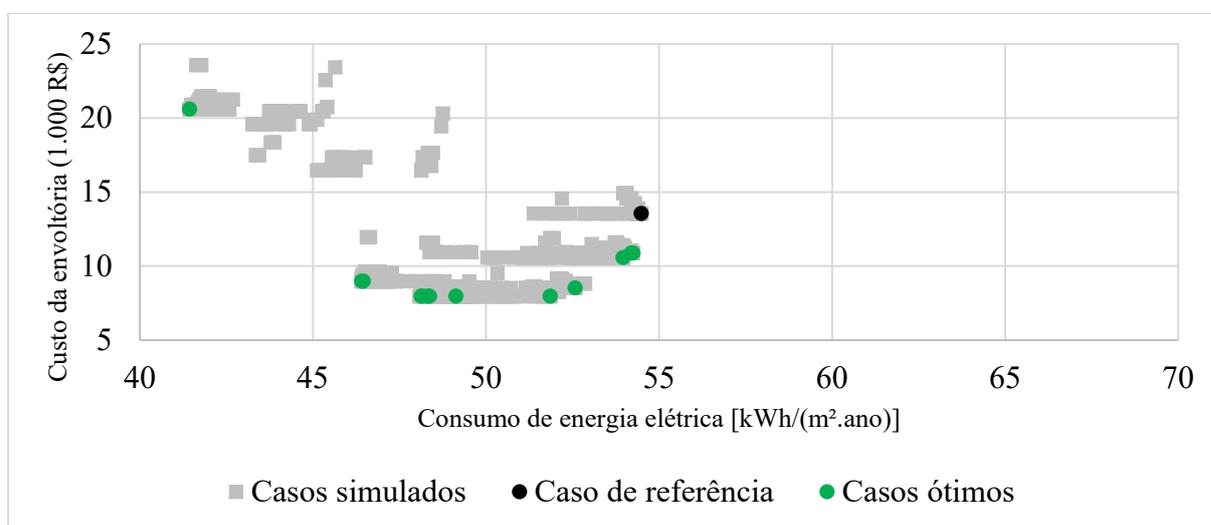
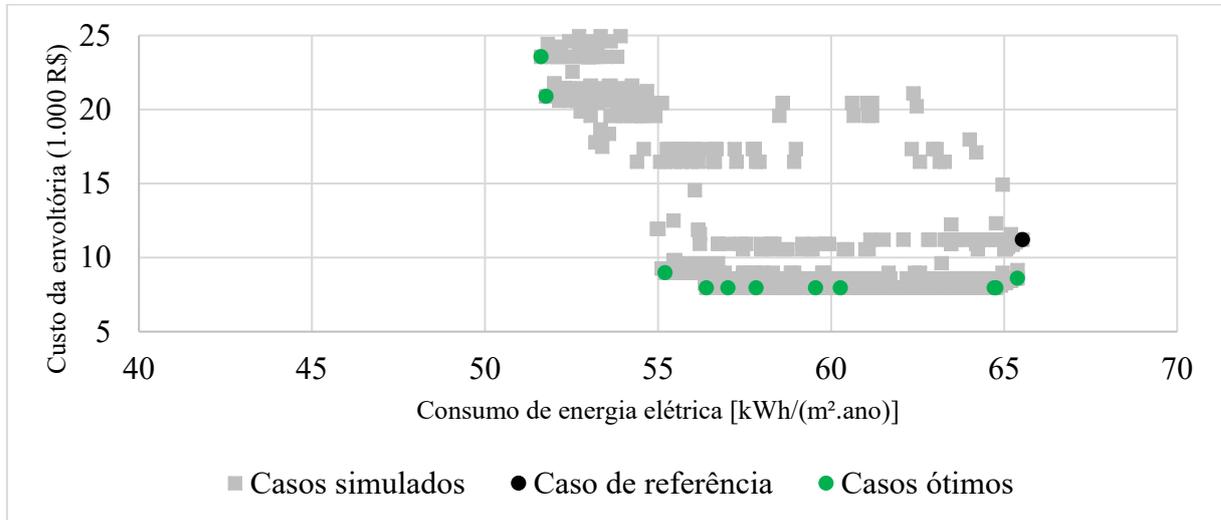
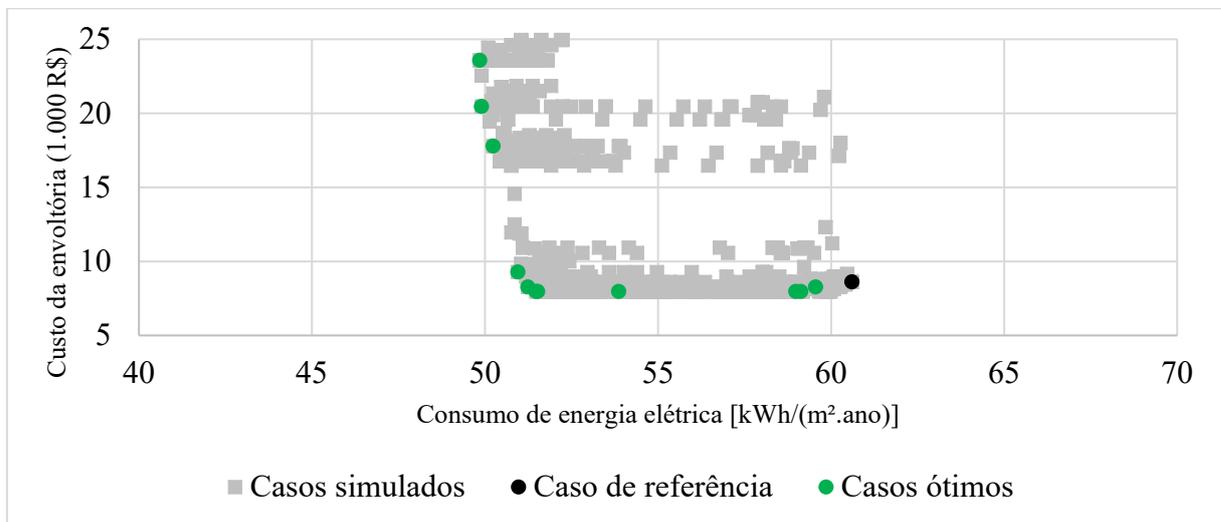


Figura 8 - Otimização da envoltória na ZB2



Fonte: Autor.

Figura 9 - Otimização da envoltória na ZB3



Fonte: Autor.

Para a ZB1, os custos da envoltória dos casos simulados apresentaram variação de até 66,21% e para a ZB2 e a ZB3 a variação foi de no máximo 68,09%. A diferença entre as variações se deve ao algoritmo de otimização, que combina as variáveis que promovem a redução do consumo energético diante das condições climáticas impostas. Dessa forma, a combinação das variáveis pode ser diferente para cada Zona Bioclimática. Observa-se que os

casos com menores custos de envoltória não estão associados somente aos maiores consumos de energia elétrica para operação da edificação. Portanto, os elementos da envoltória com menor custo não são necessariamente menos eficientes energeticamente.

A alteração da configuração de envoltória pode reduzir significativamente a demanda energética de aquecimento e resfriamento. Analisadas separadamente, as reduções de consumo para resfriamento e aquecimento apresentam valores consideráveis, conforme a Tabela 17. Entretanto, como a determinação de uma envoltória favorável à redução do consumo para aquecimento pode ser desfavorável ao consumo de resfriamento e vice-versa, é necessário analisar o consumo total de ar-condicionado das edificações.

Tabela 18 - Variação do consumo para aquecimento e resfriamento

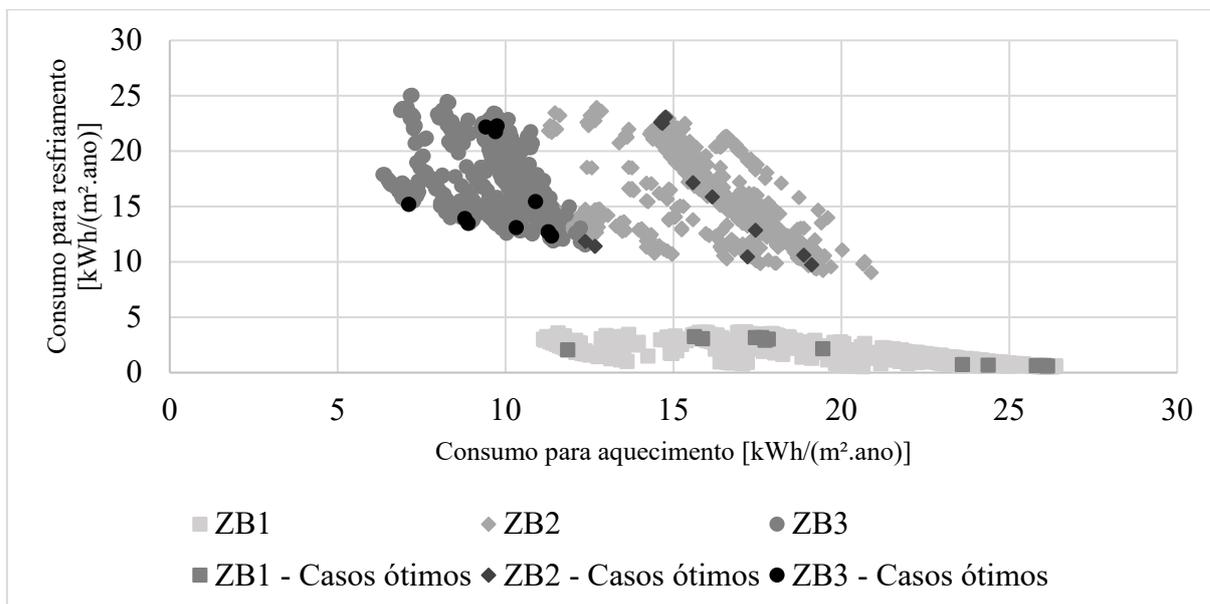
Zona Bioclimática	Consumo para aquecimento [kWh/(m ² .dia)]			Consumo para resfriamento [kWh/(m ² .dia)]		
	Mínimo	Máximo	Variação	Mínimo	Máximo	Variação
1	11,14	26,38	57,77%	0,53	3,68	85,60%
2	10,66	20,89	48,97%	9,03	23,95	62,30%
3	6,36	12,38	48,63%	11,52	25,05	54,01%

Fonte: Autor.

A partir da comparação dos casos de maior e menor consumo de ar-condicionado em cada Zona Bioclimática, observa-se que diante das variáveis consideradas, a ZB1 tem o maior potencial de redução do consumo de energia elétrica para condicionamento artificial (48,40%), seguida da ZB2 (36,60%) e da ZB3 (32,51%). Dalbem *et al.* (2019) obtiveram economia de 59,51% na ZB1, 60,92% na ZB2 e 42,97% na ZB3. Estes resultados possivelmente apresentaram maior redução do consumo pela utilização de variáveis contínuas, pela avaliação de isolamento na cobertura e no piso e pela utilização de sistema de ventilação mecânica com recuperador de calor, buscando otimizar a envoltória para o atendimento aos requisitos de Passive House.

A Figura 9 apresenta a relação entre os consumos de energia elétrica para aquecimento e para resfriamento nas Zonas Bioclimáticas avaliadas. É possível identificar a influência das condições climáticas sobre a demanda do uso de ar-condicionado. Também são destacados os casos ótimos obtidos para cada Zona Bioclimática.

Figura 10 - Consumo para aquecimento e resfriamento



Fonte: Autor.

Enquanto os casos da ZB1 se concentram na região do gráfico com maior consumo para aquecimento e menor para resfriamento, os casos da ZB3 se encontram na região oposta. Por outro lado, os casos da ZB2 apresentam maior equilíbrio entre os consumos de energia elétrica para aquecimento e para resfriamento. Além disso, quanto mais próximo o ponto se encontra da origem do sistema de coordenadas, maior a sua eficiência energética.

A seguir são descritos os resultados de configuração de envoltória dos casos ótimos e de referência e seus respectivos consumos de ar-condicionado localizados nas Zonas Bioclimáticas 1, 2 e 3. Aos casos de referência foram atribuídas as siglas CR-1, para a ZB1, CR-2 para a ZB2 e CR-3 para a ZB3. Os casos ótimos foram identificados como “CX-Y”, sendo X a ordem de surgimento do caso ótimo e Y a Zona Bioclimática a que pertence (1, para ZB1, 2 para ZB2 e 3 Para ZB3).

4.1.1.1 Zona Bioclimática 1

Após a execução da otimização da edificação na ZB1, foram obtidas as configurações de envoltória dos casos ótimos e do caso de referência (de maior consumo), de acordo com a Tabela 18. Entende-se por configuração de envoltória o conjunto de valores determinados para as variáveis avaliadas.

Tabela 19 – Configuração dos casos da ZB1

Caso	OS (°)	U _{vv} [W/(m ² .K)]	α _{vv} (%)	α _c (%)	BR (mm)	FS (%)	PET (%)	FPDE (%)
CR-1	270	2,46	33,9	16	0	76	16	25FP-25DE
C01-1	270	2,46	33,9	16	0	81	16	25FP-25DE
C02-1	270	2,46	33,9	16	0	81	16	30FP-20DE
C03-1	45	2,46	33,9	16	0	87	16	25FP-25DE
C04-1	270	2,24	33,9	16	0	87	16	25FP-25DE
C05-1	45	1,85	33,9	16	0	87	16	25FP-25DE
C06-1	0	1,85	69,6	56	0	87	16	25FP-25DE
C07-1	180	1,85	97,1	47	0	87	16	25FP-25DE
C08-1	0	1,85	97,1	56	0	87	16	30FP-20DE
C09-1	180	1,85	97,1	47	0	87	16	30FP-20DE
C10-1	180	1,85	97,1	56	0	87	16	30FP-20DE
C11-1	180	1,85	97,1	56	2	87	16	30FP-20DE
C12-1	180	1,85	97,1	79	2	87	16	30FP-20DE
C13-1	180	0,90	97,1	16	2	87	16	30FP-20DE

Fonte: Autor.

Quanto à orientação solar, a fachada voltada para o sul é mais frequente entre os casos ótimos (46,15%), predominantemente nos casos com menor consumo energético. Dessa forma, é possível inferir que, associada a algumas características da envoltória – como a distribuição de elementos transparentes e o fator solar dos vidros, a orientação sul é mais favorável à manutenção da temperatura de conforto no interior da edificação localizada na ZB1.

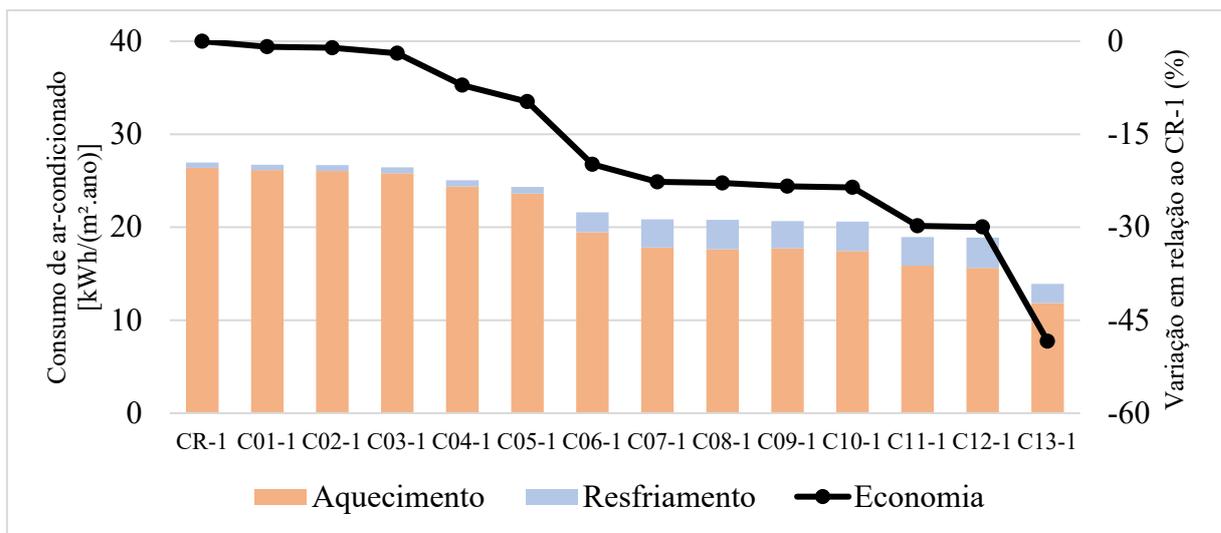
A vedação vertical composta por argamassa interna (2,5 cm), bloco cerâmico (14,0 cm) e argamassa externa (2,5 cm) se apresentou como mais frequente entre os casos ótimos (61,54%). Entretanto, o caso C13-1, de menor consumo, apresenta transmitância térmica ainda menor, indicando que a demanda energética de ar-condicionado pode ser reduzida com a utilização de paredes com maior resistência térmica. Além disso, quanto maior a absorvância térmica das vedações verticais (α_{vv}), maior a redução do consumo para a ZB1, pois a cor preta, apresentou maior frequência entre os casos ótimos (53,85%). Essa ocorrência é devida à maior absorção de calor da edificação pintada de preto, reduzindo o desconforto por frio na edificação.

A absorvância solar da cobertura (α_c) de 16%, referente ao branco, é uma característica de 46,15% dos casos ótimos. O que indica que cores mais claras na cobertura são favoráveis à edificação localizada na ZB1. Além disso, a não utilização de barreira radiante na cobertura esteve presente em 76,92% dos casos ótimos, porém os casos com menor consumo energético apresentaram barreira radiante de 2 mm. Isso indica que a utilização da barreira radiante, apesar de favorável, pode ser desconsiderada em alguns casos por elevar o custo inicial da edificação.

O vidro simples de 3 mm de espessura foi escolhido em 84,62% dos casos ótimos, o que indica a necessidade de ganho solar por meio dos elementos transparentes nas condições climáticas da ZB1. Porém, em todos os casos ótimos o menor percentual de elementos transparentes, de 16%, foi definido. Essa característica pode ser devido à necessidade de reduzir a perda de calor ao ambiente por meio destes elementos. Além disso, em 53,85% dos casos ótimos, foi definida a distribuição de elementos transparentes de 30% nas fachadas frontal e posterior e 20% nas fachadas laterais direita e esquerda. Essa distribuição favorece o aquecimento solar passivo durante o inverno e reduz a entrada de energia solar durante o verão.

Também foi possível extrair dos resultados os consumos de ar-condicionado dos casos. A Figura 10 apresenta os consumos discriminados para aquecimento e resfriamento e a economia de consumo de ar-condicionado em relação ao caso de referência CR-1.

Figura 11 - Consumo de energia ar-condicionado dos casos da ZB1



Fonte: Autor.

É evidente o baixo consumo de ar-condicionado para os casos localizados na Zona Bioclimática 1 devido às condições climáticas locais. Os resultados mostram que o consumo para aquecimento em todos os casos é maior que o consumo para resfriamento. Porém, a proporção de consumo para aquecimento e para resfriamento varia. Em C01-1, o caso ótimo com maior consumo de ar-condicionado, o consumo de aquecimento representa 97,85% de todo o consumo para condicionamento artificial, enquanto no caso C13-1, o de menor consumo, o índice é de 85,22%. À medida que o consumo de energia para aquecimento é reduzido, o

consumo de resfriamento tende a aumentar, mas não em todos os casos ótimos. No caso C13-1, por exemplo, houve redução de 31,85% no consumo para aquecimento e de 58,14% no consumo para resfriamento em relação ao caso C12-1.

Os casos C01-1, C02-1 e C03-1 apresentam consumo de ar-condicionado 1,95% inferior ao CR-1. Os casos C04-1 e C05-1 têm melhores resultados, com economia de consumo de 7,09% e 9,75%, respectivamente. Os casos C06-1 a C10-1 apresentam consumo de energia para ar-condicionado com redução entre 19,86% e 23,58%. Os casos C11-1 e C12-1 consomem 29,79% e 29,96% a menos de ar-condicionado que o caso de referência. O caso C13-1 consome 48,40% a menos de ar-condicionado que o CR-1. A diferença entre os casos C12-1 e C13-1 pode ser justificada pelo maior isolamento da vedação vertical em C13-1.

4.1.1.2 Zona Bioclimática 2

As configurações de envoltória dos casos ótimos e do caso de referência localizados na Zona Bioclimática 2 estão apresentadas na Tabela 19.

Tabela 20 - Configuração dos casos da ZB2

Caso	OS (°)	U _v [W/(m ² .K)]	α _v (%)	α _c (%)	BR (mm)	FS (%)	PET (%)	FPDE (%)
CR-2	135	2,46	97,1	79	0	87	20	30FP-20DE
C01-2	135	1,85	97,1	79	0	87	20	30FP-20DE
C02-2	135	1,85	97,1	79	0	87	16	30FP-20DE
C03-2	135	1,85	97,1	79	0	87	16	20FP-30DE
C04-2	0	1,85	97,1	16	0	87	16	30FP-20DE
C05-2	0	1,85	86,6	16	0	87	16	30FP-20DE
C06-2	180	1,85	61,6	16	0	87	16	30FP-20DE
C07-2	270	1,85	39,6	16	0	87	16	25FP-25DE
C08-2	180	1,85	33,9	16	0	87	16	30FP-20DE
C09-2	180	1,85	33,9	16	2	87	16	30FP-20DE
C10-2	180	0,90	33,9	16	2	81	16	30FP-20DE
C11-2	180	0,90	33,9	16	2	76	16	30FP-20DE

Fonte: Autor.

A partir do detalhamento das configurações de envoltória na Tabela 19 é possível verificar que 38,46% dos casos ótimos apresentam orientação solar voltada para o sul. Assim como nos resultados da ZB1, em conjunto com outras características, essa configuração deve propiciar temperaturas mais confortáveis no interior da edificação localizada na ZB2.

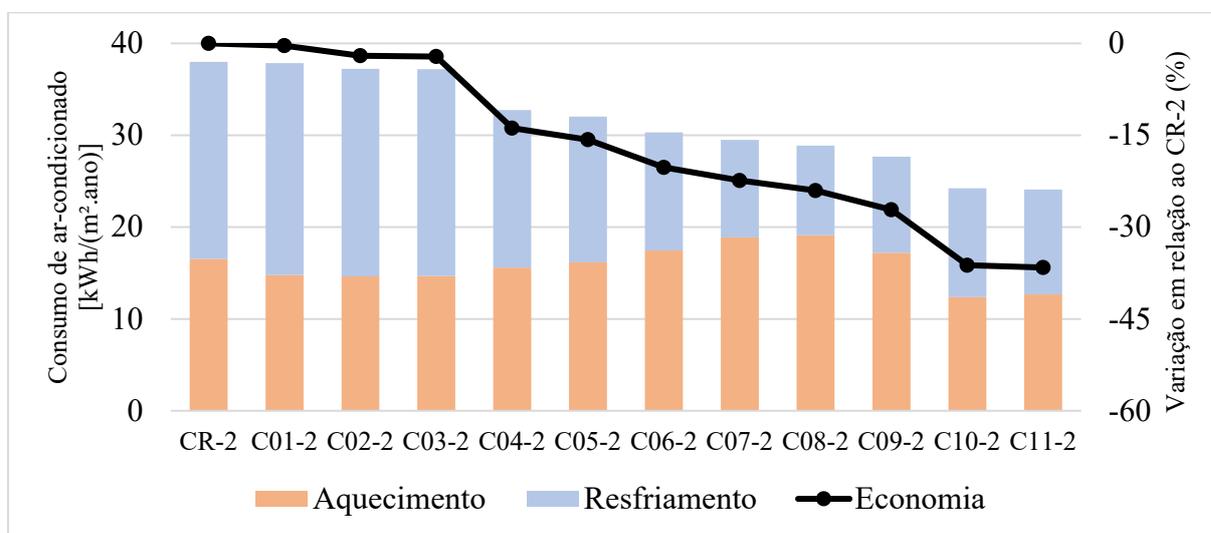
Apesar da vedação vertical com transmitância térmica de $1,85 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ser mais frequente (81,82%), os casos de menores consumos (C10-2 e C11-2) apresentam vedações verticais com transmitância térmica de $0,90 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. Esse comportamento indica que é possível reduzir em até 27,17% o consumo de ar-condicionado utilizando parede composta por argamassa (2,5 cm), alvenaria (14,0 cm) e argamassa (2,5 cm). Mas, para atingir melhores resultados é necessário utilizar paredes mais isolantes. A vedação vertical com a menor transmitância térmica ($0,63 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) também apresentou redução significativa, porém devido ao elevado custo, não foi definida em nenhum caso ótimo. A redução da demanda energética relacionada à diminuição da absorvância solar das vedações verticais pode ser observada na ZB2. A cor pérola, com absorvância de 33,9%, foi definida em 30,77% dos casos.

Similarmente, 72,73% dos casos ótimos apresentaram cobertura de cor branca. As condições climáticas da ZB2 sugerem que o ganho de calor deve ser evitado, portanto cores claras são favoráveis à economia de energia elétrica. A não utilização de barreira radiante na cobertura ocorreu em 72,73% dos casos ótimos. Entretanto, nos três casos de menor consumo energético (C09-2, C10-2 e C11-2), foi utilizada a barreira com espessura de 2 mm.

A utilização de vidros com menor fator solar auxilia na redução da demanda energética, porém 81,82% dos casos ótimos utilizam vidro simples de 3 mm. Isso indica que a utilização desse tipo de vidro ainda pode ser benéfica para a manutenção da temperatura de conforto no interior da edificação, caso as demais variáveis contribuam. Ainda, o percentual de elementos transparentes de 16% foi utilizado em 90,91% dos casos. Além disso, em 81,82% dos casos ótimos a distribuição de elementos transparentes de 30% nas fachadas frontal e posterior e 20% nas fachadas laterais foi utilizada.

Os consumos de energia elétrica para aquecimento e resfriamento dos casos ótimos e de referência definidos para a ZB2 são apresentados na Figura 11. Na ZB2, a demanda energética para aquecimento e para resfriamento dos casos ótimos é relativamente proporcional, diferentemente do que foi observado na ZB1. No caso ótimo de maior consumo (C01-2), a demanda por resfriamento representa 60,98% do consumo total de ar-condicionado. No caso de menor custo da envoltória (C08-2), o consumo para resfriamento demanda 33,77% do total de consumo de ar-condicionado. No caso ótimo de menor consumo (C11-2), o resfriamento é responsável por 47,42% do consumo total de ar-condicionado.

Figura 12 - Consumo de energia para ar-condicionado dos casos da ZB2



Fonte: Autor.

Em comparação com o caso de referência, CR-2, os casos C01-2 a C03-2 apresentaram redução de consumo para condicionamento artificial de até 2,14%. Os casos C04-2 a C09-2 têm consumo de ar-condicionado reduzido entre 13,84% e 27,17%. Os casos C10-2 e C11-2 apresentaram maior redução de consumo em relação a CR-2, atingindo 36,23% e 36,60%, respectivamente. Ambos os casos apresentam envoltória com maior resistência térmica, se comparados aos casos anteriores, adotando paredes mais isoladas e vidros com menores fatores solares.

4.1.1.3 Zona Bioclimática 3

A Tabela 20 descreve as envoltórias dos casos ótimos e do caso de referência determinados para a ZB3. De acordo com a Tabela 20, 45,45% dos casos ótimos estão voltados para o sul. Porém, o caso de menor consumo (C11-3) possui orientação solar voltada para o Norte, sendo essa configuração presente em 27,27% dos casos ótimos. Esse resultado indica que, ambas as orientações ao norte e ao sul podem ser favoráveis a redução do consumo energético, desde que as demais características da envoltória contribuam para este fim.

A vedação vertical com transmitância térmica de 1,85 W/m².K fez parte de 72,73% dos casos ótimos, porém, à medida que se buscava maior redução do consumo, os casos ótimos foram definidos com paredes de menor transmitância térmica. Além disso, nas condições

climáticas da ZB3, mostrou-se a necessidade de utilização de paredes claras, em que a cor pérola foi presente em 72,73% dos casos ótimos, inclusive nos casos de menor consumo.

Tabela 21 - Configuração dos casos da ZB3

Caso	OS (°)	U_vv [W/(m².K)]	α_vv (%)	α_c (%)	BR (mm)	FS (%)	PET (%)	FPDE (%)
CR-3	45	1,85	97,1	79	0	87	20	30FP-20DE
C01-3	315	1,85	97,1	79	0	81	16	20FP-30DE
C02-3	270	1,85	97,1	79	0	87	16	30FP-20DE
C03-3	225	1,85	97,1	56	0	87	16	30FP-20DE
C04-3	180	1,85	33,9	73	0	87	16	30FP-20DE
C05-3	180	1,85	33,9	16	0	87	16	30FP-20DE
C06-3	0	1,85	33,9	16	0	87	16	30FP-20DE
C07-3	180	1,85	33,9	16	0	81	16	30FP-20DE
C08-3	180	1,85	33,9	16	2	81	16	30FP-20DE
C09-3	0	1,43	33,9	16	2	81	16	30FP-20DE
C10-3	180	1,43	33,9	16	2	76	16	30FP-20DE
C11-3	0	0,90	33,9	16	2	76	16	30FP-20DE

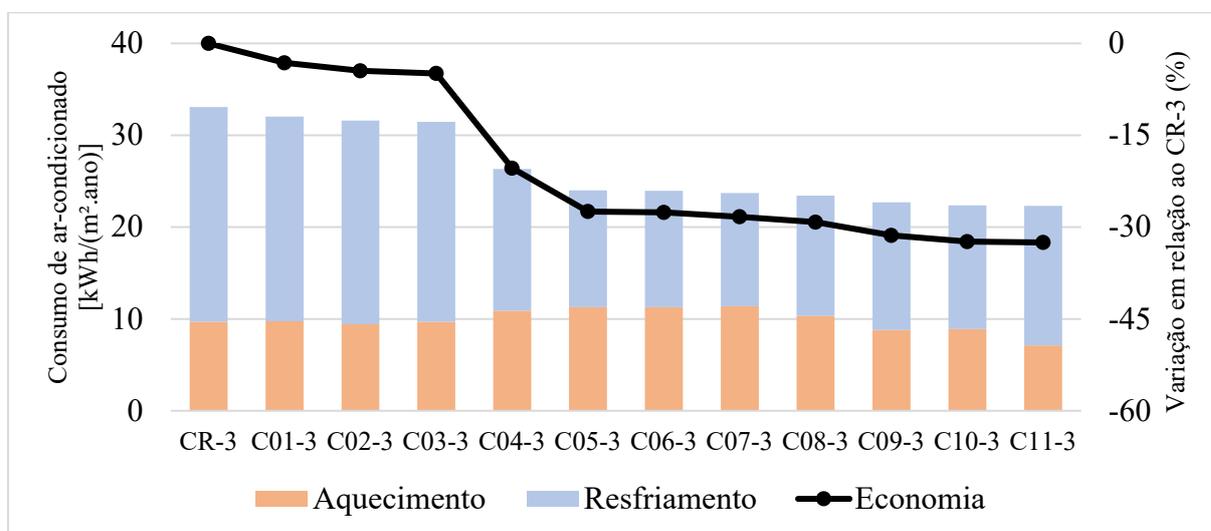
Fonte: Autor.

Quanto à cobertura, a utilização de telhas mais claras também se mostrou favorável à eficiência energética da edificação. Em 63,64% dos casos ótimos foi definida a absorvância solar da cobertura em 16%, referente ao branco. Ainda, a barreira radiante de 2 mm de espessura esteve presente em 36,36% dos casos ótimos, especialmente nos de menor consumo. Isso mostra que a barreira radiante passa a ser viável quando há intenção de reduzir o consumo de ar-condicionado em mais de 29,19%.

Vidros com fator solar de 87% estão presentes em 45,45% dos casos ótimos, porém a utilização de vidros com maior fator solar foi necessária para atingir os dois casos de menor consumo energético. O percentual de elementos transparentes de 16% se mostrou mais uma vez eficaz na redução do consumo energético, sendo definido para todos os casos ótimos da ZB3. Além disso, a distribuição de elementos transparentes de 30% nas fachadas frontal e posterior e de 20% nas fachadas laterais esquerda e direita foi utilizada em 90,91% dos casos ótimos.

A Figura 12 apresenta os resultados dos casos ótimos e do caso de referência para a ZB3 quanto ao consumo para aquecimento e para resfriamento.

Figura 13 - Consumo de energia para ar-condicionado dos casos da ZB3



Fonte: Autor.

Em geral, o consumo para resfriamento dos casos ótimos é maior que o consumo para aquecimento na ZB3. No caso C01-3, de maior consumo entre os casos ótimos, a demanda por resfriamento representa 69,55% do consumo total de ar-condicionado. No caso C06-3, de menor custo da envoltória, o resfriamento representa 52,89% do consumo total de condicionamento artificial. Porém, no caso de menor consumo, o C11-3, o resfriamento volta a contribuir majoritariamente no consumo total de ar-condicionado, com o índice de 68,09%.

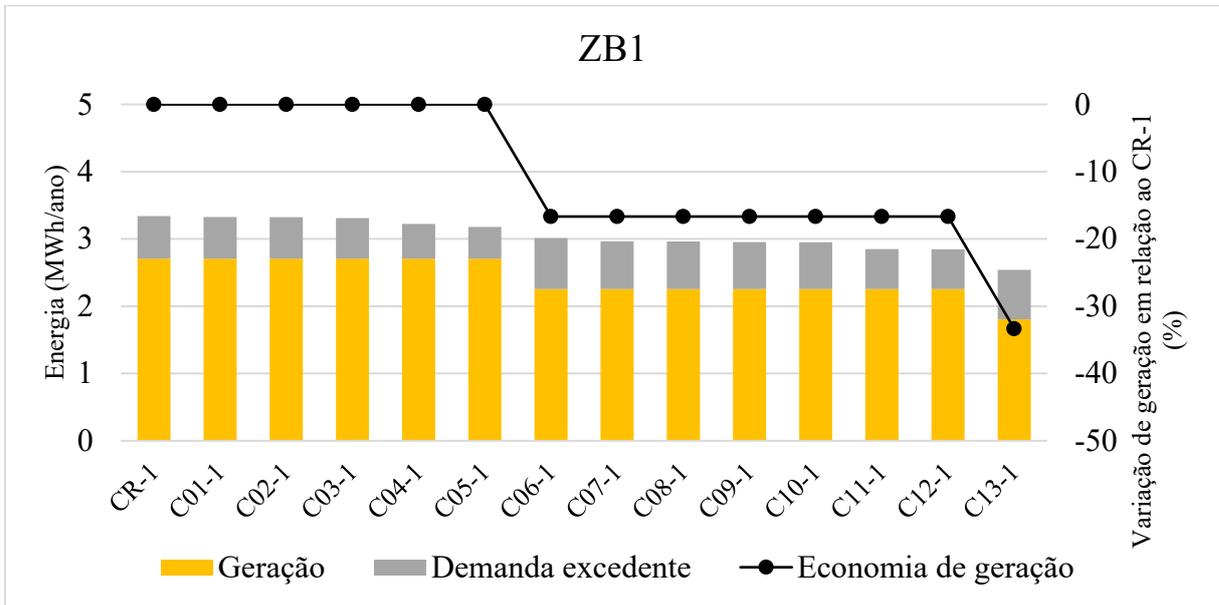
Em comparação com o caso CR-3, os casos C01-3 a C03-3 apresentaram redução no consumo de ar-condicionado de até 4,91%. O caso C04-3 tem economia de 20,38%. Os casos C05-3 a C11-3 apresentaram redução do consumo de ar-condicionado entre 27,46% e 32,51%.

4.1.2 Geração de energia fotovoltaica

Os resultados desta etapa descrevem a energia gerada pelo sistema fotovoltaico definido para cada caso, a demanda que não foi suprida pelo sistema fotovoltaico e a variação da produção fotovoltaica em relação ao caso de referência.

A Figura 13 apresenta os resultados para a ZB1. A alteração da envoltória permitiu a redução da necessidade de geração fotovoltaica de até 33,33%. Os casos C01-1 a C05-1 utilizaram 6 módulos fotovoltaicos, os casos C06-1 a C12-1 precisaram de um sistema com 5 módulos e apenas o caso C13-1 demandou 4 módulos.

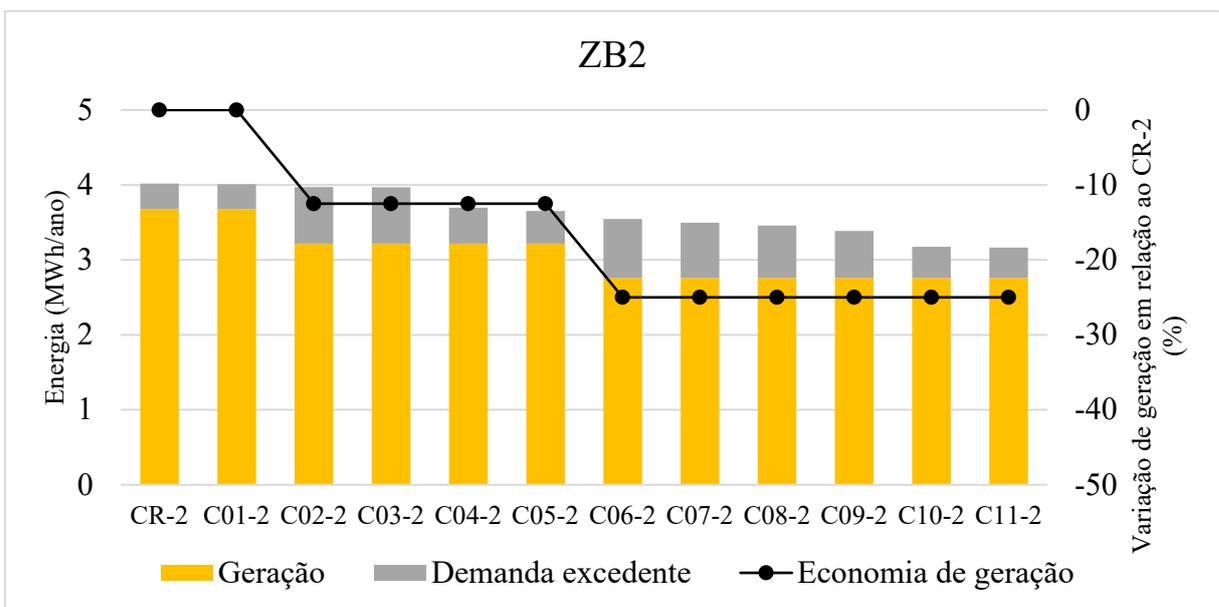
Figura 14 - Geração de energia nos casos da ZB1



Fonte: Autor.

Os resultados da geração de energia fotovoltaica para os casos da Zona Bioclimática 2 estão apresentados na Figura 14.

Figura 15 - Geração de energia nos casos da ZB2

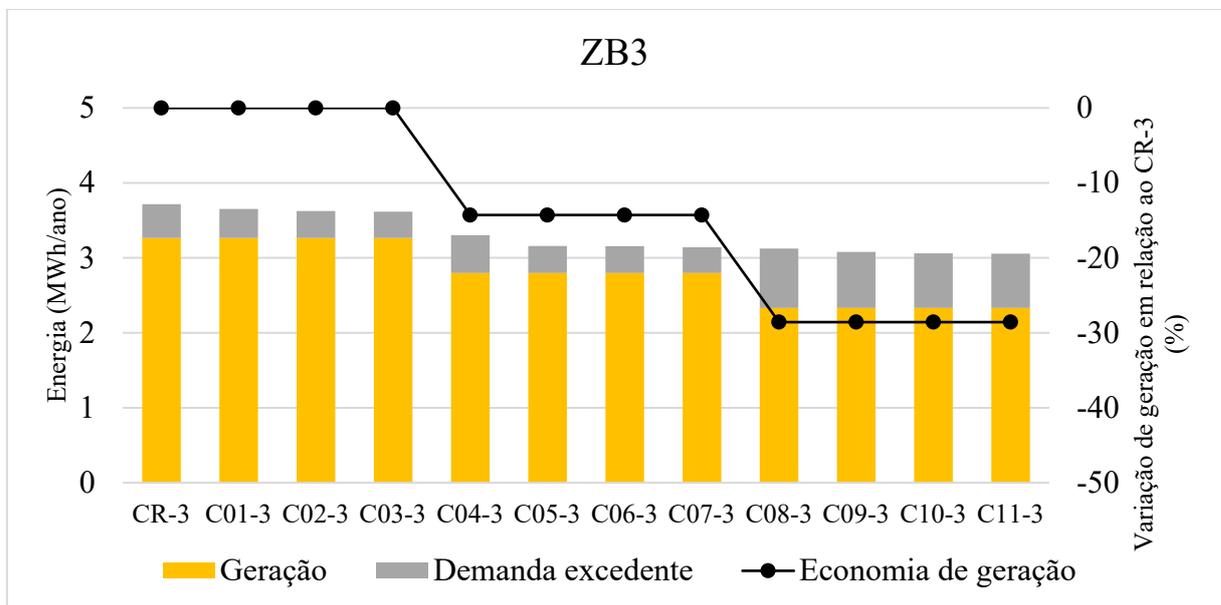


Fonte: Autor.

Na ZB2, foi possível reduzir a geração de energia fotovoltaica em até 25,00%. O caso C01-2 apresentou sistema fotovoltaico dimensionado com 8 módulos, os casos C02-2 a C05-2 com 7 módulos e os casos C6-2 e C11-2 com 6 módulos fotovoltaicos.

A Figura 15 apresenta os resultados para a ZB3. Os casos C01-3 a C03-3 necessitaram de 7 módulos fotovoltaicos, os casos C04-3 a C07-3 demandaram um sistema com 6 módulos e os casos C08-3 a C11-3 necessitaram de 5 módulos fotovoltaicos. Portanto, foi possível reduzir a geração de energia fotovoltaica em até 28,57% nos casos ótimos.

Figura 16 - Geração de energia nos casos da ZB3



Fonte: Autor.

4.1.2.1 Índices de avaliação

A Tabela 21 apresenta o *load matching index* e o *grid interaction index* calculados para os casos da ZB1. O caso que apresentou maior índice de correspondência entre o consumo de energia elétrica e a sua produção na ZB1 é o C05-1, em que nos meses de abril a setembro a edificação não consegue produzir toda a energia necessária. Em contrapartida, o caso C13-1 apresentou o menor *load matching index*, que corresponde à incapacidade de produção da energia demandada entre os meses de março e setembro.

Tabela 22 - Índices de avaliação dos casos da ZB1

Caso	<i>Load matching index (%)</i>	<i>Grid interaction index (%)</i>
CR-1	86,78	64,87
C01-1	86,98	63,92
C02-1	87,02	63,73
C03-1	87,22	62,81
C04-1	88,43	57,93
C05-1	89,08	55,70
C06-1	84,78	77,01
C07-1	85,51	72,09
C08-1	85,56	71,81
C09-1	85,69	70,96
C10-1	85,73	70,68
C11-1	87,36	62,17
C12-1	87,41	61,95
C13-1	84,54	78,55

Fonte: Autor.

O caso C05-1 também apresentou o menor *grid interaction index*, com dependência da rede de energia elétrica em 55,70% do tempo, seja para importar ou exportar energia. Ainda, observou-se que o caso C13-1 tem a maior dependência da conexão com a rede de energia elétrica dentre os casos avaliados, com necessidade de conexão à rede em 78,55% do tempo.

Tabela 23 - Índices de avaliação dos casos da ZB2

Caso	<i>Load matching index (%)</i>	<i>Grid interaction index (%)</i>
CR-2	87,23	55,70
C01-2	87,32	55,44
C02-2	83,03	72,24
C03-2	83,06	72,08
C04-2	85,97	59,45
C05-2	86,48	57,82
C06-2	82,39	76,17
C07-2	82,95	72,69
C08-2	83,39	70,24
C09-2	84,27	65,96
C10-2	87,08	56,11
C11-2	87,20	55,77

Fonte: Autor.

Os índices de avaliação para os casos da ZB2 são apresentados na Tabela 22. O caso C01-2 apresentou o maior *load matching index*, com não produção do total da energia necessária entre abril e setembro. O caso C06-2, no entanto, apresentou o menor índice de correspondência de carga, também não produzindo toda a energia necessária de abril a setembro.

Em relação ao *grid interaction index*, o caso C01-2 dependerá da rede durante 55,44% do tempo, configurando o caso com menor dependência. Além disso, o caso C06-2 apresenta maior dependência da rede de energia elétrica, por 76,17% do tempo.

A Tabela 23 descreve os valores do *load matching index* e do *grid interaction index* dos casos da ZB3. O caso C07-3 apresentou o maior índice de correspondência de carga, em que entre os meses de abril a setembro o sistema fotovoltaico instalado não seria capaz de produzir toda a energia necessária. O caso C08-3 possui o menor *load interaction index*, com não correspondência do consumo entre os meses de março e setembro.

Tabela 24 - Índices de avaliação dos casos da ZB3

Caso	<i>Load matching index (%)</i>	<i>Grid interaction index (%)</i>
CR-3	87,61	53,76
C01-3	88,41	51,66
C02-3	88,74	50,85
C03-3	88,85	50,59
C04-3	87,17	55,06
C05-3	89,25	49,68
C06-3	89,30	49,58
C07-3	89,52	49,10
C08-3	82,81	72,97
C09-3	83,54	69,32
C10-3	83,89	67,74
C11-3	83,94	67,52

Fonte: Autor.

O caso C07-3 possui o menor *grid interaction index*, com necessidade de conexão à rede de energia elétrica durante 49,10% do tempo. Além disso, o caso C08-3 apresentou maior dependência da rede, com necessidade de conexão durante 72,97% do tempo. Apesar da variação dos índices de avaliação calculados, todas os casos apresentam sistemas fotovoltaicos adequados para suprir o seu consumo de energia elétrica. Os períodos apontados que não atingiriam a correspondência total da carga coincidem com os meses de menor irradiação solar.

4.2 CUSTO INICIAL

Na etapa de geração de energia fotovoltaica, foram definidos 5 sistemas fotovoltaicos para suprir as demandas energéticas dos casos ótimos. A descrição dos casos que utilizaram cada um dos sistemas é apresentada no Quadro 4 e seus custos são indicados na Tabela 24.

Quadro 4 - Descrição dos casos de cada sistema fotovoltaico

Sistema	Casos	Nº de módulos
S01	CR-2 e C01-2	8
S02	C02-2, C03-2, C04-2, C05-2, CR-3, C01-3, C02-3 e C03-3	7
S03	CR-1, C01-1, C02-1, C03-1, C04-1, C05-1, C06-2, C07-2, C08-2, C09-2, C10-2, C11-2, C04-3, C05-3, C06-3 e C07-3	6
S04	C05-1, C06-1, C07-1, C08-1, C09-1, C10-1, C11-1, C12-1, C08-3, C09-3, C10-3 e C11-3	5
S05	C13-1	4

Fonte: Autor.

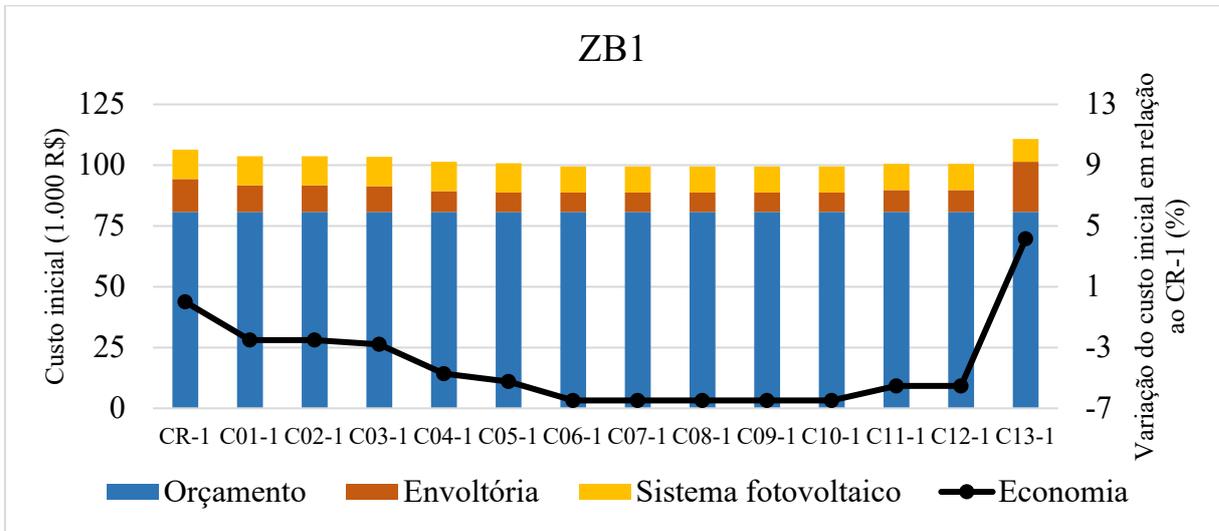
Tabela 25 - Custo dos sistemas fotovoltaicos

Sistema	Custo do sistema fotovoltaico (R\$)				
	Módulos	Inversor	Proteção	Instalação	Total
S01	7.046,88	10.383,78	669,95	3.000,00	21.100,61
S02	6.459,64	10.383,78	669,95	2.750,00	20.263,37
S03	5.872,40	10.383,78	669,95	2.500,00	19.426,13
S04	5.285,16	8.729,58	669,95	2.250,00	16.934,69
S05	4.697,92	8.729,58	669,95	2.000,00	16.097,45

Fonte: Autor.

A Figura 16 mostra a composição dos custos iniciais dos casos ótimos definidos para a ZB1, a Figura 17 para a ZB2 e a Figura 18 para a ZB3. Inicialmente, é possível destacar que os casos ótimos com menores consumos de energia elétrica para cada Zona Bioclimática (C13-1, C11-2 e C11-3) apresentam os maiores custos de envoltória e menores custos de sistema fotovoltaico. Em contrapartida, os casos de maior consumo apresentam maiores custos de sistema fotovoltaico, mas não necessariamente têm menor custo de envoltória. Dessa forma, os casos C13-1, C11-2 e C11-3 são identificados como os de maior custo inicial.

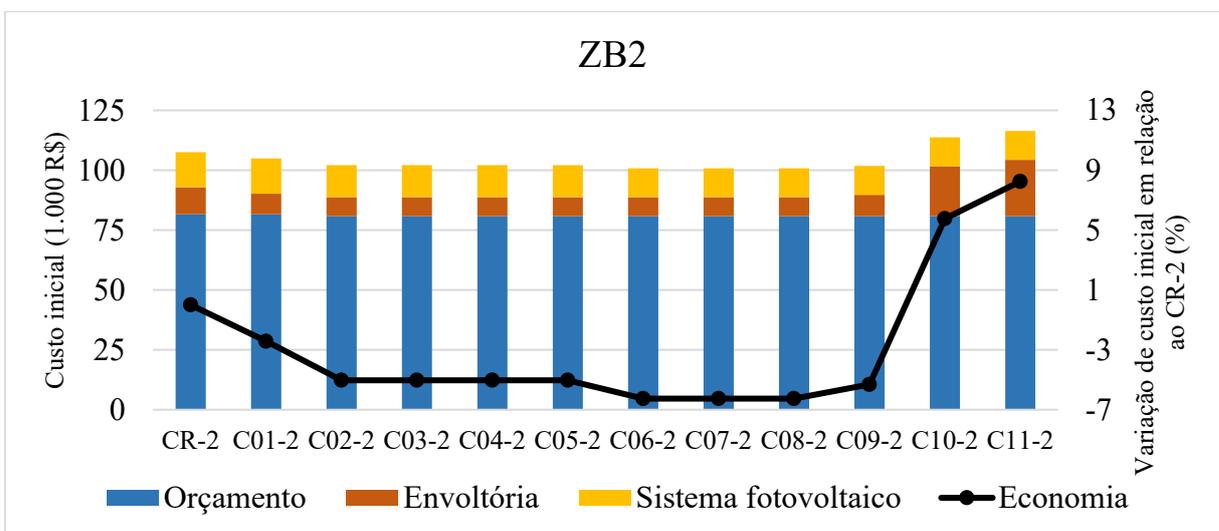
Figura 17 - Custo inicial dos casos da ZB1



Fonte: Autor.

Na ZB1, os casos C05-1 a C10-1 apresentaram os menores custos de envoltória, porém, quando os demais valores foram considerados, os casos C06-1 e C10-1 apresentaram os menores custos iniciais, sendo 10,21% menores que o caso C13-1. Já em relação ao caso C01-1, a economia foi de 4,07%. Dessa forma o caso C10-1 pode ser apontado como o de custo ótimo, pois apresentou o menor consumo entre os casos de menor custo inicial na ZB1.

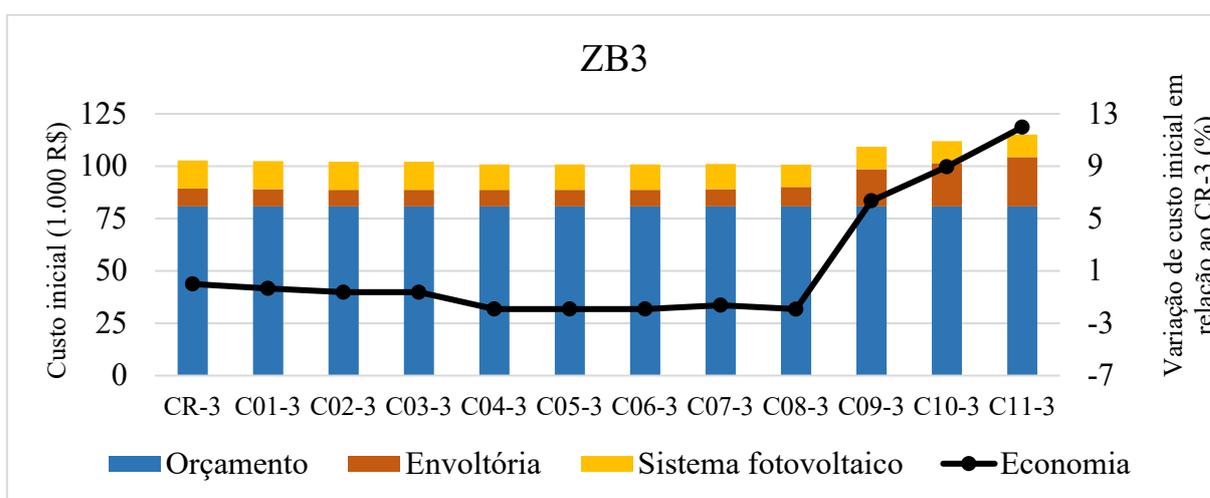
Figura 18 - Custo inicial dos casos da ZB2



Fonte: Autor.

Na ZB2, os casos C02-2 a C08-2 apresentaram custo de envoltória 66,21% menores que o caso C11-2. Entretanto, apenas os casos C006-2, C07-2 e C08-2 apresentaram o menor custo inicial, sendo 13,40% menor que o caso C11-2. Em relação com o caso C01-2, de maior consumo entre os casos ótimos, a economia foi de 3,93%. Assim, o caso C08-2 pode ser apontado como o de custo ótimo, pois apresentou o menor consumo entre os casos de menor custo inicial na ZB2.

Figura 19 - Custo inicial dos casos da ZB3



Fonte: Autor.

Na ZB3, os casos C02-3 a C06-3 apresentaram custo de envoltória 66,21% a menos que o caso C11-3. Porém, o caso C08-3 apresentou o menor custo inicial, sendo 12,42% menor que o caso de maior custo inicial, o C11-3. Em comparação com o caso C01-3, a economia foi de 1,58%. Dessa forma, o caso C08-3 pode ser apontado como o de custo ótimo, pois apresentou o menor consumo entre os casos de menor custo inicial na ZB3.

De modo geral, os casos mais vantajosos do ponto de vista do consumo energético foram desvantajosos em relação ao custo inicial. Esse resultado evidencia a importância da escolha do projetista na definição da envoltória para determinação de *Nearly Zero Energy Buildings*, analisando também a viabilidade econômica do projeto.

4.3 ÍNDICE DE CONFORTO TÉRMICO

Após a execução da simulação dos casos considerando a ventilação natural, foi possível extrair as temperaturas em cada zona térmica da edificação. A Tabela 25 apresenta as temperaturas mínima, máxima e média de cada zona térmica dos casos ótimos para a ZB1, a Tabela 26 descreve os resultados para a ZB2 e a Tabela 27 mostra os valores da ZB3. A partir do modelo adaptativo da ASHRAE 55 (2017) foi possível estimar o índice de conforto térmico.

Tabela 26 - Temperaturas dos casos da ZB1

Caso ótimo	Temperatura operativa (°C)			Temperatura abaixo da cobertura (°C)		
	Mínima	Máxima	Média	Mínima	Máxima	Média
CR-1	6,82	30,48	18,98	0,59	33,00	16,79
C01-1	6,87	30,57	19,04	0,61	33,05	16,82
C02-1	6,88	30,58	19,07	0,62	33,07	16,83
C03-1	6,92	30,59	19,12	0,64	33,08	16,86
C04-1	7,25	30,31	19,20	0,80	33,02	16,89
C05-1	7,45	30,06	19,24	0,90	32,97	16,91
C06-1	8,11	32,50	20,55	1,20	41,97	18,95
C07-1	8,39	33,15	21,00	1,34	40,61	18,82
C08-1	8,44	33,40	21,09	1,36	42,36	19,17
C09-1	8,43	33,02	21,00	1,36	40,59	18,82
C10-1	8,48	33,39	21,12	1,38	42,36	19,18
C11-1	8,87	32,44	21,12	2,02	41,44	19,25
C12-1	8,91	32,81	21,24	2,04	45,05	20,00
C13-1	11,05	30,05	21,14	3,28	32,98	17,94

Fonte: Autor.

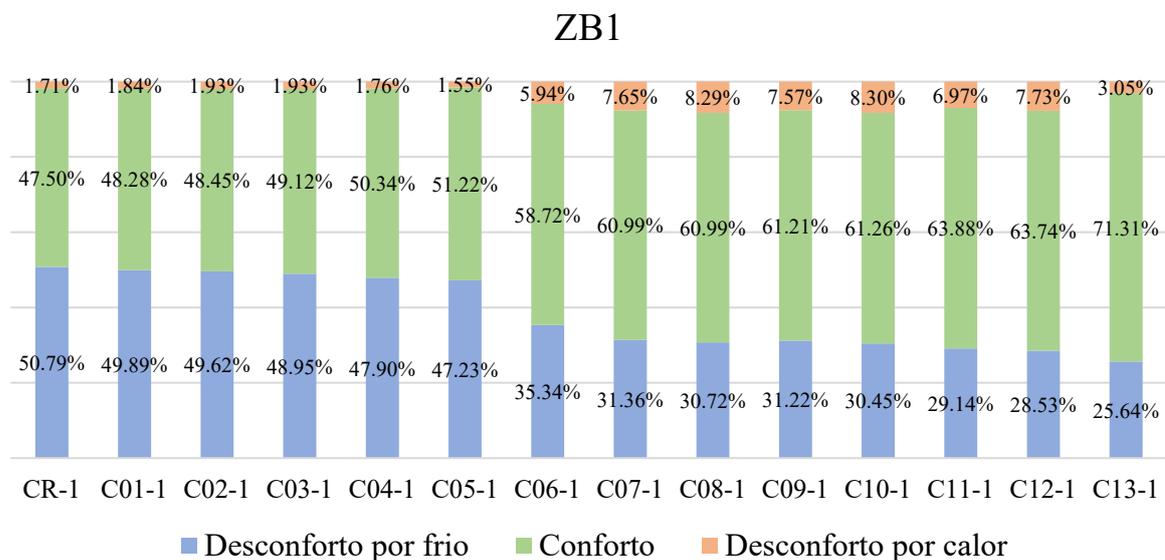
À medida que o consumo de ar-condicionado cresceu entre os casos ótimos, observou-se o aumento da temperatura interna média, com exceção do caso C13-1, que apresentou redução de temperatura em relação ao caso anterior. Entretanto, no caso C13-1 houve a redução da amplitude térmica, reduzindo a temperatura máxima e elevando a temperatura mínima. Esse resultado pode ser explicado pela utilização de parede externa com transmitância menor no caso C13-1, oferecendo maior resistência térmica à edificação.

Quanto à temperatura na zona térmica abaixo da cobertura, em geral também houve aumento conforme os casos demandavam menor consumo energético. Porém os casos C07-1, C09-1 e C13-1 não se comportaram dessa maneira, reduzindo o valor da temperatura média em

relação aos respectivos casos anteriores. Possivelmente, a absorvância térmica da cobertura influenciou nesses resultados. Nos casos C07-1, C09-1 e C13-1, as coberturas tinham absorvância menor que os respectivos casos anteriores. No caso C13-1 houve o acréscimo da utilização da barreira radiante, o que, aliada à absorvância, pode ter motivado a redução mais significativa na temperatura média e na amplitude da zona térmica abaixo da cobertura.

Os índices de conforto térmico estão apresentados na Figura 19 para a ZB1. A partir da Figura 19 é possível identificar que o índice de conforto térmico dos casos ótimos aumenta com a redução do consumo energético. Também é possível perceber que o desconforto térmico por frio, no geral, diminuiu conforme o caso ótimo sofria redução do consumo de ar-condicionado. Por outro lado, o desconforto por calor aumentou na maioria dos casos ótimos, em relação ao caso de referência. A única exceção foi o caso C05-1, que apresentou desconforto por calor 11,93% menor.

Figura 20 - Índices de conforto e desconforto dos casos da ZB1



Fonte: Autor.

O caso C01-1 apresentou índice de desconforto por frio de 50,79%, sendo o maior entre os casos ótimos. Em contrapartida, o índice de desconforto por calor foi o segundo menor, de 1,71%. Apesar disso, o caso C01-1 apresentou o menor índice de conforto, em que em apenas 4.161 das horas do ano a temperatura interna estaria dentro da zona de conforto, o que representa 47,50%.

No caso apontado como de custo ótimo, C10-1, o índice de desconforto por frio foi estimado em 30,45%. Além disso, em 8,30% das horas do ano, a edificação possui temperatura interna maior que o limite superior da zona de conforto, configurando o desconforto por calor. Desse modo, o caso C10-1 apresenta 5.366 horas do ano em situação de conforto, o que corresponde a 61,26%.

No caso C13-1, foi estimado que em 25,64% das horas do ano a temperatura operativa seria inferior à temperatura de conforto e que em 3,05% a edificação apresentaria desconforto por calor. Entretanto, esse foi o caso identificado como o de maior conforto, com 6.247 horas do ano dentro dos limites de conforto térmico, o equivalente a 71,31%.

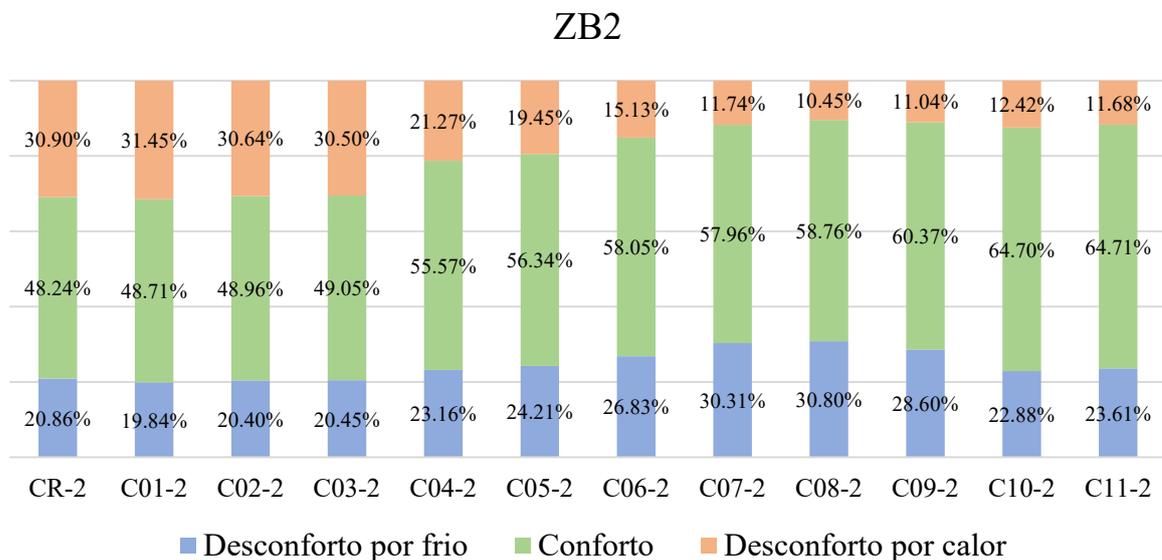
Tabela 27 - Temperaturas dos casos da ZB2

Caso ótimo	Temperatura operativa (°C)			Temperatura abaixo da cobertura (°C)		
	Mínima	Máxima	Média	Mínima	Máxima	Média
CR-2	8,45	41,30	24,41	-0,11	50,50	23,13
C01-2	9,16	40,27	24,46	0,22	50,36	23,18
C02-2	9,20	40,00	24,33	0,24	50,22	23,11
C03-2	9,17	40,00	24,30	0,23	50,21	23,10
C04-2	8,84	36,72	23,31	0,74	38,09	20,30
C05-2	8,65	36,30	23,08	-0,01	37,95	20,19
C06-2	8,22	35,29	22,51	-0,22	37,55	19,94
C07-2	7,77	34,85	22,00	-0,43	37,33	19,73
C08-2	7,68	34,21	21,87	-0,48	37,12	19,66
C09-2	8,34	34,11	22,10	0,16	36,65	19,89
C10-2	10,74	37,12	22,84	1,14	36,48	20,19
C11-2	10,64	33,66	22,73	1,09	36,41	20,14

Fonte: Autor.

Para a ZB2, de modo geral, a temperatura média nas duas zonas térmicas sofreu redução conforme o consumo de energia elétrica diminuiu, do caso C01-2 até o caso C08-2. Porém, os casos C09-2, C10-2 e C11-2 não seguiram essa tendência. Dois fatores podem ter influenciado esse resultado: a presença de barreira radiante e a redução da transmitância das vedações verticais nos dois últimos casos. Em comparação com CR-2, a temperatura média interna do caso C11-2 foi 6,88% menor e a temperatura média abaixo da cobertura foi 12,93% inferior. A Figura 20 apresenta os índices de conforto térmico para os casos da ZB2.

Figura 21 - Índices de conforto e desconforto dos casos da ZB2



Fonte: Autor.

Na Figura 20, também se verifica que, de modo geral, nos casos ótimos da ZB2 o índice de conforto térmico aumentou conforme o consumo de energia elétrica diminuiu. Entretanto, o índice de desconforto por frio apresentou valores menores nos casos de maior consumo, C01-2 a C03-2, e valores maiores nos casos ótimos C07-2 a C09-2. Do mesmo modo, os casos C01-2 a C03-2 apresentaram maior desconforto por calor e os casos C06-2 a C11-2 menor desconforto.

Diante do cálculo dos índices de conforto, o caso C01-2 foi apontado como o de menor conforto térmico. Em 19,84% do ano, a edificação estaria em situação de desconforto por frio e em 31,45% em situação de desconforto por calor. Dessa forma, em 4.267 horas do ano a edificação com as configurações de envoltória do caso C01-2 estará confortável termicamente, totalizando 48,71%.

O caso de custo ótimo, C08-2, apresentou o maior desconforto por frio dentre os casos ótimos, com índice de 30,80%. Em contrapartida, esse caso apresentou o menor desconforto por calor, atingindo 10,45% das horas do ano. Desse modo, a edificação estaria em situação de conforto em 5.147 das horas do ano, o que equivale a 58,76%.

No caso C11-2, durante 23,61% das horas do ano, a temperatura no interior da edificação deverá ser inferior ao limite mínimo da zona de conforto. Ainda, em 11,68% das horas, a edificação apresentaria desconforto por calor. Porém, esse caso foi classificado com o de maior índice de conforto térmico, atingindo 5.669 horas do ano, o que corresponde a 64,71%.

Tabela 28 - Temperaturas dos casos da ZB3

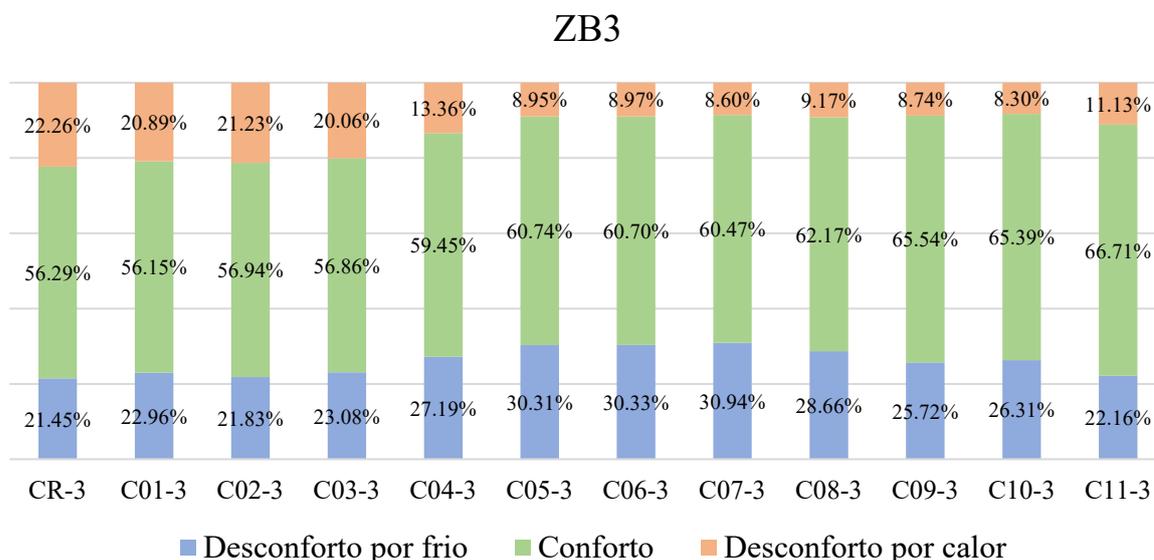
Caso ótimo	Temperatura operativa (°C)			Temperatura abaixo da cobertura (°C)		
	Mínima	Máxima	Média	Mínima	Máxima	Média
CR-3	10,41	39,57	24,10	3,14	49,35	22,79
C01-3	10,31	39,02	23,89	3,10	49,21	22,69
C02-3	10,49	38,96	23,99	3,18	49,30	22,73
C03-3	10,32	38,26	23,79	3,07	45,37	22,08
C04-3	9,68	36,31	22,97	2,77	47,30	22,21
C05-3	9,42	34,83	22,38	2,48	36,48	20,39
C06-3	9,41	34,83	22,38	2,48	36,48	20,39
C07-3	9,36	34,75	22,31	2,44	36,42	20,36
C08-3	10,00	34,71	22,53	3,24	36,25	20,58
C09-3	11,17	33,55	22,83	3,82	36,12	20,72
C10-3	11,10	33,45	22,74	3,78	36,06	20,68
C11-3	12,15	33,65	23,32	4,26	36,15	20,90

Fonte: Autor.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 27, destaca-se que, apesar da redução da temperatura média no interior da edificação dos casos ótimos em relação ao caso de referência, foi observada a tendência de estabilidade em alguns casos. Entre os casos C01-3, C02-3 e C03-3, houve pouca variação da temperatura interna média, o que pode ser justificado pela utilização da mesma absorptância térmica das vedações verticais nesses casos, de 97,1%. Esse comportamento também foi observado nos casos C04-3 a C10-3, que utilizaram absorptância solar das vedações verticais de 33,16%. No caso C11-3, porém, a temperatura interna média apresentou aumento, se comparada com o caso C10-3, mas ainda foi inferior ao CR-3. Apesar do caso C11-3 também utilizar paredes na cor pérola (absorptância solar de 33,16%), a transmitância térmica das vedações verticais foi menor que do caso C10-3 e a edificação foi orientada a norte, diferente do caso C10-3 com orientação a sul.

A estabilidade também foi observada na zona térmica abaixo da cobertura. Nos casos C01-3 a C04-3, a temperatura média abaixo da cobertura se manteve estável, possivelmente devido a utilização de telhas com cores mais escuras, com absorptância solar entre 56% e 79%. Analogamente, os casos C05-3 a C11-3 apresentaram comportamento similar, os quais utilizaram telhas na cor branca, com absorptância solar de 16%. A Figura 21 apresenta os índices de conforto térmico calculados para a ZB3.

Figura 22 - Índices de conforto e desconforto dos casos da ZB3



Fonte: Autor.

A partir da Figura 21, é possível avaliar o comportamento dos índices de desconforto e conforto térmico conforme o consumo de energia elétrica foi reduzido na ZB3. Os casos C05-3 a C07-3 apresentaram os maiores índices de desconforto por frio, todos acima de 30,00%. Em relação ao desconforto por calor, os casos C01-3 a C03-3 apresentaram os maiores índices, acima de 20,00%. Por outro lado, os casos C09-3 a C11-3 apresentaram os maiores índices de conforto térmico, com valores acima de 65,00%.

Diante desses resultados, o caso C01-3 foi apontado como o de menor conforto térmico. Em 22,96% das horas do ano, esse caso apresentou desconforto por frio e durante 20,89% a edificação apresentou desconforto por calor. Portanto, apenas em 4.918 horas do ano a temperatura interna esteve dentro dos limites da zona de conforto, correspondendo a 56,15%.

O caso C08-3, definido como de custo ótimo, apresentou 28,66% das horas do ano em situação de desconforto por frio. Além disso, em 9,17% do período, a edificação estaria desconfortável por calor. Dessa forma, em 5.446 horas do ano a temperatura no interior da edificação seria confortável, o equivalente a 62,17%.

O caso C11-3 foi apontado como o caso de maior conforto térmico, pois apesar de apresentar 22,16% de desconforto por frio, esse caso apresentou desconforto por calor de 11,13%. Durante 5.844 horas do ano, o caso C11-3 se encontra em situação de conforto térmico, o que corresponde a 66,71%.

4.4 DECISÃO MULTICRITÉRIO

A partir dos resultados de consumo de energia elétrica de ar-condicionado, do custo inicial e do índice de conforto térmico de cada caso ótimo, foi aplicado o método ELECTRE III para ordenar as soluções. Para isso, foram considerados quatro cenários: (A) considerando que todos os critérios de avaliação teriam mesma importância para decidir a melhor solução; (B) atribuindo maior importância ao consumo de ar-condicionado; (C) considerando que o custo inicial seja mais importante que os demais critérios; e (D) atribuindo maior importância ao índice de conforto térmico. A seguir são descritos os resultados da aplicação do método de decisão multicritério para os quatro cenários nas Zonas Bioclimáticas 1, 2 e 3.

4.4.1 Zona Bioclimática 1

Após realizar o tratamento dos resultados dos casos ótimos da ZB1, foram obtidos os desempenhos das alternativas normalizados para cada critério. Cada desempenho normalizado representa, para o critério analisado, a nota da alternativa no conjunto. Dessa forma, quanto maior o desempenho normalizado, melhor o caso. Os valores das alternativas da ZB1 são apresentados na Tabela 28.

Tabela 29 - Desempenho normalizado das alternativas da ZB1

Alternativa	Consumo de ar-condicionado (%)	Custo inicial (%)	Índice de conforto térmico (%)
C01-1	6,13	7,54	6,44
C02-1	6,14	7,54	6,46
C03-1	6,19	7,56	6,55
C04-1	6,54	7,71	6,72
C05-1	6,73	7,75	6,83
C06-1	7,58	7,86	7,83
C07-1	7,86	7,86	8,14
C08-1	7,87	7,86	8,14
C09-1	7,93	7,86	8,17
C10-1	7,95	7,86	8,17
C11-1	8,65	7,78	8,52
C12-1	8,67	7,78	8,50
C13-1	11,77	7,06	9,51

Fonte: Autor.

Após a aplicação do método ELECTRE III foi possível realizar a primeira ordenação das alternativas para os cenários A, B, C e D. Como algumas alternativas obtiveram classificações iguais, foi necessário repetir a aplicação do método até atingir a ordenação de todas as alternativas, conforme a Tabela 29.

Tabela 30 - Ordenação final das alternativas da ZB1

Alternativa	Cenário A	Cenário B	Cenário C	Cenário D
C01-1	13	13	13	13
C02-1	12	12	12	12
C03-1	11	11	11	11
C04-1	10	10	10	10
C05-1	9	9	9	9
C06-1	8	8	8	8
C07-1	7	7	7	7
C08-1	6	6	6	6
C09-1	5	5	5	5
C10-1	4	4	4	4
C11-1	2	2	2	1
C12-1	1	1	1	2
C13-1	3	3	3	3

Fonte: Autor.

Observa-se que nos cenários A, B e C, o caso C12-1 foi ordenado como o melhor para a ZB1, enquanto o cenário D, com maior peso para o conforto térmico, ordenou o caso C11-1 como o melhor. Nos cenários A, B e C, as ordenações foram idênticas. Assim, o decisor que considera a mesma importância para todos os critérios, quem atribui maior importância para o consumo de ar-condicionado e o decisor que considera o custo inicial como critério mais importante, ordenam as soluções da mesma forma.

Após a análise multicritério das alternativas, percebe-se que o caso C13-1 apresentou o menor consumo de ar-condicionado, os casos C06-1 a C10-1 obtiveram o menor custo inicial e o caso C13-1 apresentou o maior índice de conforto térmico. Apesar disso, o caso C12-1 apresentou o melhor comportamento quando os critérios foram considerados concomitantemente nos cenários A, B e C e o caso C11-1 se mostrou melhor diante do cenário D.

4.4.2 Zona Bioclimática 2

Os desempenhos das alternativas normalizados para cada critério são apresentados na Tabela 30. Após a primeira ordenação das alternativas pelo método ELECTRE III, observou-se que houve empate na ordenação de algumas alternativas, então foi necessário aplicar o método entre as alternativas empatadas até que se obtivesse a ordenação final (Tabela 31).

Tabela 31 - Desempenho normalizado das alternativas da ZB2

Alternativa	Consumo de ar-condicionado (%)	Custo inicial (%)	Índice de conforto térmico (%)
C01-2	7,29	9,02	7,82
C02-2	7,41	9,27	7,86
C03-2	7,42	9,27	7,87
C04-2	8,43	9,27	8,92
C05-2	8,62	9,27	9,04
C06-2	9,11	9,39	9,31
C07-2	9,36	9,39	9,30
C08-2	9,56	9,39	9,43
C09-2	9,97	9,29	9,69
C10-2	11,39	8,32	10,38
C11-2	11,45	8,13	10,38

Fonte: Autor.

Tabela 32 - Ordenação final das alternativas da ZB2

Alternativa	Cenário A	Cenário B	Cenário C	Cenário D
C01-2	11	11	11	11
C02-2	10	10	10	10
C03-2	9	9	9	9
C04-2	8	8	8	8
C05-2	7	7	7	7
C06-2	5	5	4	6
C07-2	3	3	3	3
C08-2	2	2	2	2
C09-2	1	1	1	1
C10-2	4	4	5	4
C11-2	6	6	6	5

Fonte: Autor.

Na avaliação dos casos ótimos da ZB2, os diferentes pesos atribuídos aos critérios influenciaram significativamente na ordenação final das alternativas. Nos cenários A e B, as alternativas foram ordenadas da mesma forma, independentemente do peso considerado. Entretanto, os resultados obtidos mostram que, em todos os cenários, o caso C09-2 foi identificado como a melhor solução, levando em consideração o consumo de ar-condicionado, o custo inicial e o conforto térmico resultante da sua configuração de envoltória. Destaca-se também que a alternativa com o menor consumo de ar-condicionado, C11-2, não foi classificada entre as melhores, possivelmente devido à grande diferença de custo inicial entre as soluções.

Comparando C11-2 com C09-2, percebe-se que a diferença de consumo de ar-condicionado é de apenas 3,58 kWh/m².ano, mas o caso C09-2 custa R\$ 14.587,94 a menos. Se a diferença de consumo de ar-condicionado for multiplicada pela área da edificação e pela tarifa de energia elétrica em bandeira verde da cidade de Santa Maria para uma edificação residencial normal (0,58957 R\$/kWh), obtém-se a diferença de custo com ar-condicionado de apenas 132,97 R\$/ano. Dessa forma, a partir da análise do *payback* simples, percebe-se que seriam necessários 109,71 anos para que a diferença do custo inicial entre essas alternativas fosse compensada pela economia no custo relativo ao consumo de ar-condicionado, caso o caso C11-2 fosse escolhido ao invés do caso C09-2.

A partir da análise do desempenho individual das alternativas, nota-se que o caso C11-2 apresentou o menor consumo de ar-condicionado, os casos C06-2 a C08-2 obtiveram o menor custo inicial e os casos C10-2 e C11-2 apresentaram o maior índice de conforto térmico. Entretanto, a aplicação do método de decisão multicritério identificou o caso C09-2 como o mais vantajoso.

4.4.3 Zona Bioclimática 3

Na Tabela 32 são apresentados os desempenhos normalizados dos casos ótimos obtidos por meio do processo de otimização computacional para a ZB3. Após a primeira aplicação do método ELECTRE III, foram obtidas situações de empate entre alternativa, destacando a necessidade de realizar novamente a aplicação do método até a obtenção da ordenação final, apresentada na Tabela 33.

Tabela 33 - Desempenho normalizado das alternativas da ZB3

Alternativa	Consumo de ar-condicionado (%)	Custo inicial (%)	Índice de conforto térmico (%)
C01-3	7,19	9,24	8,37
C02-3	7,28	9,26	8,48
C03-3	7,32	9,26	8,47
C04-3	8,74	9,39	8,86
C05-3	9,59	9,39	9,05
C06-3	9,61	9,39	9,04
C07-3	9,71	9,36	9,01
C08-3	9,83	9,39	9,26
C09-3	10,14	8,66	9,77
C10-3	10,29	8,45	9,74
C11-3	10,31	8,22	9,94

Fonte: Autor.

Tabela 34 - Ordenação final das alternativas da ZB3

Alternativa	Cenário A	Cenário B	Cenário C	Cenário D
C01-3	11	11	11	11
C02-3	10	10	10	10
C03-3	9	9	9	9
C04-3	8	8	7	8
C05-3	4	5	5	5
C06-3	3	3	4	4
C07-3	2	2	2	2
C08-3	1	1	1	1
C09-3	5	7	3	6
C10-3	6	4	6	7
C11-3	7	6	8	3

Fonte: Autor.

Diante dos resultados, é possível observar que não houve ordenação final idêntica em cenários distintos. Entretanto, os cenários A, B, C e D identificaram o caso C08-3 como o melhor. A alternativa com o menor consumo de ar-condicionado, C11-3, foi ordenada em posições intermediárias em todos os cenários avaliados. Além disso, em todos os cenários a alternativa C01-3 foi considerada a pior.

Analisando os desempenhos das alternativas em cada critério separadamente, percebe-se que o caso C11-3 apresentou o menor consumo de ar-condicionado e o maior índice de

conforto térmico, enquanto os casos C04-3, C05-3, C06-3 e C08-3 obtiveram o menor custo inicial. Ao final da aplicação do método ELECTRE III, o processo de decisão multicritério apontou o caso C08-3 como o melhor, considerando todos os critérios simultaneamente.

4.5 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

As configurações de envoltória dos melhores casos estão relacionadas na Tabela 34. É possível notar que algumas características se mantiveram iguais para todas as Zonas Bioclimáticas. Nos casos C11-1, C12-1, C09-2 e C08-3, a fachada principal é voltada para o Sul, as paredes são compostas de argamassa interna e externa de 2,5 cm e bloco cerâmico com 14 cm de espessura, há barreira radiante de 2mm, o percentual de elementos transparentes é de 16% e a distribuição desses elementos é de 30% nas fachadas frontal e posterior e 20% nas fachadas laterais.

Tabela 35 - Comparação das envoltórias dos melhores casos

Característica	C11-1	C12-1	C09-2	C08-3
OS (°)	180	180	180	180
U _v [W/(m ² .K)]	1,85	1,85	1,85	1,85
α _v (%)	97,1	97,1	33,9	33,9
α _c (%)	56	79	16	16
BR (mm)	2	2	2	2
FS (%)	87	87	87	81
PET (%)	16	16	16	16
FPDE (%)	30FP-20DE	30FP-20DE	30FP-20DE	30FP-20DE

Fonte: Autor.

Além disso, os casos C11-1, C12-1 e C09-2 utilizam vidro simples de 3 mm, o que contribui para os ganhos térmicos durante o inverno. Os casos C09-2 e C08-3 possuem paredes externas na cor pérola e cobertura na cor branca, estratégias que colaboram para a redução de ganhos térmicos durante o verão.

A Tabela 35 apresenta a comparação dos resultados entre os melhores casos, definidos a partir do modelo de decisão multicritério, e os casos de referência para as respectivas Zonas Bioclimáticas.

Tabela 36 - Comparação dos resultados com os casos de referência

Zona Bioclimática	Caso	Consumo de ar-condicionado (kWh/m ² .ano)	Custo inicial (R\$)	Índice de conforto térmico (%)
1	C11-1	18,93	100.511,45	63,88
	CR-1	26,96	106.392,39	47,50
	Variação (%)	-29,79	-5,53	-34,49
	C12-1	18,88	100.511,45	63,74
	CR-1	26,96	106.392,39	47,50
	Variação (%)	-29,96	-5,53	34,20
2	C09-2	27,68	101.831,44	60,37
	CR-2	38,00	107.544,58	48,24
	Variação (%)	-24,03	-5,31	25,13
3	C08-3	23,42	100.809,59	62,17
	CR-3	33,08	102.778,73	56,29
	Variação (%)	-29,19	-1,92	10,44

Fonte: Autor.

A utilização das melhores soluções confere, para todas as Zonas Bioclimáticas analisadas, a redução do consumo de ar-condicionado e do custo inicial e a ampliação da quantidade de horas de conforto térmico, se comparadas aos respectivos casos de referência.

Analisando o consumo de ar-condicionado, observa-se que o caso C12-1 apresentou maior variação em relação ao caso de referência, enquanto o C09-2 obteve menor variação. Ainda, é possível destacar que o caso C12-1 apresentou o menor consumo de ar-condicionado dentre todas as soluções ótimas apontadas pelo método de decisão multicritério.

Além disso, os casos C11-1 e C12-1 apresentaram a maior variação de custo inicial quando comparados ao caso de referência, enquanto o caso C08-3 apresentou a menor variação. Todas as soluções ótimas apresentaram custos iniciais similares, porém o caso C09-2 apresentou o maior valor e os casos C11-1 e C12-1 possuem os menores custos.

Ainda, o caso C11-1 apresentou a maior variação de conforto térmico em relação ao caso de referência e o caso C08-3 obteve a menor variação. O caso C11-1 possui o maior percentual de horas de conforto térmico anual, enquanto o caso C09-2 apresentou o menor índice de conforto quando comparado às demais soluções ótimas (C11-1, C12-1 e C08-3).

5 CONCLUSÃO

No presente trabalho foram avaliados os resultados do processo de otimização da envoltória de edificações residenciais de energia zero no Rio Grande do Sul a partir de um modelo de decisão multicritério. Para isso, foram considerados como critérios de avaliação das alternativas o consumo de ar-condicionado, o custo inicial e o conforto térmico. Utilizando o método ELECTRE III, foram analisados quatro diferentes cenários de priorização dos critérios.

A utilização do *software* BEopt possibilitou a realização de simulações de forma automática, otimizando os elementos que compõem a envoltória da edificação analisada. Esse processo resultou em soluções que buscaram a redução do consumo energético da edificação, apontando o caso ótimo global, com a minimização do consumo, e casos ótimos intermediários, levando em consideração o custo da envoltória. Além disso, diante do potencial solar brasileiro, o dimensionamento dos sistemas fotovoltaicos necessários para a neutralização dos consumos dos casos ótimos permitiu a determinação de *Zero Energy Buildings*.

A estimativa de custos iniciais foi um fator relevante no levantamento de critérios a serem considerados na determinação da melhor solução para cada Zona Bioclimática. Observou-se que o projeto de edificações energeticamente eficientes não necessariamente demanda um maior investimento, sendo possível conciliar os parâmetros de eficiência energética e o custo, especialmente para a definição de um ZEB.

O conforto térmico do usuário durante todo o período de utilização da edificação deve ser levado em consideração em projetos de eficiência energética. Muitas vezes o uso de aparelhos de ar-condicionado pode ser limitado por questões sociais ou econômicas, então o projeto deve considerar o conforto térmico da edificação ventilada naturalmente como um critério essencial na determinação de envoltória de um ZEB.

Em todos os cenários, verificou-se que as melhores configurações de envoltória para as Zonas Bioclimáticas 1, 2 e 3 apresentam a fachada principal ao Sul, paredes de bloco cerâmico (14 cm) e argamassa interna e externa (2,5 cm), barreira radiante de 2 mm na cobertura, percentual de elementos transparentes de 16% e distribuição desses elementos de 30% nas fachadas frontal e posterior e 20% nas fachadas laterais. Para a ZB1, as paredes externas na cor preta e a cobertura em cores escuras, e as janelas com vidros simples de 3 mm também são indicados. Na ZB2, os resultados mostram que paredes na cor pérola, cobertura branca e a aplicação de vidros simples de 3 mm caracterizam a melhor solução. Na ZB3, recomenda-se paredes na cor pérola, cobertura branca e janelas com vidros simples de 6 mm.

A utilização das envoltórias recomendadas para cada Zona Bioclimática do Rio Grande do Sul proporcionou a redução do consumo de ar-condicionado e, em menor escala, do custo inicial e o aumento do índice de conforto térmico no interior das edificações.

A aplicação de um método de decisão multicritério se mostrou eficiente na determinação da solução mais apropriada diante dos cenários, pois possibilitou a integração de critérios e análise de diversas alternativas. A utilização do ELECTRE III permitiu a seleção de uma solução global, que apresentasse desempenhos satisfatórios quanto ao consumo de energia elétrica, custo inicial e conforto térmico.

Como limitação do trabalho, é possível destacar que as vedações verticais externas definidas têm influência direta nos resultados. Assim, a utilização de paredes com excesso de massa térmica no processo de otimização aponta resultados específicos para essas condições. Paredes leves que utilizam técnicas construtivas mais elaboradas podem ser adotadas em trabalhos futuros. Outra limitação é a utilização do padrão de uso de ar-condicionado de acordo com o RTQ-R, que não traduz a real demanda energética da edificação. Trabalhos futuros podem considerar a operação do ar-condicionado durante todo o dia para buscar a redução da demanda de ar-condicionado não somente no período noturno, como considera o RTQ-R.

O projeto de *Zero Energy Buildings* deve buscar essencialmente a redução do consumo de energia elétrica de edificações e a produção de energia a partir de fontes renováveis para suprir a demanda residual. Dentre os diversos parâmetros que influenciam o consumo energético de uma edificação, a envoltória se destaca, exercendo impacto também sobre o conforto térmico do usuário e no custo de implantação da edificação. As ferramentas computacionais de otimização podem auxiliar o projetista na determinação da envoltória mais eficiente energeticamente, mas a aplicação de um modelo de decisão multicritério é essencial para avaliar as alternativas em busca do maior benefício para o usuário.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Neste trabalho, foi considerado o consumo energético operacional (*site energy consumption*) da edificação para a definição net ZEB. Entretanto, é recomendável a realização de trabalhos que considerem o balanço energético a partir do consumo de energia primária (*source energy consumption*) ou ainda da energia incorporada (*embodied energy*) nos materiais de construção da edificação;
- A consideração da eficiência energética dos equipamentos da edificação pode auxiliar na minimização do consumo energético. Portanto, recomenda-se a utilização de

aquecimento solar passivo para reduzir o consumo de aquecimento da água utilizada na edificação Net ZEB;

- Os critérios de análise das soluções para a aplicação do modelo de decisão multicritério podem ser expandidos para realizar uma avaliação ambiental mais detalhada. Desse modo, podem ser adicionados como critérios a emissão de CO₂ e o conforto lumínico da edificação;
- Os graus de importância entre os critérios de avaliação foram escolhidos de forma arbitrária. Em trabalhos futuros, recomenda-se a realização de entrevistas ou aplicação de questionários para compreender a importância de cada critério, seja por parte do projetista ou para o usuário da edificação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

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

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-4**: edificações habitacionais - desempenho, parte 4: requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas - SVVIE. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

AKBARI, H.; KONOPACKI, S.; POMERANTZ, M. Cooling energy savings potential of reflective roofs for residential and commercial buildings in the United States. **Energy**, v. 24, p. 391–407, 1999.

ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). **Resolução Normativa nº 414, de 09 de Setembro de 2010**. Brasília, 2010. Disponível em: < <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2010414.pdf> >. Acesso em 10 de agosto de 2021.

ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). **Resolução Normativa nº 482, de 17 de Abril de 2012**. Brasília, 2012. Disponível em: < <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf> >. Acesso em 10 de agosto de 2021.

ASCIONE, F.; MASI, R. F. de; ROSSI, F. de; RUGGIERO, S.; VANOLI, G. P. Optimization of building envelope design for nZEBs in Mediterranean climate: Performance analysis of residential case study. **Applied Energy**, v. 183, p. 938–957, 2016.

ASHRAE. **Handbook of Fundamentals**. Atlanta: American Society for Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc., 2017.

ASHRAE. **ASHRAE Standard 55**: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta: American Society for Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc., 2017.

ATTIA, S.; HAMDY, M.; O'BRIEN, W.; CARLUCCI, S. Assessing gaps and needs for integrating building performance optimization tools in net zero energy buildings design. **Energy and Buildings**, v. 60, p. 110–124, 2013.

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.

BANIHABIB, M. E.; HASHEMI-MADANI, F. S.; FORGHANI, A. Comparison of Compensatory and non-Compensatory Multi Criteria Decision Making Models in Water Resources Strategic Management. **Water Resources Management**, v. 31, n. 12, p. 3745–3759, 2017.

BERLEZE, A. S.; BRASILEIRO, A. de B. H.; SILVOSO, M. M. Multi-objective optimization of the geometry of single-family housing to improve thermal performance. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 21, n. 2, p. 41–65, 2021.

BICHIOU, Y.; KRARTI, M. Optimization of envelope and HVAC systems selection for residential buildings. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 12, p. 3373–3382, 2011.

BRUNO, R.; BEVILACQUA, P.; CARPINO, C.; ARCURI, N. The cost-optimal analysis of a multistory building in the Mediterranean area: Financial and macroeconomic projections. **Energies**, v. 13, n. 5, 2020.

CHRISTENSEN, C.; HOROWITZ, S.; GIVLER, T.; COURTNEY, A.; BARKER, G. BEopt: Software for identifying optimal building designs on the path to zero net energy. *In*: SOLAR WORLD CONGRESS, 2005, Orlando, Florida. **Anais [...]**, p. 55–60, 2005.

CHRISTENSEN, C.; BARKER, G.; HOROWITZ, S. A sequential search technique for identifying optimal building designs on the path to zero net energy. *In*: SOLAR WORLD CONGRESS, 2005, Orlando, Florida. **Anais [...]**, p. 877–882, 2004.

ÇILDIR, A. S.; KÖKTÜRK, G.; TOKUÇ, A. Design approaches for retrofitting offices to reach nearly zero energy: A case study in the Mediterranean climate. **Energy for Sustainable Development**, v. 58, p. 167–181, 2020.

CLIMATE ONE BUILDING. Climate.onebuilding.org., 2021. Disponível em: <<http://climate.onebuilding.org/default.html>>. Acesso em: 30 abr. 2021.

CONGEDO, P. M.; BAGLIVO, C.; D'AGOSTINO, D.; ZACÀ, I. Cost-optimal design for nearly zero energy office buildings located in warm climates. **Energy**, v. 91, n. 244, p. 967–982, 2015.

D'AGOSTINO, Delia. Assessment of the progress towards the establishment of definitions of Nearly Zero Energy Buildings (nZEBs) in European Member States. **Journal of Building Engineering**, v. 1, p. 20–32, 2015.

D'AGOSTINO, D.; PARKER, D. A framework for the cost-optimal design of nearly zero energy buildings (NZEBs) in representative climates across Europe. **Energy**, v. 149, p. 814–829, 2018a.

D'AGOSTINO, D.; PARKER, D. A framework for the cost-optimal design of nearly zero energy buildings (NZEBs) in representative climates across Europe. **Energy**, v. 149, n. 2018, p. 814–829, 2018b.

D'AGOSTINO, D.; PARKER, D.; MELIÀ, P. Environmental and economic implications of energy efficiency in new residential buildings: A multi-criteria selection approach. **Energy Strategy Reviews**, v. 26, n. September, 2019.

DALBEM, R.; CUNHA, E. G. da; VICENTE, R.; FIGUEIREDO, A.; OLIVEIRA, R.; SILVA, A. C. S. B. da. Optimisation of a social housing for south of Brazil: From basic performance standard to passive house concept. **Energy**, v. 167, p. 1278–1296, 2019.

DANTAS, S. G.; POMPERMAYER, F. M. Viabilidade econômica de sistemas fotovoltaicos no Brasil e possíveis efeitos no setor elétrico. Rio de Janeiro: IPEA, 2018.

DENG, S.; WANG, R. Z.; DAI, Y. J. How to evaluate performance of net zero energy building - A literature research. **Energy**, v. 71, n. 2014, p. 1–16, 2014.

DOE – Department of Energy. **A Common Definition for Zero Energy Buildings**. Washington, n. September, p. 22, 2015.

DORNELLES, K. A. **Biblioteca de absorvância de telhas**: base de dados para análise de desempenho termoenergético de edifícios. São Carlos: IAU/USP, 2021.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Nota Técnica EPE 030/2018 - Uso de Ar-Condicionado no Setor Residencial Brasileiro: perspectivas e contribuições para o avanço em eficiência energética**, 2020a.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Balço Energético Nacional 2020: Ano base 2019**, 2020b.

EVINS, R. A review of computational optimisation methods applied to sustainable building design. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 22, p. 230–245, 2013.

FERRARA, M.; FABRIZIO, E.; VIRGONE, J.; FILIPPI, M. A simulation-based optimization method for cost-optimal analysis of nearly Zero Energy Buildings. **Energy and Buildings**, v. 84, p. 442–457, 2014.

FU, R.; FELDMAN, D.; MARGOLIS, R. U. S. **Solar Photovoltaic System Cost Benchmark: Q1 2018**. NREL, n. November, p. 1–47, 2018.

GARRIGA, S. M.; DABBAGH, M.; KRARTI, M. Optimal carbon-neutral retrofit of residential communities in Barcelona, Spain. **Energy and Buildings**, v. 208, 2020.

GIVONI, B. Comfort, climate analysis and building design guidelines. **Energy and Buildings**, v. 18, p. 11–23, 1992.

GOOD, C.; ANDRESEN, I.; HESTNES, A. G. Solar energy for net zero energy buildings - A comparison between solar thermal, PV and photovoltaic-thermal (PV/T) systems. **Solar Energy**, v. 122, n. 2015, p. 986–996, 2015.

GRIEGO, D.; KRARTI, M.; HERNÁNDEZ-GUERRERO, A. Optimization of energy efficiency and thermal comfort measures for residential buildings in Salamanca, Mexico. **Energy and Buildings**, v. 54, p. 540–549, 2012.

GUERELLO, A.; PAGE, S.; HOLBURN, G.; BALZAROVA, M. Energy for off-grid homes: Reducing costs through joint hybrid system and energy efficiency optimization. **Energy and Buildings**, v. 207, 2020.

HARKOUSS, F. **Optimal design of net zero energy buildings under different climates**. 2018. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Université Côte d’Azur, Nice, 2018.

HARKOUSS, F.; FARDOUN, F.; BIWOLE, P. H. Multi-objective optimization methodology for net zero energy buildings. **Journal of Building Engineering**, v. 16, n. August 2017, p. 57–71, 2018.

HEMSATH, T. L. Housing orientation's effect on energy use in suburban developments. **Energy and Buildings**, v. 122, p. 98–106, 2016.

HOROWITZ, S.; CHRISTENSEN, C.; BRANDEMUEHL, M.; KRARTI, M. Enhanced Sequential Search Methodology for Identifying Cost-Optimal Building Pathways. *In*: SIMBUILD, 2008, Berkley, California. **Anais [...]**, 2008.

IEA – International Energy Agency. Key World Energy Statistics 2020, 2020. Disponível em: <http://data.iea.org/payment/products/103-world-energy-statistics-and-balances-2018-edition-coming-soon.aspx%0Ahttps://www.oecd-ilibrary.org/energy/key-world-energy-statistics-2020_295f00f5-en>. Acesso em: 02 jan. 2021.

IEA et al. Tracking SDG 7: The Energy Progress Report. World Bank, p. 176, 2020. Disponível em: <<https://trackingsdg7.esmap.org/>>. Acesso em: 22 nov. 2020.

IHM, P.; KRARTI, M. Design optimization of energy efficient residential buildings in Tunisia. **Building and Environment**, v. 58, p. 81–90, 2012.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Sinopse do Censo Demográfico 2010**. Rio de Janeiro: IBGE, 2011.

INMETRO - INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA QUALIDADE E TECNOLOGIA. **Anexo Geral V – Catálogo de Propriedades Térmicas de Paredes, Coberturas e Vidros**. Anexo Da Portaria Inmetro No 50/ 2013, p. 134, 2013. Disponível em: <<http://www4.inmetro.gov.br/busca-google/?q=tabela V>>. Acesso em: 30 jun. 2020.

INMETRO - INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA QUALIDADE E TECNOLOGIA. Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência de Edificações Residenciais. Rio de Janeiro, 2014.

JUAN, Y. K.; GAO, P.; WANG, J. A hybrid decision support system for sustainable office building renovation and energy performance improvement. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 3, p. 290–297, 2010.

JUNGHANS, L. Sequential equi-marginal optimization method for ranking strategies for thermal building renovation. **Energy and Buildings**, v. 65, p. 10–18, 2013.

KALOGIROU, S. A.; FLORIDES, G.; TASSOU, S. Energy analysis of buildings employing thermal mass in Cyprus. **Renewable Energy**, v. 27, n. 3, p. 353–368, 2002.

KAPSALAKI, M.; LEAL, V.; SANTAMOURIS, M. A methodology for economic efficient design of Net Zero Energy Buildings. **Energy and Buildings**, v. 55, p. 765–778, 2012.

KENNEDY, J.; EBERHART, R. Particle swarm optimization. *In*: International Conference on Neural Networks, 1995. **Anais [...]**, p. 1942–1948, 1995.

KHEIRI, F. A review on optimization methods applied in energy-efficient building geometry and envelope design. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 92, n. May 2017, p. 897–920, 2018.

KURNITSKI, J.; SAARI, A.; KALAMEES, T.; VUOLLE, M.; NIEMELÄ, J.; TARK, T. 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.

KYLILI, A.; FOKAIDES, P. A. European smart cities: The role of zero energy buildings. **Sustainable Cities and Society**, v. 15, n. 2015, p. 86–95, 2015.

LI, D. H.W.; YANG, L.; LAM, J. C. Impact of climate change on energy use in the built environment in different climate zones - A review. **Energy**, v. 42, n. 1, p. 103–112, 2012.

LI, D. H.W.; YANG, L.; LAM, J. C. Zero energy buildings and sustainable development implications - A review. **Energy**, v. 54, p. 1–10, 2013.

LINCZUK, V. C. C.; BASTOS, L. E. G. Otimização multiobjetivo orientada ao desempenho térmico para o projeto de edificações de baixo consumo de energia na Região Sul do Brasil. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 20, n. 4, p. 509–529, 2020.

MAGNIER, L.; HAGHIGHAT, F. Multiobjective optimization of building design using TRNSYS simulations, genetic algorithm, and Artificial Neural Network. **Building and Environment**, v. 45, n. 3, p. 739–746, 2010.

MAHMUD, K.; AMIN, U.; HOSSAIN, M. J.; RAVISHANKAR, J. Computational tools for design, analysis, and management of residential energy systems. **Applied Energy**, v. 221, n. April, p. 535–556, 2018.

MARDANI, A. JUSOH, A.; NOR, K. M. D.; KHALIFAH, Z.; ZAKWAN, N.; VALIPOUR, A. Multiple criteria decision-making techniques and their applications - A review of the literature from 2000 to 2014. **Economic Research-Ekonomika Istrazivanja**, v. 28, n. 1, p. 516–571, 2015.

MARSZAL, A. J.; HEISELBERG, P.; BOURRELLE, J. S.; MUSALL, E.; VOSS, K.; SARTORI, I.; NAPOLITANO, A. Zero Energy Building - A review of definitions and calculation methodologies. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 4, p. 971–979, 2011.

MASOSO, O. T.; GROBLER, L. J. A new and innovative look at anti-insulation behaviour in building energy consumption. **Energy and Buildings**, v. 40, n. 10, p. 1889–1894, 2008.

MEDRANO-GÓMEZ, L. E.; IZQUIERDO, A. E. Social housing retrofit: Improving energy efficiency and thermal comfort for the housing stock recovery in Mexico. **Energy Procedia**, v. 121, p. 41–48, 2017.

NGUYEN, A. T.; REITER, S.; RIGO, P. A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. **Applied Energy**, v. 113, p. 1043–1058, 2014.

OECD. **OECD Environmental Outlook to 2050**. Paris: OECD, 2012.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. J. L. de.; RÜTER, R.; ABREU, S. L. de.; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G. de. **Atlas brasileiro de energia solar**. São José dos Campos: INPE, 2017.

ROGERS, M.; BRUEN, M. Choosing realistic values of indifference, preference and veto thresholds for use with environmental criteria within ELECTRE. **European Journal of Operational Research**, v. 107, n. 3, p. 542–551, 1998.

ROY, B. The outranking approach and the foundations of ELECTRE methods. **Theory and Decision**, v. 31, n. 1, p. 49–73, 1991.

SAATY, R. W. The analytic hierarchy process-what it is and how it is used. **Mathematical Modelling**, v. 9, n. 3–5, p. 161–176, 1987.

SALMINEN, P.; HOKKANEN, J.; LAHDELMA, R. Comparing multicriteria methods in the context of environmental problems. **European Journal of Operational Research**, v. 104, n. 3, p. 485–496, 1998.

SANTANA, Laila Oliveira. **Otimização multiobjetivo da geometria de edificações residenciais energeticamente eficientes por meio de algoritmos genéticos**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016.

SANTOS, I. P. dos; RÜTHER, R. Limitations in solar module azimuth and tilt angles in building integrated photovoltaics at low latitude tropical sites in Brazil. **Renewable Energy**, v. 63, p. 116–124, 2014. D

SARTORI, I.; NAPOLITANO, A.; VOSS, K. Net zero energy buildings: A consistent definition framework. **Energy and Buildings**, v. 48, p. 220–232, 2012.

SETTER, Lewis et al. Energy and hygrothermal performance of cross laminated timber single-family homes subjected to constant and variable electric rates. **Journal of Building Engineering**, v. 25, n. October 2018, 2019.

SHI, X.; YANG, W. Performance-driven architectural design and optimization technique from a perspective of architects. **Automation in Construction**, v. 32, p. 125–135, 2013.

SI, J.; MARJANOVIC-HALBURD, L.; NASIRI, F.; BELL, S. Assessment of building-integrated green technologies: A review and case study on applications of Multi-Criteria Decision Making (MCDM) method. **Sustainable Cities and Society**, v. 27, p. 106–115, 2016.

SORGATO, M. J.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. The effect of window opening ventilation control on residential building energy consumption. **Energy and Buildings**, v. 133, p. 1–13, 2016.

TADEU, S.; RODRIGUES, C.; TADEU, A.; FREIRE, F.; SIMÕES, N. Energy retrofit of historic buildings: Environmental assessment of cost-optimal solutions. **Journal of Building Engineering**, v. 4, p. 167–176, 2015.

TAVARES, Sérgio Fernando. **Metodologia de Análise do Ciclo de Vida Energético de Edificações Residenciais Brasileiras**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

TIAN, Z. C.; CHEN, W. Q.; TANG, P.; WANG, J. G.; SHI, X. Building energy optimization tools and their applicability in architectural conceptual design stage. **Energy Procedia**, v. 78, p. 2572–2577, 2015.

TORCELLINI, P et al. Zero Energy Buildings: A Critical Look at the Definition. *In*: ACEEE Summer Study Pacific Grove. ACEEE Summer Study Pacific Grove. **Anais [...]**, 2006.

TZENG, G.; HUANG, J. Multiple Attribute Decision Making. **Taylor & Francis**, 2011.

WILSON, Eric. Using BEopt to optimize home energy performance. **Home Energy**, v. 32, n. August, 2015.

WANG, W.; RIVARD, H.; ZMEUREANU, R. An object-oriented framework for simulation-based green building design optimization with genetic algorithms. **Advanced Engineering Informatics**, v. 19, n. 1, p. 5–23, 2005.

WILSON, E. et al. 2014 Building America House Simulation Protocols. **National Renewable Energy Laboratory**, p. 91, 2014.

YANG, L.; YAN, H.; LAM, J. C. Thermal comfort and building energy consumption implications - A review. **Applied Energy**, v. 115, p. 164–173, 2014.