OTIMIZAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UMA EDIFICAÇÃO RESIDENCIAL UNIFAMILIAR *ZEB* EM PALMAS – TO E APLICAÇÃO DO PROCESSO ANALÍTICO HIERÁRQUICO

Selton Fernandes de Sousa Lima (1); Liliane Bonadiman Buligon (2); Bruna Zambonato (3); Joaquim dos Santos Pizzutti (4)

(1) Engenheiro Civil, Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, seltonfernandes@gmail.com, Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Santa Maria – RS, 97105-900, 55 99924-1542

(2) Engenheira Civil, Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, libbonadimam@gmail.com, Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Santa Maria – RS, 97105-900, 55 99604-1763

(3) Arquiteta e Urbanista, Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura, paisagismo e Urbanismo, zambonato.bruna@acad.ufsm.br, Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Santa Maria – RS, 97105-900, 55 99662-7716

(4) Doutor, Professor do Departamento de Estruturas e Construção Civil, joaquimpizzutti@hotmail.com, Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Santa Maria – RS, 97105-900, 55 9637-7014

RESUMO

A popularização de *Zero Energy Buildings* (ZEB) pode auxiliar na redução do consumo energético mundial e, consequentemente, 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 classificá-las. O presente estudo tem como objetivo avaliar as configurações de envoltória resultantes do processo de otimização de uma edificação residencial unifamiliar ZEB para a cidade de Palmas – TO, considerando como critérios: o consumo de energia elétrica para resfriamento, o investimento inicial e o desempenho térmico. A otimização da eficiência energética foi realizada com o *software* BEopt, cujos dados de saída foram utilizados para realizar a estimativa de custo do sistema fotovoltaico e para o cálculo do percentual de atendimento ao conforto térmico mínimo dos casos ótimos. Por fim foi aplicado o Processo Analítico Hierárquico (AHP) para classificação das soluções obtidas. Verificou-se que o caso C11 apresenta a configuração mais favorável, a partir da consideração dos três critérios concomitantemente. 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 um ZEB.

Palavras-chave: zero energy building, otimização da eficiência energética, processo analítico hierárquico.

ABSTRACT

The popularization of Zero Energy Building (ZEB) can reduce global energy consumption and, consequently, environmental impacts. Optimization tools can be used to design an energy efficient building, combining variables to find the best solutions. After achieving the possible solutions, a multi-criteria decision methodology is needed. The present study aims to evaluate the envelope configurations according to the optimization process of a single-family residential ZEB for the city of Palmas - TO, considering as criteria: the consumption of electric energy for cooling, the initial investment, and the thermal performance. After the optimization of energy efficiency using the BEopt software, the cost estimate of the photovoltaic system was determined and the percentage of compliance with the minimum comfort of the optimal cases was computed. Then, the Hierarchical Process Analysis (AHP) was applied to classify the solutions. It was found that case C11 presents a more favorable configuration, considering the three criteria concomitantly. Thus, it was possible to verify that the optimization process results can be analyzed from a set of criteria, assisting the decision-making process when designing a ZEB.

Keywords: zero energy building, optimization of energy efficiency, analytic hierarchy process.

1. INTRODUÇÃO

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

A utilização de matrizes energéticas não renováveis conecta 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, gerando um comportamento cíclico desse processo.

O conforto térmico do indivíduo no ambiente exerce influência sobre os seus hábitos e, consequentemente, sobre o uso de aparelhos elétricos como ventilador, aquecedor e ar-condicionado (YANG; YAN; LAM, 2014). Estima-se que no Brasil, 20% de toda energia elétrica utilizada em uma residência seja consumida por aparelhos de condicionamento ambiental (ELETROBRÁS, 2009). 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, 2020), 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 anual de irradiação global é compreendida entre 4,25 kWh/m² e 6,5 kWh/m². Dessa forma, a irradiação solar global incidente no Brasil é 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). No Brasil, os valores máximos de irradiação solar global são observados na região próxima à cidade de Palmas - TO (PEREIRA *et al.*, 2006).

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 o 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 (D'AGOSTINO, 2015; KYLILI; FOKAIDES, 2015; 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, 2018).

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, conjunto de valores para cada variável analisada. Nesta metodologia, as variáveis discretas 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 Processo Analítico Hierárquico (AHP), criado por Saaty (1987), pode ser aplicado para atribuir pesos aos critérios utilizados e classificar as soluções, fornecendo ao projetista uma diretriz para a escolha da configuração mais vantajosa.

2. OBJETIVO

O objetivo deste artigo é avaliar as configurações de envoltória resultantes do processo de otimização da eficiência energética com o *software* BEopt, considerando o consumo de energia elétrica para resfriamento, o investimento inicial e o desempenho térmico de uma edificação residencial unifamiliar ZEB para a cidade de Palmas – TO.

3. MÉTODO

O processo de avaliação das configurações foi realizado de acordo com as seguintes etapas: (1) otimização da eficiência energética; (2) estimativa de custo do sistema fotovoltaico; (3) análise do desempenho térmico; (4) decisão multicritério.

3.1. Otimização da eficiência energética

Para a realização da otimização da eficiência energética com o *software* BEopt foi necessário inserir informações referentes à geometria da edificação, aos equipamentos elétricos e às variáveis relacionadas à envoltória a serem analisadas e seus respectivos custos. Para a simulação computacional, foi utilizado o arquivo climático da cidade de Palmas - TO, disponibilizado pelo Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LABEEE, 2020). A partir dos dados de entrada, o *software* BEopt realiza a combinação das variáveis com o objetivo de atingir o menor consumo de energia elétrica.

Desse modo, foi realizada a modelagem de uma edificação residencial unifamiliar representativa do padrão brasileiro, definida por Sorgato, Melo e Lamberts (2016), com dois dormitórios, sala de estar, cozinha e banheiro. A edificação tem 9,0 m de comprimento, 7,0 m de largura, totalizando 63 m² de área e pé direito de 2,80 m. O consumo de energia elétrica de equipamentos e iluminação adotado para a simulação, foi de 140 kWh/mês, conforme o estudo de Tavares (2006). A edificação foi simulada considerando a utilização de ar-condicionado com Coeficiente de Desempenho (COP) de 3,5 W/W, programado para manter a temperatura interna a 24°C durante o dia e a 25°C durante a noite.

Foram analisadas 6 composições de vedações verticais, escolhidas a partir do Anexo V da Portaria n° 50/2013 do INMETRO, descritas na Tabela 1. 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 a Zona Bioclimática 7, a que Palmas – TO pertence.

Tabela 1 - Composição das vedações verticais, adaptado de INMETRO (2013)

Item	Composição (cm)	U [W/(m².K)]	CT [kJ/(m².K)]
42	Argamassa interna (2,5) + bloco cerâmico (12,0 x 19,0 x 19,0) + argamassa externa (2,5)	2,24	155
14	Argamassa interna (2,5) + bloco cerâmico (14,0 x 19,0 x 29,0) + argamassa externa (2,5)	1,85	161
40	Argamassa interna (2,5) + bloco de concreto (14,0 x 19,0 x 39,0) + ar (4,0) + bloco de concreto (14,0 x 19,0 x 39,0) + argamassa externa (2,5)	1,43	439
38	Argamassa interna (2,5) + bloco cerâmico (9,0 x 14,0 x 19,0) + ar (4,0) + bloco cerâmico (9,0 x 14,0 x 19,0) + argamassa externa (2,5)	1,25	195
39	Argamassa interna (2,5) + bloco de concreto (14,0 x 19,0 x 39,0) + lã de rocha (4,0) + bloco de concreto (14,0 x 19,0 x 39,0) + argamassa externa (2,5)	0,90	441
37	Argamassa interna (2,5) + bloco cerâmico (9,0 x 14,0 x 19,0) + lã de rocha (4,0) + bloco cerâmico (9,0 x 14,0 x 19,0) + argamassa externa (2,5)	0,63	199

Além disso, foram considerados 3 tipos de vidro: comum (3mm), com Fator Solar (FS) de 87%; duplo (3mm + ar + 3mm), com FS de 76%; e laminado incolor (8mm), com FS de 57%. Os percentuais de área de abertura na fachada total foram estipulados conforme a NBR 15220-3 (ABNT, 2005), que recomenda área de ventilação para a Zona Bioclimática 7 entre 10% e 15%. A Tabela 2 apresenta os valores das variáveis discretas consideradas neste estudo.

Tabela 2 - Variáveis discretas consideradas na otimização

Variável	Unidade	Valores
Orientação solar	º	{0; 45; 90; 135; 180; 225; 270; 315}
Transmitância térmica da vedação vertical	W/(m².K)	{2,24; 1,85; 1,43; 1,25; 0,90; 0,63}
Absortância solar da vedação vertical	%	{10; 20; 30; 40; 50; 60; 70; 80; 90}
Absortância solar da cobertura	%	{10; 20; 30; 40; 50; 60; 70; 80; 90}
Percentual de área de abertura na fachada total	%	{10; 12,5; 15}
Fator solar do vidro	%	{87; 76; 57}
Espessura da barreira radiante na cobertura	mm	{0; 2}

Os custos relacionados aos valores das variáveis foram levantados a partir de consulta às tabelas de insumos e composições do Sistema Nacional de Preços e Índices para a Construção Civil (SINAPI), para o estado do Tocantins em janeiro de 2021. Com a otimização, foi possível obter, para cada caso simulado, o consumo energético, o respectivo custo das configurações, as temperaturas horárias externas e internas. Os dados de saída da otimização foram utilizados para estimar o custo do sistema fotovoltaico e para realizar a análise do desempenho térmico. Diante destes resultados, foi aplicado o Processo Analítico Hierárquico para as soluções ótimas, por meio do qual definiu-se a solução mais adequada de acordo com o julgamento dos critérios adotados.

3.2. Investimento inicial

A partir dos dados de consumo de energia elétrica das soluções ótimas, é possível realizar a estimativa de geração fotovoltaica para suprir a demanda. Assim, foi realizado o levantamento da irradiação média diária referente a cada caso ótimo, em função da orientação solar, no *software* Radiasol, elaborado pelo Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Em seguida, foi determinada a potência total necessária para o funcionamento do sistema a partir da Equação 1.

$$Pot = \frac{Epv}{(Irr * 30 * Pr)} \qquad \text{Equação 1}$$

Onde:
Pot é a potência total necessária para o funcionamento do sistema [kWp];
Epv é o consumo médio mensal [kWh/mês];
Irr é a irradiação média diária disponível para 30 dias [kWh/(m².dia)];
Pr é o rendimento do sistema [%].

O custo do sistema foi estimado a partir de resultados da pesquisa de preços de kits fotovoltaicos para o cliente final, apresentado no Estudo Estratégico de Geração Distribuída para o 2° Semestre de 2020 (GREENER, 2020). De acordo com o estudo, instalações fotovoltaicas de 4 kWp custavam 4,96 R$/Wp e instalações de 8 kWP custavam 4,42 R$/Wp em janeiro de 2021. Assim, foi estimado o custo do sistema fotovoltaico por meio da Equação 2.

$$Cpv = Cpvu * Pot \qquad \text{Equação 2}$$

Onde:
Cpv é o custo estimado do sistema fotovoltaico [R$];
Cpvu é o custo unitário do sistema fotovoltaico [R$/kWp];
Pot é a potência total necessária para o funcionamento do sistema [kWp].

Também foi possível verificar o custo da configuração para todos os casos, a partir dos dados de saída do processo de otimização da eficiência energética. Então, o investimento inicial para cada caso ótimo, composto pelo custo da configuração e pelo custo estimado do sistema fotovoltaico, foi calculado de acordo com a Equação 3.

$$I = Cc + Cpv \qquad \text{Equação 3}$$

Onde:
I é o investimento inicial [R$]
Cc é o custo da configuração [R$]
Cpv é o custo estimado do sistema fotovoltaico [R$].

3.3. Análise do desempenho térmico

Os dados de saída da otimização permitiram a análise do desempenho térmico da edificação em consonância com os critérios da metodologia proposta na NBR 15575-1 (ABNT, 2013b) para todo o ano. Foram extraídas as temperaturas internas e externas horárias das soluções ótimas e, então, foi realizada a análise de desempenho conforme a Tabela 3. Considerou-se, para cada dia do ano, Ti,máx como a temperatura interna máxima, Te,máx como a temperatura externa máxima, Ti,mín como a temperatura interna mínima e Te,mín como a temperatura externa mínima.

Tabela 3 – Critérios para análise de desempenho térmico, adaptado de NBR 15575-1 (ABNT, 2013b)

Nível de desempenho	Critério
Mínimo	Ti,máx ≤ Te,máx
Intermediário	Ti,máx ≤ (Te,máx – 1 °C)
Superior	Ti,máx ≤ (Te,máx – 2 °C) e Ti,mín ≤ (Te,mín + 1 °C)

Para a análise do desempenho térmico, os casos ótimos encontrados foram simulados novamente, porém sem o acionamento do ar-condicionado. Além disso, considerou-se a utilização da ventilação natural por meio da abertura de janelas. Para as simulações, foi considerada a ocupação composta por 4 pessoas (dois adultos e duas crianças), conforme o RTQ-r (2012). Assumiu-se que os ocupantes da edificação iriam abrir as janelas quando a umidade relativa do ar no exterior fosse menor que 70%. Também foi considerado que as janelas seriam fechadas quando a temperatura do ar no interior estivesse abaixo de 24°C durante o dia e de 25°C durante a noite.

3.4. Decisão multicritério

Para avaliar os casos ótimos definidos após o processo de otimização, foi utilizado o Processo Analítico Hierárquico, desenvolvido por Saaty (1987), que permite a utilização de critérios para classificar as alternativas avaliadas e apontar a solução mais adequada. Os critérios (consumo de energia elétrica para resfriamento, investimento inicial e desempenho térmico) foram organizados matricialmente e foi realizado o julgamento de importância, de acordo com a Tabela 4.

Tabela 4 - 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

Então, foi calculado o autovetor normalizado de cada linha da matriz. A matriz resultante desta operação e a matriz da soma das colunas da matriz de critérios foram utilizadas no cálculo do autovalor λmáx. Este índice é utilizado para quantificar a taxa de consistência (CR) pela Equação 4, que mede a coerência do julgamento dos critérios. Se o CR for maior que 10%, o julgamento deve ser refeito (SAATY, 1987).

$$CR = \frac{\lambda máx - n}{(n - 1) * RI} \qquad \text{Equação 4}$$

Onde:
CR é a taxa de consistência [%];
λmáx é o autovalor da matriz de critérios [adimensional];
n é a ordem da matriz de critérios [adimensional];
RI é o índice de consistência randômico [adimensional].

Na sequência, foi realizada a harmonização normalizada das alternativas (casos ótimos) para cada critério. Então, foi calculado o vetor de decisão por meio da soma do produto entre as matrizes de harmonização normalizada e do autovetor normalizado de cada critério. Por fim, as alternativas foram classificadas de acordo com o valor do seu vetor de decisão – quanto maior o vetor de decisão, melhor a alternativa.

4. RESULTADOS

4.1. Otimização da eficiência energética

No decorrer do processo de otimização, foi simulado um caso para cada configuração de variáveis, calculando seu respectivo consumo de energia elétrica e custo da configuração. Com a interação entre as variáveis, foram simulados 444 casos, dos quais 13 foram classificados como casos ótimos. A Figura 1 mostra a relação entre o consumo de energia elétrica o e o custo da configuração para todos os casos simulados durante a otimização.

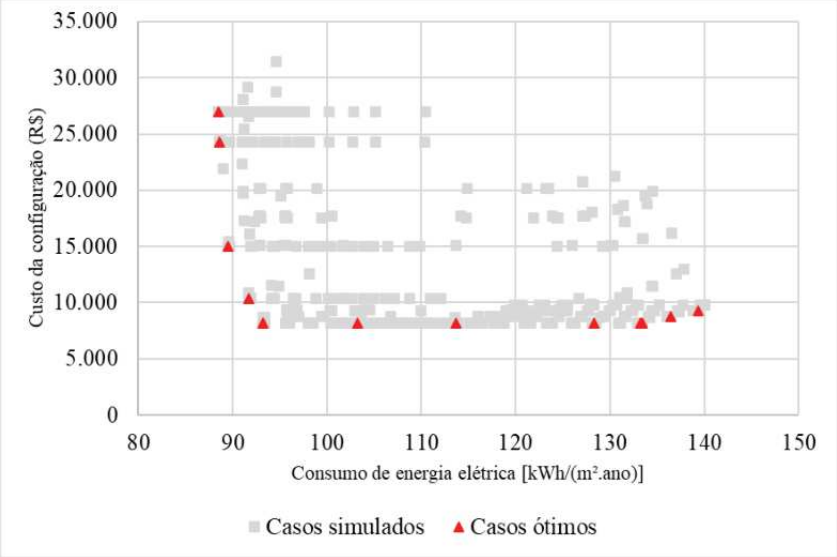

Figura 1 - Resultado da otimização do consumo de energia elétrica

Na Figura 1 estão dispostos, em coordenadas cartesianas, todos os casos simulados. Nos pontos em vermelho, foram identificados os casos de menor consumo a cada ponto sequencial, apontados como ótimos após o processo de otimização. Os custos da configuração, o consumo de energia elétrica para resfriamento e o consumo de energia elétrica total (considerando os usos para iluminação e equipamentos) dos 13 casos ótimos são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Resultados dos casos ótimos

Caso ótimo	Custo da configuração (R$)	Consumo de energia elétrica total [kWh/(m².ano)]	Consumo de energia elétrica para resfriamento [kWh/(m².ano)]
C01	9.287,56	139,33	112,44
C02	8.743,39	136,45	109,56
C03	8.198,99	133,42	106,53
C04	8.198,99	133,19	106,30
C05	8.198,99	128,31	101,42
C06	8.198,99	113,65	86,76
C07	8.198,99	103,23	76,34
C08	8.198,99	93,23	66,34
C09	8.198,99	93,18	66,29
C10	10.377,13	91,65	64,76
C11	14.982,15	89,51	62,62
C12	24.296,90	88,58	61,69
C13	26.955,38	88,48	61,59

A partir da análise desses resultados, nota-se que é possível reduzir o consumo de ar-condicionado em 41% (de 112,44 para 66,29 kWh/m².ano) reduzindo o custo em 11,7%. Entretanto, a partir do caso ótimo C09, é necessário aumentar consideravelmente o custo da configuração para reduzir o consumo. Para reduzir em 8% o consumo de energia elétrica para resfriamento (de 66,29 para 61,59 kWh/m².ano), é necessário aumentar o custo em 228,8%. Desse modo, o ponto de inflexão (caso ótimo C09) pode ser considerado como o de melhor custo-benefício, analisando somente o custo da configuração e o consumo de ar-condicionado.

Na Tabela 6 são apresentadas as configurações de cada solução ótima identificada na otimização. É possível verificar os valores mais frequentes de cada variável: orientação solar a sul (61,5%); parede composta de argamassa interna, bloco cerâmico de 14,0 cm e argamassa externa (84,6 %); parede de cor branca (53,8%); cobertura de cor branca (46,2%) ou de cor preta (46,2%); aberturas pequenas (84,6%), vidro simples de 3 mm (69,2%); e sem barreira radiante na cobertura (100,0%). Com base na análise de frequência dos valores das variáveis, os casos ótimos C06 e C09 representam as configurações mais frequentes.

Tabela 6 - Configurações das soluções ótimas

Caso ótimo	Variável						
	Orientação solar (°)	Transmitância térmica da vedação vertical [W/(m².K)]	Absortância solar da vedação vertical (%)	Absortância solar da cobertura (%)	Percentual de área de abertura na fachada total (%)	Fator solar do vidro (%)	Espessura da barreira radiante na cobertura (mm)
C01	225	1,85	90	90	15,0	87	0
C02	315	1,85	90	90	12,5	87	0
C03	225	1,85	90	90	10,0	87	0
C04	180	1,85	90	90	10,0	87	0
C05	180	1,85	70	90	10,0	87	0
C06	180	1,85	10	90	10,0	87	0
C07	135	1,85	40	20	10,0	87	0
C08	90	1,85	10	10	10,0	87	0
C09	180	1,85	10	10	10,0	87	0
C10	180	1,85	10	10	10,0	76	0
C11	180	1,85	10	10	10,0	57	0
C12	180	0,90	10	10	10,0	57	0
C13	180	0,63	10	10	10,0	57	0

4.2. Investimento inicial

A Figura 2 apresenta a comparação entre os custos dos casos ótimos. De modo geral, é possível identificar a tendência de que os casos ótimos com maior consumo de energia elétrica têm menores custos da configuração e maiores custos do sistema fotovoltaico. Assim, o caso C07 apresenta o menor investimento inicial (R$ 25.927,40), enquanto o caso C13 demanda o maior investimento inicial (R$ 44.002,60).

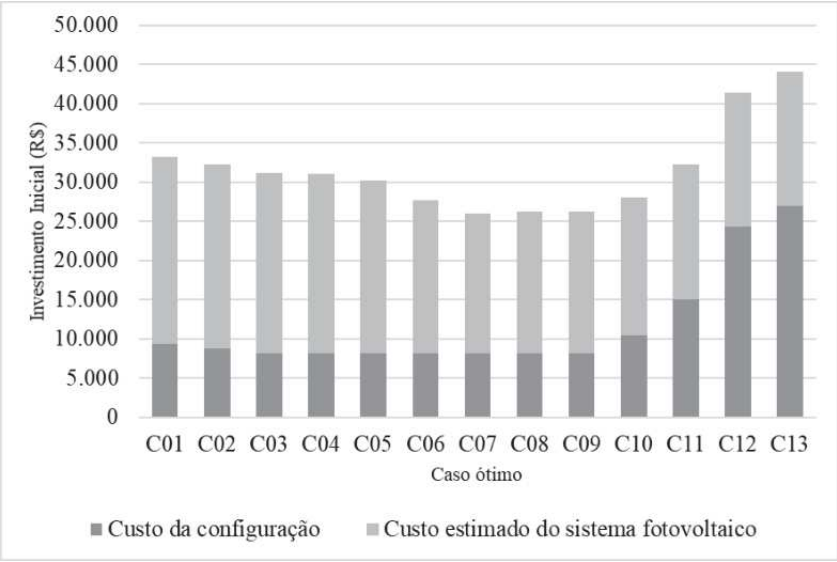

Figura 2 - Composição do investimento inicial parta os casos ótimos

4.3. Análise do desempenho térmico

A partir dos dados de temperatura interna e externa de cada caso, foi possível calcular a quantidade de dias do ano em que o desempenho térmico mínimo é atendido (Figura 3). O caso ótimo com menor atendimento ao desempenho térmico mínimo é o C01 (12,3%), enquanto os casos C10 e C11 têm maior percentual de atendimento (92,6%). É possível observar que mesmo com transmitância térmica das vedações verticais menores que o caso C11, os casos C12 e C13 não apresentam maiores percentuais de atendimento ao desempenho térmico mínimo. Verifica-se que este aumento isolamento térmico é benéfico para a redução do consumo de ar-condicionado, mas quando a edificação é submetida à ventilação natural, o isolamento pode reduzir o conforto térmico do usuário.

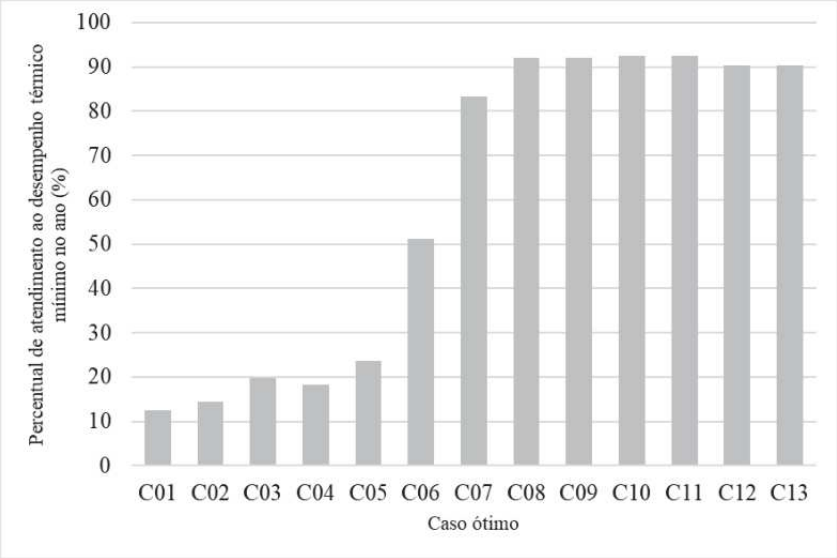

Figura 3 – Atendimento ao desempenho térmico mínimo dos casos ótimos por ano

4.4. Decisão multicritério

Após compilação dos resultados levantados, considerou-se que o consumo de energia elétrica para resfriamento e o atendimento ao desempenho térmico mínimo teriam mesmo peso para a escolha da solução (índice de significância 1), enquanto ambos teriam importância moderadamente superior (índice de significância 3) em relação ao investimento inicial. Diante disso, a Figura 4 apresenta a classificação dos casos ótimos a partir da ponderação dos critérios adotados para esta análise. O caso C11 foi definido como a melhor solução e o caso C01 foi classificado como a pior solução dentre os casos ótimos, baseado nos julgamento de critérios adotado.

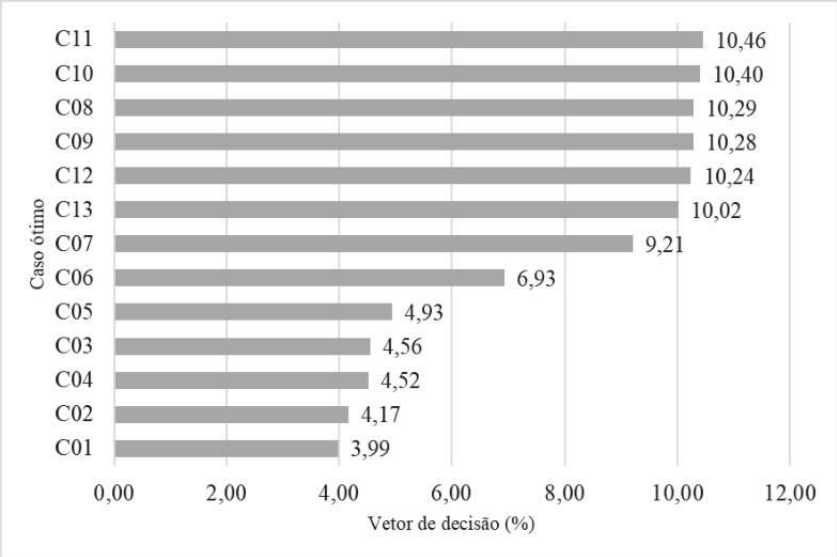

Figura 4 – Classificação das soluções ótimas

Apesar do caso C11 ser apontado com o melhor, os casos C10, C08, C09, C12 e C13 também apresentam vetores de decisão acima de 10,00%, mostrando-se como boas soluções, se comparadas aos demais casos ótimos analisados. Dentre esses casos, é possível identificar os valores mais frequentes de cada variável: orientação solar a sul (83,3%); parede composta de argamassa interna, bloco cerâmico de 14,0 cm e argamassa externa (66,7%); parede de cor branca (100,0%); cobertura de cor branca (100,0%); aberturas pequenas (100,0%), vidro laminado incolor 8 mm (50,0%); e sem barreira radiante na cobertura (100,0%). Também é possível observar que a configuração do caso C11 é composta pelos valores mais frequentes entre as melhores soluções.

De forma similar ao presente trabalho, Harkouss, Fardoun e Biwole (2018) utilizaram o Processo Analítico Hierárquico para atribuir pesos a cada função objetivo considerada na otimização multiobjetivo de uma edificação localizada em diversas zonas bioclimáticas no Líbano e na França. Posteriormente, os pesos definidos foram aplicados no método de ranqueamento ELECTRE-III (*Elimination and Choice Expressing the Reality*). Os resultados indicaram as estratégias definidas após a aplicação da metodologia foram essenciais para minimizar a demanda térmica, o consumo energético da edificação e o custo do ciclo de vida. Dessa forma, a metodologia proposta se mostrou uma ferramenta útil no projeto de NZEBs e facilitar a decisão de características da edificação em fases iniciais de projeto. Assim como no presente trabalho, a classificação das soluções deu origem a um resultado que considera os diversos critérios analisados.

Mardani *et al.* (2015) realizaram uma revisão sistemática de metodologias de decisão multicritério, analisando 393 artigos publicados entre 2000 e 2014 de 15 áreas diferentes. Os resultados mostraram que a aplicação dessas técnicas vem aumentando ao longo dos anos. De acordo com os autores, o Processo Analítico Hierárquico é a técnica de decisão multicritério mais aplicada e a segunda mais aplicada em trabalhos que integram mais de um método. Além disso, as áreas de energia, meio ambiente e sustentabilidade são as que mais aplicam metodologias de decisão multicritério.

5. CONCLUSÕES

Este estudo apresenta a aplicação do Processo Analítico Hierárquico associada à otimização da eficiência energética de uma edificação residencial unifamiliar ZEB. Os resultados dessa pesquisa mostram que o processo de otimização apresenta diferentes resultados que podem ser analisados a partir de um conjunto de critérios, buscando auxiliar o projetista a fazer decisões relacionas à envoltória. Estritamente sob o critério energético, o caso C13 apresenta o menor consumo, mas sob o ponto de vista do investimento inicial, o caso C07 se mostra mais vantajoso, enquanto o caso C11 apresenta o melhor desempenho térmico.

Diante de diversas possíveis soluções, a utilização de uma metodologia de decisão multicritério se faz necessária. Após a aplicação do Processo Analítico Hierárquico, verificou-se que o caso C11 é a melhor solução, partindo da utilização dos critérios concomitantemente e com base no julgamento considerado. Além disso, foi possível classificar todos os casos ótimos resultantes da otimização, facilitando a escolha da configuração de envoltória mais adequada.

Como principal limitação do trabalho, destaca-se o julgamento dos critérios. O grau de importância entre o consumo de energia para resfriamento, o investimento inicial e o desempenho térmico foi escolhido de forma arbitrária. Em futuros trabalhos, 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. **NBR 15220-3: Desempenho térmico de edificações**Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15575: Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos – Parte 1: Requisitos gerais**. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-4: Desempenho de edificações habitacionais**, 2021.

ATTIA, S. et al. 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.

CHRISTENSEN, C.; BARKER, G.; HOROWITZ, S. A sequential search technique for identifying optimal building designs on the path to zero net energy. **Proceedings of the Solar Conference**, v. 2, p. 877–882, 2004.

D'AGOSTINO, D. 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, 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.
ELETROBRÁS. **Avaliação do mercado de eficiência energética do Brasil - Sumário Executivo**. [s.l: s.n.].
EPE. **Balanço Energético Nacional 2020: Ano base 2019**, 2020.
GREENER. **Estudo Estratégico: Geração Distribuída**. [s.l: s.n.].
GUERELLO, A. et al. Energy for off-grid homes: Reducing costs through joint hybrid system and energy efficiency optimization. **Energy and Buildings**, v. 207, 2020.
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.
HOROWITZ, S. et al. **Enhanced Sequential Search Methodology for Identifying Cost-Optimal Building Pathways**, 2008.
IEA. **Key World Energy Statistics 2020International Energy Agency**, 2020. Disponível em: <https://webstore.iea.org/download/direct/4035%0Ahttp://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>
IEA et al. Tracking SDG 7: The Energy Progress Report. **World Bank**, p. 176, 2020.
INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA QUALIDADE E TECNOLOGIA. **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência de Edificações Residenciais**, 2012.
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.
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.
LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES. **Arquivos Climáticos**. Disponível em: <http://labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos>. Acesso em: 26 ago. 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.
MARDANI, A. et al. Multiple criteria decision-making techniques and their applications - A review of the literature from 2000 to 2014. **Economic Research-Ekonomska Istrazivanja** , v. 28, n. 1, p. 516–571, 2015.
MARSZAL, A. J. et al. Zero Energy Building - A review of definitions and calculation methodologies. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 4, p. 971–979, 2011.
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**. [s.l: s.n.].
PEREIRA, E. B. et al. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 1ª ed. São José dos Campos - SP: [s.n.].
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.
SARTORI, I.; NAPOLITANO, A.; VOSS, K. Net zero energy buildings: A consistent definition framework. **Energy and Buildings**, v. 48, p. 220–232, 2012.
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.
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.
TAVARES, S. F. **Metodologia de Análise do Ciclo de Vida Energético de Edificações Residenciais Brasileiras**. [s.l: s.n.].
YANG, L.; YAN, H.; LAM, J. C. Thermal comfort and building energy consumption implications - A review. **Applied Energy**, v. 115, p. 164–173, 2014.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio financeiro.