

Classificação Multicritério de Módulos Solares Fotovoltaicos: Comparação entre os Métodos Fuzzy-TOPSIS e Hesitant Fuzzy Linguistic-TOPSIS

CLAUDIA TEREZINHA SALDANHA

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ (UTFPR)

FRANCISCO RODRIGUES LIMA JUNIOR

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ (UTFPR)

Classificação Multicritério de Módulos Solares Fotovoltaicos: Comparação entre os Métodos *Fuzzy-TOPSIS* e *Hesitant Fuzzy Linguistic-TOPSIS*

1. INTRODUÇÃO E CONTEXTO INVESTIGADO

A capacidade instalada de geração solar fotovoltaica no Brasil apresentou uma expansão de 54,8% ao final de 2023 em relação ao ano anterior, segundo o Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2024, elaborado pela Empresa de Pesquisas Energéticas (EPE) (EPE, 2024). As elevadas tarifas convencionais de energia elétrica no país tornam a geração de eletricidade solar nas residências, chamada geração solar fotovoltaica distribuída, uma opção cada vez mais atrativa. Esse fato tem sido reconhecido como uma oportunidade até mesmo pelas distribuidoras de energia, como uma forma de reduzir a demanda ao Sistema Interligado Nacional – SIN (EPE, 2020).

A energia solar fotovoltaica representa atualmente 18,2% da matriz elétrica brasileira, sendo superada apenas pela hídrica. Em termos de geração elétrica residencial, mais de 99% é decorrente de fontes solares fotovoltaicas (ABSOLAR, 2024). Diversos fatores fomentam a utilização de sistemas de aquecimento solar residencial, como: a crescente disponibilidade de opções no mercado nacional, a redução de custos da tecnologia fotovoltaica nos últimos anos, a viabilidade econômica dos projetos, a perspectiva de economia de gastos com energia elétrica e os incentivos governamentais. Exemplos desses incentivos são: a isenção de ICMS, desconto no IPTU e a inclusão no programa “Minha Casa, Minha Vida” (Pereira et al., 2017).

Além disso, devido aos elevados índices de radiação solar aliados a uma baixa variabilidade mensal, a geração fotovoltaica tem grande potencial no Brasil. Mesmo nos locais menos favorecidos, o Brasil tem maior capacidade de gerar energia solar do que, por exemplo, qualquer localidade da Alemanha (EPE, 2020; Villalva; Gazoli, 2012).

De acordo com o relatório anual *Solar Heat Worldwide* de 2023, publicado pela *International Energy Agency* (IEA), os dados de 2021 mostram que o Brasil é o quinto maior país em capacidade total instalada de sistemas de aquecimento solar (Weiss; Spörk-Dür, 2023). Porém, em valores per capita ocupa apenas a 32ª posição. Essa discrepância é um indicativo que o mercado nacional tem bastante espaço de crescimento, pois apesar de possuir uma elevada disponibilidade solar, o aproveitamento brasileiro é menor que em diversos países menos favorecidos deste recurso. O referido relatório também mostra a América Latina, na qual o mercado brasileiro é dominante, como a região econômica mais constante e dinâmica, apresentando um aumento de nove vezes da área anual instalada entre 2000 e 2021.

Porém, apesar do cenário nacional favorável, essa demanda ainda é incipiente, principalmente devido à falta de informação da população e ao investimento inicial de instalação relativamente elevado (Villalva; Gazoli, 2012; Pereira et al., 2017). Ademais, a promoção da energia fotovoltaica no Brasil ocorreu somente a partir de 2012, com a regulamentação desta modalidade de geração pela ANEEL (Tolmasquim, 2016).

Um sistema de energia solar é formado, entre outros componentes, pelo módulo solar fotovoltaico, usualmente chamado de “placa” ou “painel” fotovoltaico. Ao realizar a escolha do módulo, além dos preços distintos, o profissional se depara com uma série de especificidades técnicas que os distinguem, tornando complexa a escolha da opção que trará melhores resultados entre os diferentes modelos presentes no mercado (Gnanasekaran; Venkatachalam, 2019). Diante disso, o uso de uma abordagem multicritério se mostra ideal para esta aplicação devido às diversas características técnicas dos módulos fotovoltaicos e os diferentes pesos dos critérios de decisão envolvidos.

1.1. Diagnóstico da Situação-Problema

O mercado de módulos solares fotovoltaicos tem elevado potencial econômico, principalmente no cenário nacional, representando uma forma alternativa e a, médio prazo,

lucrativa de geração de energia elétrica, inclusive para fins residenciais. No entanto, diante do desafio da seleção dos melhores módulos, é necessário considerar características distintas que vão desde as dimensões do módulo, o tipo de célula solar, o peso, a potência, até fatores subjetivos como a reputação do fabricante, a presença de suporte local no país e o atendimento às diversas certificações de qualidade. Afinal, esses também são critérios de suma importância, pois influenciam diretamente no processo de seleção dos modelos (Gnanasekaran; Venkatachalam, 2019; Pinho; Galdino, 2014; Villalva; Gazoli, 2012).

Os métodos multicritério são ferramentas matemáticas utilizadas por decisores no apoio à tomada de decisão. Essas técnicas objetivam auxiliar na seleção, classificação ou avaliação de várias alternativas com base em uma ampla gama de critérios, que podem ser quantitativos ou qualitativos. Além disso, podem considerar o julgamento de vários decisores, o que aumenta a complexidade do processo decisório, pois, por serem julgamentos humanos, são afetados por subjetividade e incerteza (Oliveira; Lima Junior; Galo, 2023).

Na literatura há ampla variedade de estudos que utilizam Métodos de Tomada de Decisão Multicritério (MCDM) em problemas relacionados à energia fotovoltaica. Alguns exemplos são a seleção da geolocalização da instalação, às vezes aliados ao uso de GIS (*Geographic Information System*) (Saraji; Streimikiene; Suresh, 2024; Kocabaldır; Yücel, 2023); escolha de fornecedor ou fabricante (Seker; Kahraman, 2021); avaliação de riscos (Abdel-Basset et al., 2023) e políticas energéticas (Ponte; Calili; Souza, 2021); e comparação com outros tipos de energias (Taylan et al., 2020).

O levantamento de estudos prévios realizado neste trabalho demonstrou a escassez de estudos multicritério relacionados à seleção, classificação ou ranqueamento de módulos solares fotovoltaicos em si. No Quadro 1 são apresentadas as publicações anteriores nesta área, destacando as técnicas de decisão utilizadas por cada estudo e os critérios adotados em suas aplicações. Nota-se que há alguns estudos nessa área que já utilizaram técnicas baseadas em lógica *fuzzy*, mas nenhum deles testou o uso de uma técnica *Hesitant Fuzzy*. Essa é uma abordagem que apoia processos decisórios sob incerteza e hesitação, principalmente quando os decisores hesitam na escolha das pontuações das alternativas e por isso preferem selecionar mais de um termo linguístico simultaneamente (Beg; Rashid, 2013; Magalhães et al., 2022).

Quadro 1– Estudos que classificam módulos solares fotovoltaicos com base em métodos multicritério

Autores	Técnicas utilizadas	Critérios adotados	Características
Kumar e Mahanta (2024)	PF-MEREC-SWARA-VIKOR (<i>Pythagorean Fuzzy – Method Removal Effects of Criteria - Stepwise Weight Assessment Ratio Analysis – Vlse Kriterijumska Optimizacija I Kaompromisno Resenje</i>)	Eficiência (%); Potência máxima (W); Durabilidade e confiabilidade; Preço; Tamanho e espaço requeridos; Disponib. de peças sobressalentes; Compatibilidade e integração; Garantia (anos)	8 critérios 5 alternativas 3 especialistas
Azevêdo Junior et al. (2023)	MEREC-SPOTIS (<i>Method Removal Effects of Criteria – Stable Preference Ordering Towards Ideal Solution</i>)	Potência (W); Preço (R\$); Peso (kg); Eficiência (%); Garantia (anos)	5 critérios 4 alternativas 3 especialistas*
Ziembra e Szaja (2023)	NEAT F-PROMETHEE (<i>New Easy Approach To Fuzzy Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluation</i>)	Potência máxima (W); Eficiência (%); Voltagem de circuito aberto (V); Corrente de curto-circuito (A); Peso (kg); Preço por watt (PLN/W); Área (m ²); Garantia (anos)	8 critérios 10 alternativas Sem especialista
El-Bayeh et al. (2021)	“M1” (novo algoritmo proposto no artigo) e TOPSIS (<i>Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution</i>)	Lado curto (m); Lado longo (m); Potência máxima (W); Custo total de instalação por módulo	9 critérios (4 <i>inputs</i>) 11 alternativas Sem especialista
Bączkiewicz et al. (2021)	COMET-TOPSIS-SPOTIS (<i>Characteristic Objects Method –</i>	Voltagem de circuito aberto (V); Corrente de curto-circuito (A);	6 critérios 30 alternativas

	<i>Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution - Stable Preference Ordering Towards Ideal Solution</i>	Eficiência do módulo (%); Potência por m ² ; Preço por m ² ; Peso por m ²	Sem especialista
Bouid, Elleuch e Frikha (2021)	SWARA-TOPSIS-VIKOR (<i>Stepwise Weight Assessment Ratio Analysis – Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution – Vlse Kriterijumska Optimizacija I Kaompromisno Resenje</i>)	Peso (kg/m ²); Potência por m ² ; Eficiência (%); Tolerância de energia; Coeficiente de temperatura V _{OC} ; Coeficiente de temperatura I _{SC} ; Certificações QSE; Classe de proteção Caixa de junção; Máxima carga (Pa); Garantia de desempenho; Garantia dos materiais; Degradação no 1º ano (%); Degradação no 2º ano (%); Preço	14 critérios 34 alternativas 10 especialistas
Rani et al. (2020)	PF-SWARA-VIKOR (<i>Pythagorean Fuzzy – Stepwise Weight Assessment Ratio Analysis – Vlse Kriterijumska Optimizacija I Kaompromisno Resenje</i>)	Potência máxima (W); Eficiência (%); Corrente de operação (A); Tensão de Operação (V); Peso do módulo (kg); Preço; Confiabilidade; Disponib. de peças sobressalentes	8 critérios 5 alternativas 3 especialistas
Sasikumar e Ayyappan (2019)	Fuzzy-AHP e TOPSIS (<i>Fuzzy Analytic Hierarchy Process e Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution</i>)	Potência máxima (W); Potência por m ² ; Eficiência (%); Tensão máxima de energia (VMP); Corrente de potência máxima (IMP); Peso (kg); Preço; Custo por watt; Confiabilidade; Disponib. de peças sobressalentes	10 critérios 5 alternativas Sem especialista
Balo e Şağbanşua (2016)	AHP (<i>Analytical Hierarchy Process</i>)	Características elétricas; Mecânicas; Econômicas; Ambientais; Satisfação do consumidor	5 critérios 26 sub-critérios 6 alternativas Sem especialista
Long e Geng (2015)	IVIFS (<i>Interval-Valued Intuitionistic Fuzzy Set</i>)	Qualidade; Custo; Reputação; Condição operacional; Capacidade de produção; Serviço pós-venda	6 critérios 26 sub-critérios 3 alternativas 2 especialistas*

*utilizados para definição dos critérios.

Fonte: Elaborado pelos autores

Além disso, a partir da revisão bibliográfica realizada, notou-se que nenhum estudo prévio comparou os métodos *Fuzzy-TOPSIS* e *HFL-TOPSIS* (*Hesitant Fuzzy Linguistic-TOPSIS*). É importante analisar e comparar técnicas mais recentes, que têm se desenvolvido devido à popularização de ferramentas de IA aliadas aos novos métodos de decisão multicritério (Oliveira; Lima Junior; Galo, 2023). Assim, a comparação entre essas técnicas agregará conhecimento sobre métodos de tomada de decisão para seleção e/ou classificação de módulos solares fotovoltaicos e, também, na área de métodos MCDM, auxiliando gestores e pesquisadores na escolha de técnicas mais eficazes.

Diante deste contexto, o objetivo deste estudo é comparar o uso de dois métodos MCDM no apoio à classificação de módulos solares fotovoltaicos disponíveis atualmente no mercado brasileiro. Foram escolhidos os métodos *Fuzzy-TOPSIS* e *HFL-TOPSIS* devido à simplicidade de aplicação e à capacidade que ambos os métodos apresentam para modelar avaliações linguísticas e apoiar problemas de tomada de decisão em grupo. Assim, o uso dos métodos *fuzzy* possibilita a avaliação de atributos não objetivos, levando em consideração opiniões técnicas divergentes. A presente comparação foca no ranqueamento estabelecido por cada método, além de apontar características que podem ser vistas como vantagens ou limitações destas técnicas ao serem aplicadas no referido domínio de problema.

Este estudo está organizado da seguinte maneira: a seção 2 apresenta um referencial teórico sobre aplicações de métodos multicritério na seleção de módulos solares fotovoltaicos; a seção 3 detalha os procedimentos metodológicos adotados para a intervenção proposta, incluindo os conceitos fundamentais e os passos dos métodos *Fuzzy-TOPSIS* e *HFL-TOPSIS*;

a seção 4 apresenta os resultados obtidos com base na aplicação de ambos os métodos; e, finalmente, a seção 5 apresenta a conclusão e a contribuição tecnológica-social deste estudo, com sugestões para trabalhos futuros.

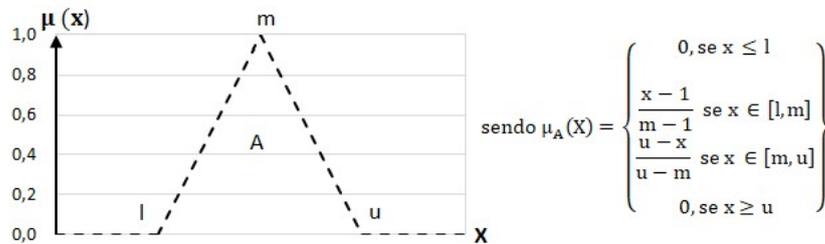
2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 O Método *Fuzzy*-TOPSIS

A combinação do método TOPSIS com a teoria dos conjuntos *fuzzy* foi proposta inicialmente por Chen (2000). A teoria dos conjuntos *fuzzy* (*Fuzzy Set Theory* - FST) foi proposta por Zadeh (1965) e permite a modelagem de sistemas sob cenários de incerteza, quando os critérios a serem considerados são subjetivos ou possuem atributos imprecisos. A utilização da FST nesse contexto de incerteza se dá pela sua capacidade de modelar um conjunto *fuzzy* utilizando uma função de pertinência $\mu_A(x): X \rightarrow [0.0, 1.0]$. Assim, diferentemente da teoria clássica dos conjuntos, permite a existência de níveis parciais de inclusão entre os valores de pertinência “falso” (0.0) e “verdadeiro” (1.0) (Lima Junior; Carpinetti, 2015).

O método *Fuzzy*-TOPSIS determina que as pontuações atribuídas às alternativas e os pesos dos critérios de decisão sejam variáveis linguísticas, descritas em linguagem natural ou artificial (Lima Junior; Carpinetti, 2015). Para a utilização das variáveis linguísticas, é necessário definir um conjunto de termos linguísticos que representará as diferentes partições das variáveis como, por exemplo, o conjunto composto pela escala ordinal “ruim”, “bom” e “ótimo”. Normalmente, a representação matemática dos termos linguísticos se dá através de números *fuzzy* triangulares e trapezoidais, que obedecem a condições de normalidade e continuidade. A Figura 1 ilustra um número *fuzzy* triangular, na forma (l, m, u) , onde m é um valor *crisp* formal para o conjunto *fuzzy*, l é o limite inferior e u é o limite superior. Quando se utiliza números *fuzzy* trapezoidais, esses são representados por quatro parâmetros (l, m, n, u) (Kumar; Barman, 2021; Lima Junior; Carpinetti, 2015).

Figura 1 - Representação do número *fuzzy* triangular



Fonte: Lima Junior e Carpinetti (2015)

O algoritmo do método *Fuzzy*-TOPSIS, na versão de Chen (2000), é descrito conforme Lima Junior e Carpinetti (2015) a seguir:

Passo 1. Agregar as avaliações linguísticas dos tomadores de decisão (DM_r) usando a Equação 1, que consolida as pontuações das alternativas. \tilde{X}_{ij} representa a pontuação da alternativa $A_i (i = 1, \dots, n)$ em relação ao critério $C_j (j = 1, \dots, m)$ dada pelo tomador de decisão $DM_r (r = 1, \dots, k)$. Em seguida, utilizar a Equação 2 para combinar os pesos dos critérios, na qual \tilde{w}_j indica o peso atribuído pelo DM_r .

$$\tilde{X}_{ij} = \frac{1}{K} [\tilde{x}_{ij}^1 + \tilde{x}_{ij}^r + \dots + \tilde{x}_{ij}^k] \quad (1)$$

$$\tilde{W}_j = \frac{1}{K} [\tilde{w}_j^1 + \tilde{w}_j^2 + \dots + \tilde{w}_j^k] \quad (2)$$

Passo 2. Construir uma matriz de decisão *fuzzy* \tilde{D} para as pontuações das alternativas e um vetor *fuzzy* \tilde{W} para os pesos dos critérios, conforme as Equações 3 e 4, respectivamente.

$$\tilde{D} = \begin{matrix} & C_1 & C_2 & \cdots & C_j & \cdots & C_m \\ A_1 & \tilde{x}_{11} & \tilde{x}_{12} & \cdots & \tilde{x}_{1j} & \cdots & \tilde{x}_{1m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ A_i & \tilde{x}_{i1} & \tilde{x}_{i2} & \cdots & \tilde{x}_{ij} & \cdots & \tilde{x}_{im} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ A_n & \tilde{x}_{n1} & \tilde{x}_{n2} & \cdots & \tilde{x}_{nj} & \cdots & \tilde{x}_{nm} \end{matrix} \quad (3)$$

$$\tilde{W}_j = [\tilde{w}_1, \tilde{w}_2, \dots, \tilde{w}_m] \quad (4)$$

Passo 3. Normalizar a matriz \tilde{D} através de uma escala de transformação linear. A matriz normalizada \tilde{R} é obtida pela Equação 5, na qual \tilde{r}_{ij} é calculado pelas Equações 6 e 7, com $u_j^+ = \max_i u_{ij}$ para critérios de benefício e $l_j^- = \min_i l_{ij}$ para critérios de custo.

$$\tilde{R} = [\tilde{r}_{ij}]_{m \times n} \quad (5)$$

$$\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{l_{ij}}{u_j^+}, \frac{m_{ij}}{u_j^+}, \frac{u_{ij}}{u_j^+} \right) \quad (6)$$

$$\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{l_j^-}{u_{ij}}, \frac{l_j^-}{m_{ij}}, \frac{l_j^-}{l_{ij}} \right) \quad (7)$$

Passo 4. Calcular a matriz normalizada e ponderada \tilde{V} (Equação 8) multiplicando os pesos \tilde{w}_j pelos elementos \tilde{r}_{ij} da matriz normalizada, conforme a Equação 9.

$$\tilde{V} = [\tilde{v}_{ij}]_{m \times n} \quad (8)$$

$$\tilde{V} = \tilde{r}_{ij} * \tilde{w}_j \quad (9)$$

Passo 5. Definir a solução ideal positiva *fuzzy* (FPIS, A+) e a solução ideal negativa (FNIS, A-) conforme as Equações 10 e 11, com $\tilde{v}_j^+ = (1, 1, 1)$ e $\tilde{v}_j^- = (0, 0, 0)$.

$$A^+ = \{\tilde{v}_1^+, \tilde{v}_j^+, \dots, \tilde{v}_m^+\} \quad (10)$$

$$A^- = \{\tilde{v}_1^-, \tilde{v}_j^-, \dots, \tilde{v}_m^-\} \quad (11)$$

Passo 6. Calcular a distância D_i^+ entre FPIS e as pontuações das alternativas da matriz \tilde{R} usando a Equação 12. Da mesma forma, determinar a distância D_i^- entre FNIS e as pontuações das alternativas usando a Equação 13. Nas Equações 12 e 13, $d(\cdot, \cdot)$ representa a distância entre dois números *fuzzy* pelo método *vertex*, conforme a Equação 14, no caso de números *fuzzy* triangulares.

$$D_i^+ = \sum_{j=1}^n d_v(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^+) \quad (12)$$

$$D_i^- = \sum_{j=1}^n d_v(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^-) \quad (13)$$

$$d(\tilde{x}, \tilde{z}) = \sqrt{\frac{1}{3} [(l_x - l_z)^2 + (m_x - m_z)^2 + (u_x - u_z)^2]} \quad (14)$$

Passo 7. Para cada alternativa avaliada, calcular o coeficiente de aproximação CC_i conforme a Equação 15.

$$CC_i = \frac{D_i^-}{(D_i^+ + D_i^-)} \quad (15)$$

Passo 8. Por fim, classificar as alternativas pela ordem decrescente dos valores de CC_i . Quanto mais próximo de 1,0 for o coeficiente, melhor o desempenho geral da alternativa.

2.2 O Método HFL-TOPSIS

O método HFL-TOPSIS (*Hesitant Fuzzy Linguistic-TOPSIS*) foi proposto por Beg e Rashid (2013) para solução de problemas sob incerteza e hesitação, através da combinação do TOPSIS com a representação *Hesitant Fuzzy Linguistic Term Sets* (HFLTS). O conceito de HFLTS foi proposto por Rodríguez, Martínez e Herrera (2012) e consiste na combinação da

teoria do *Hesitant Fuzzy Set* com os termos linguísticos *Fuzzy*. Assim como no TOPSIS, o HFL-TOPSIS ordena as alternativas comparando-as por similaridade com as soluções consideradas ideais, compostas das melhores e piores pontuações (Hajimolaali et al., 2017).

O algoritmo HFL-TOPSIS é descrito a seguir, conforme Magalhães (2020) e Borges et al. (2022):

Passo 1. Calcular a matriz de decisão agregada usando as Equações 16 e 17. A matriz de decisão agregada é expressa por $\tilde{X} = [x_{ij}]$, onde $\tilde{X}_{ij} = [S_{pij}, S_{qij}]$, e é calculada a partir das opiniões dos decisores $(\tilde{X}^1, \tilde{X}^2, \dots, \tilde{X}^k)$. $\tilde{X}^1 = [H_{S_{ij}}^1]_{m \times n}$ é uma matriz de decisão *fuzzy*; $E = \{e_1, e_2, \dots, e_k\}$ o conjunto de decisores; $A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$ o conjunto das alternativas; e $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ o conjunto dos critérios adotados para avaliação as alternativas. O desempenho da alternativa A_i em relação ao critério C_j é expresso por x_{ij} .

$$S_{pij} = \min \left\{ \begin{matrix} k & k \\ \min_{l=1} (\max H_{S_{ij}}^l), & \max_{l=1} (\min H_{S_{ij}}^l) \end{matrix} \right\} \quad (16)$$

$$S_{qij} = \max \left\{ \begin{matrix} k & k \\ \min_{l=1} (\max H_{S_{ij}}^l), & \max_{l=1} (\min H_{S_{ij}}^l) \end{matrix} \right\} \quad (17)$$

Passo 2. Calcular as soluções ideais positiva e negativa, considerando Ω_b como uma coleção de critérios de benefício (quanto maior o desempenho de C_j , maior a pontuação final) e Ω_c uma coleção de critérios de custo (quanto menor o desempenho de C_j , menor a pontuação final). A solução ideal positiva (SIP) é representada como $\tilde{A}^+ = (\tilde{V}_1^+, \tilde{V}_2^+, \dots, \tilde{V}_n^+)$ e a solução ideal negativa (SIN) como $\tilde{A}^- = (\tilde{V}_1^-, \tilde{V}_2^-, \dots, \tilde{V}_n^-)$, as quais são obtidas através das Equações 18 e 19, respectivamente.

$$\tilde{A}^+ = \left[\left(\begin{matrix} k \\ \max_{l=1} (\max H_{S_{ij}}^l) \end{matrix} \right) \middle| j \in \Omega_b, \left(\begin{matrix} k \\ \min_{l=1} (\min H_{S_{ij}}^l) \end{matrix} \right) \middle| j \in \Omega_c \right] \quad (18)$$

$$\tilde{A}^- = \left[\left(\begin{matrix} k \\ \min_{l=1} (\min H_{S_{ij}}^l) \end{matrix} \right) \middle| j \in \Omega_b, \left(\begin{matrix} k \\ \max_{l=1} (\max H_{S_{ij}}^l) \end{matrix} \right) \middle| j \in \Omega_c \right] \quad (19)$$

Passo 3. Construir uma matriz de separação ideal positiva (D^+) e uma matriz de separação ideal negativa (D^-), conforme as Equações 20 e 21. Na versão do método HFL-TOPSIS proposta por Beg e Rashid (2013), cada elemento dessas matrizes é calculado pela Equação 22, na qual p e q são os limites do envoltório do conjunto H_S^1 , e p' e q' os limites do envoltório de H_S^2 .

$$D^+ = \begin{pmatrix} d(x_{11}, \tilde{V}_1^+) + d(x_{12}, \tilde{V}_2^+) + \dots + d(x_{1n}, \tilde{V}_n^+) \\ d(x_{21}, \tilde{V}_1^+) + d(x_{22}, \tilde{V}_2^+) + \dots + d(x_{2n}, \tilde{V}_n^+) \\ \vdots \\ d(x_{m1}, \tilde{V}_1^+) + d(x_{m2}, \tilde{V}_2^+) + \dots + d(x_{mn}, \tilde{V}_n^+) \end{pmatrix} \quad (20)$$

$$D^- = \begin{pmatrix} d(x_{11}, \tilde{V}_1^-) + d(x_{12}, \tilde{V}_2^-) + \dots + d(x_{1n}, \tilde{V}_n^-) \\ d(x_{21}, \tilde{V}_1^-) + d(x_{22}, \tilde{V}_2^-) + \dots + d(x_{2n}, \tilde{V}_n^-) \\ \vdots \\ d(x_{m1}, \tilde{V}_1^-) + d(x_{m2}, \tilde{V}_2^-) + \dots + d(x_{mn}, \tilde{V}_n^-) \end{pmatrix} \quad (21)$$

$$d(H_S^1, H_S^2) = |q' - q| + |p' - p| \quad (22)$$

Passo 4. Por fim, calcular a proximidade relativa (*relative closeness* – RC) de cada alternativa usando a Equação 23, na qual $D_i^- = \sum_{j=1}^n d(x_{ij}, \tilde{V}_j^-)$ e $D_i^+ = \sum_{j=1}^n d(x_{ij}, \tilde{V}_j^+)$. Quanto maior for o valor de $RC(A_i)$, melhor será o desempenho final da alternativa A_i (Beg e Rashid, 2013).

$$RC(A_i) = \frac{D_i^-}{(D_i^+ + D_i^-)} \quad (23)$$

Optou-se por utilizar a adaptação do HFL-TOPSIS proposta por Magalhães (2020), pois, ao contrário do algoritmo originalmente proposto por Beg e Rashid (2013), a versão adaptada permite a atribuição de pesos aos critérios. Dessa forma, seguindo Magalhães (2020), o algoritmo de Beg e Rashid (2013) é aplicado duas vezes: a primeira para avaliação de pesos e a segunda para avaliação das alternativas. Ao avaliar os pesos, cada linha da matriz representa um critério e cada coluna um decisor. Na etapa de avaliação das alternativas, os pesos normalizados (w_j) são utilizados para ponderar as alternativas no cálculo das distâncias (Onar; Oztaysi; Kahraman, 2014), conforme as Equações 24 e 25, nas quais h_j^+ e h_j^- representam os elementos das SIPs e SINs.

$$D_i^+ = \sum_{j=1}^n w_j |h_{ij} - h_j^+| \quad (24)$$

$$D_i^- = \sum_{j=1}^n w_j |h_{ij} - h_j^-| \quad (25)$$

3. INTERVENÇÃO PROPOSTA

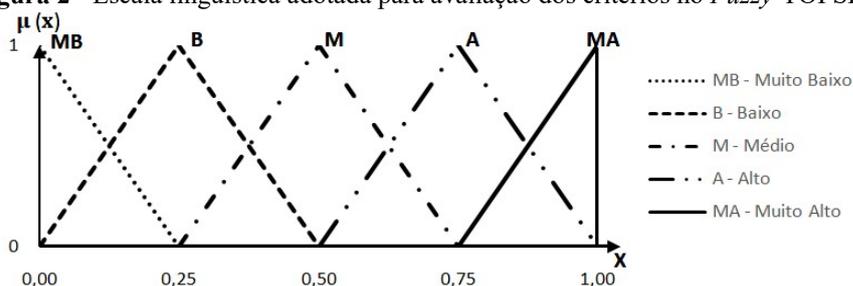
Este estudo caracteriza-se como quantitativo axiomático e é baseado em modelagem e simulação computacional. A modelagem objetiva reproduzir um sistema real, através da observação do cenário e da definição dos limites de um modelo quantitativo que representa esse sistema (Banks, 1998). A modelagem e simulação computacional permitem a construção desses modelos, que possuem variáveis de entrada e de saída que se relacionam quantitativamente entre si (Bertrand; Fransoo, 2002; Magalhães; Lima Júnior, 2021). Caracteriza-se como axiomático por objetivar a obtenção de soluções a partir da modelagem e assegurar que as mesmas ofereçam informações sobre o problema modelado (Bertrand; Fransoo, 2002).

Neste estudo o modelo foi estruturado com base em um conjunto de alternativas e nos critérios considerados como os mais adequados para a classificação de módulos solares fotovoltaicos. Enquanto as variáveis de entrada são os pesos dos critérios e as pontuações referentes ao desempenho de cada alternativa pré-selecionada, as variáveis de saída representam o ordenamento global das alternativas mediante o conjunto de requisitos propostos. Para o desenvolvimento do presente estudo, foram adotadas as seguintes etapas:

a) Pesquisa bibliográfica - com a finalidade de mapear os modelos anteriores que utilizaram métodos multicritério para a classificação de módulos solares fotovoltaicos, foram adotados os passos a seguir: (1) busca das *strings* “ALL=(solar photovoltaic multi-criteria)” e “ALL=(solar photovoltaic multicriteria)” nas bases de dados *Emerald*, *Science Direct*, *Scopus*, *Taylor & Francis* e *Web of Science* e, também, no buscador *Google Scholar*; (2) filtragem dos resultados a partir de 2014 (últimos dez anos), para abranger os estudos mais recentes; (3) seleção de publicações oriundas somente de periódicos científicos; (4) seleção de publicações somente nos idiomas inglês ou português; (5) leitura prévia do título, resumo e do texto para identificação e triagem dos estudos que utilizam modelos MCDM para seleção e/ou avaliação de módulos solares fotovoltaicos; e (6) eliminação dos resultados duplicados. No passo (5), foram consultadas as primeiras dez páginas de resultados da busca em cada base de dados. Os passos descritos foram aplicados em todas as bases exceto no *Google Scholar*, na qual os passos (3) e (4) não podem ser automatizados e, por isso, foram realizados manualmente. Além disso, a pesquisa bibliográfica foi complementada por artigos de periódicos e livros, para o embasamento conceitual e teórico relativo à problemática apresentada, o que subsidiou a definição dos critérios e o entendimento dos métodos *Fuzzy-TOPSIS* e *HFL-TOPSIS*.

b) Modelagem- a modelagem computacional foi realizada com o software MS Excel©, escolhido devido à ampla utilização acadêmica e comercial, além de proporcionar facilidade de implementação, replicação e exibição dos resultados. O método *Fuzzy-TOPSIS* foi modelado utilizando as equações da versão proposta por Chen (2000); o HFL-TOPSIS foi modelado utilizando o método desenvolvido por Beg e Rashid (2013) com a adaptação proposta por Magalhães (2020), que inclui uma etapa para avaliação dos pesos dos critérios; garantindo, assim, a comparabilidade dos métodos entre si. As escalas linguísticas adotadas para avaliação das alternativas e dos critérios foram baseadas em Chen (2000) e Lima Junior e Carpinetti (2015) para aplicação do método *Fuzzy-TOPSIS*, e em Rodríguez, Martinez e Herrera (2012) para o método HFL-TOPSIS. No método *Fuzzy-TOPSIS*, a escala consiste em cinco termos linguísticos associados aos respectivos números *fuzzy* triangulares (Figura 2). Para avaliação dos critérios, a escala é relacionada ao grau de importância de cada critério, com gradação de 0 a 1, sendo composta pelos termos linguísticos: “Muito Baixo” (0; 0; 0,25), “Baixo” (0; 0,25; 0,50), “Médio” (0,25; 0,50; 0,75), “Alto” (0,50; 0,75; 1) e “Muito Alto” (0,75; 1; 1). Para avaliação das alternativas, a escala está relacionada ao desempenho da alternativa em relação a cada critério, com gradação de 0 a 10, sendo os termos: “Muito Baixo” (0; 0; 2,5), “Baixo” (0; 2,5; 5,0), “Médio” (2,5; 5,0; 7,5), “Alto” (5,0; 7,5; 10) e “Muito Alto” (7,5; 10; 10). No método HFL-TOPSIS seguiu-se a mesma lógica, sendo que a escala também é de cinco termos e utiliza a mesma nomenclatura anterior. Porém, na aplicação, considera-se a formação dos envoltórios de HFLTS por valores que variam unitariamente de 1 a 5, de “Muito Baixo” a “Muito Alto”, respectivamente.

Figura 2 - Escala linguística adotada para avaliação dos critérios no *Fuzzy-TOPSIS*



Fonte: Elaborado pelos autores

c) Aplicação – o objetivo da aplicação foi a classificação de módulos solares fotovoltaicos utilizando os modelos computacionais desenvolvidos. A avaliação das alternativas e características selecionadas foi baseada nos julgamentos linguísticos de três decisores independentes, formados em Engenharia Industrial Elétrica, que atuam como docentes universitários e possuem experiência acadêmica e profissional relacionada à utilização de módulos solares fotovoltaicos há mais de 15 anos. Devido à elevada experiência na área, o primeiro decisor também foi responsável por auxiliar na definição dos critérios e na escolha das alternativas mais significativas do mercado, além de participar da avaliação destas alternativas. A coleta dos dados foi realizada remotamente, utilizando um formulário de autopreenchimento simples, contendo o objetivo do estudo, as alternativas e os critérios adotados, as escalas linguísticas que deveriam ser utilizadas e os espaços (células) destinados à avaliação dos critérios e alternativas. Além disso, foram apresentadas aos decisores as folhas de dados (*datasheets*) fornecidas pelos fabricantes, contendo as características de cada um dos modelos de módulos fotovoltaicos selecionados como alternativas desse estudo. Optou-se por realizar uma coleta de dados unificada, em que a avaliação linguística coletada, tanto em relação aos critérios como às alternativas, fosse passível de ser replicada para os dois métodos de decisão multicritério escolhidos. Neste estudo, todos os critérios foram considerados como de benefício. Após a coleta, os dados foram convertidos de acordo com as escalas apresentadas no item anterior e, então, inseridos nos modelos no MS Excel©.

d) Comparação - por último, comparou-se os resultados obtidos por meio da análise do ranqueamento de alternativas fornecido por cada método. Adicionalmente, por meio da análise dos resultados da aplicação e da estrutura dos métodos *Fuzzy-TOPSIS* e *HFL-TOPSIS*, identificou-se algumas vantagens e limitações dos métodos existentes, considerando as características do problema em questão. Os resultados são apresentados na seção 4.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A coleta de dados se iniciou pela composição da equipe de decisores. O primeiro decisor (D_1), devido à elevada experiência na área, foi convidado a participar na escolha dos critérios considerados essenciais na seleção e comparação de módulos solares fotovoltaicos e, também, na definição dos modelos de módulos mais representativos no mercado. O Quadro 2 apresenta as alternativas selecionadas para este estudo.

Quadro 2 - Modelos de módulos solares fotovoltaicos selecionados como alternativas neste estudo

Alternativa	Fabricante	Modelo do Módulo Solar Fotovoltaico
A1	Hanersun	Mono Perc - Hitouch6 - CP21-66H
A2	Astronergy	Astro N5 - CHSM72N (DG)/F-HC
A3	LONGi	Hi-MO 5m - LR5-72HBD
A4	Sunova Solar	Tangra L HD
A5	Ourolux Solar	Cód. 70092 - Série de 182mm
A6	CanadianSolar	BiHiKu7 - CS7N-670MB-AG
A7	Honor Solar	Honor Solar - HY-M10/144
A8	Era Solar	ERA-RC-66HC
A9	Vertex	Vertex - TSM-DE19R
A10	CanadianSolar	BiHiKu6 - CS6W-555MB-AG

Fonte: Elaborado pelos autores

Assim, apresentou-se ao D_1 uma lista de critérios pré-selecionados, baseada em estudos anteriores (Quadro 1), da qual ele pôde excluir ou incluir novos critérios. Em seguida, a partir dos critérios escolhidos, modelou-se a aplicação, na qual o D_1 também atuou como avaliador dos critérios e alternativas. A avaliação consistiu na definição linguística, com base na escala apresentada na seção 3, do grau de importância de cada critério a nível global e, em seguida, na avaliação do desempenho das alternativas em relação a cada critério. O Decisor 2 (D_2) e o Decisor 3 (D_3), que também possuem experiência na área, atuaram como avaliadores dos critérios e alternativas propostas.

Os critérios escolhidos pelo decisor e adotados neste estudo são os seguintes:

a) Fabricante do módulo solar fotovoltaico - representa o grau de reputação do fabricante no mercado e, indiretamente, a qualidade do produto (Tolmasquim, 2016; Pinho; Galdino, 2014);

b) Tipo de célula solar fotovoltaica - os módulos tradicionais são compostos por células solares inteiras (*full cell*), mas vários fabricantes têm utilizado a tecnologia de células cortadas ao meio (*half cell*), que promove uma melhora no desempenho e aumento da durabilidade do módulo (Tolmasquim, 2016; Pinho; Galdino, 2014; Villalva; Gazoli, 2012);

c) Potência do módulo solar fotovoltaico (W_p) - determina a capacidade de geração de energia elétrica do módulo fotovoltaico (Pinho; Galdino, 2014);

d) Eficiência do módulo solar fotovoltaico (%) - é a porcentagem da energia luminosa do sol (W) transformada em energia elétrica utilizável pela radiação que atinge a sua superfície (m^2), ou seja, é a geração de energia elétrica em W/m^2 (Pinho e Galdino, 2014);

e) Peso do módulo solar fotovoltaico (kg) - influencia o projeto e a instalação do sistema, relacionado à capacidade do telhado ou estrutura em que será instalado, além de impactar no transporte e manuseio dos módulos (Villalva; Gazoli, 2012);

f) Coeficientes de temperatura do módulo solar fotovoltaico ($\%/^{\circ}C$) - essa característica indica como a eficiência do módulo solar fotovoltaico é afetada pelas variações de temperatura ambiente. Neste estudo, consideraram-se três coeficientes como critérios: **f.1)**

Coefficiente de Temperatura de Potência (P_{MAX}), que representa a perda percentual da potência máxima de saída do módulo solar com base na temperatura; **f.2) Coeficiente de Temperatura de Tensão (V_{OC})**, que indica como a tensão de circuito aberto (V_{OC}) do módulo solar varia com a temperatura ambiente; e **f.3) Coeficiente de Temperatura de Corrente (I_{SC})**, que indica como a corrente de curto-circuito (I_{SC}) do módulo solar varia com a temperatura ambiente (Pinho; Galdino, 2014);

g) Tipo do módulo solar fotovoltaico - atualmente, a tecnologia mais adotada em módulos é a de silício cristalino (monocristalino ou policristalino), que apresentam as maiores potências, eficiência e durabilidade. Mas também podem ser de filmes finos (de Silício amorfo, Telureto de Cádmio ou Disseleneto de cobre-índio-gálio) ou utilizar concentrador fotovoltaico (CPV) (Tolmasquim, 2016);

h) Garantia de produção energética do módulo solar fotovoltaico (anos) - relaciona-se à perda anual de eficiência, levando em conta se o módulo irá continuar gerando energia até uma determinada quantidade de sua potência de fabricação (Pinho; Galdino, 2014; Villalva; Gazoli, 2012).

Esses critérios contemplam características físicas dos módulos, fatores de durabilidade, relacionados ao custo final do produto e, também, à percepção das diferentes marcas pelos especialistas. O Quadro 3 sintetiza a coleta de dados, apresentando os critérios definidos, os julgamentos linguísticos individuais dos decisores a respeito da importância atribuída a cada critério isoladamente e, também, ao desempenho de cada uma das alternativas em relação aos critérios adotados.

Quadro 3 - Avaliação linguística dos decisores sobre os critérios e os módulos solares fotovoltaicos

Descrição do critério	Decisor	Avaliações dos decisores											
		Critério	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	
C1 - Fabricante do módulo solar fotovoltaico	D ₁	MA	MA	A	A	MA	M	MA	MA	M	MA	MA	
	D ₂	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	
	D ₃	A	A	A	A	A	A	MA	A	A	A	MA	
C2 - Tipo de célula solar fotovoltaica (<i>Half</i> ou <i>Full cell</i>)	D ₁	A	MA										
	D ₂	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	
	D ₃	MA	MA	MA	MA	MA	MA	MA	MA	MA	MA	MA	
C3 - Potência do módulo solar fotovoltaico (Wp)	D ₁	MA	MA	A	A	MA	A	MA	A	MA	A	A	
	D ₂	MA	MA	MA	MA	MA	MA	MA	MA	MA	MA	MA	
	D ₃	MA	MA	A	A	MA	A	MA	A	MA	A	A	
C4 - Eficiência do módulo solar fotovoltaico (%)	D ₁	MA	A	MA	MA	MA	A	A	MA	MA	A	A	
	D ₂	MA	MA	MA	MA	MA	MA	MA	MA	MA	MA	MA	
	D ₃	MA	A	MA	MA	MA	A	A	MA	MA	A	A	
C5 - Peso do módulo solar fotovoltaico (kg)	D ₁	A	A	A	A	MA	MA	M	MA	MA	MA	A	
	D ₂	MA	MA	MA	MA	MA	MA	MA	MA	MA	MA	MA	
	D ₃	M	M	M	M	MA	MA	M	MA	MA	A	M	
C6 - Coeficiente de temperatura do módulo solar fotovoltaico (%/°C)	C6A - P_{MAX}	D ₁	MA	A	MA	A	MA	M	A	M	MA	A	A
		D ₂	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
		D ₃	A	A	MA	A	MA	M	A	A	MA	A	A
	C6B - V_{OC}	D ₁	MA	A	MA	A	A	M	A	A	MA	MA	A
		D ₂	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
		D ₃	A	A	MA	A	A	M	A	A	MA	MA	A
	C6C - I_{SC}	D ₁	MA	A	MA	A	MA	A	A	MA	MA	MA	A
		D ₂	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
		D ₃	A	MA	A	MA	A	MA	MA	A	A	M	MA
C7 - Tipo do módulo solar fotovoltaico (Monocristalino ou Policristalino)	D ₁	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	
	D ₂	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	
	D ₃	MA	MA	MA	MA	MA	MA	MA	MA	MA	MA	MA	
C8 - Garantia de produção energética do módulo solar fotovoltaico (anos)	D ₁	MA	A	MA	MA	MA	A	MA	MA	MA	A	MA	
	D ₂	MA	MA	MA	MA	MA	MA	MA	MA	MA	MA	MA	
	D ₃	MA	A	MA	MA	MA	A	MA	MA	MA	A	MA	

Fonte: Elaborado pelos autores

Para executar a aplicação do *Fuzzy-TOPSIS*, os julgamentos do Quadro 3 foram convertidos de acordo com as escalas linguísticas apresentadas na seção 3, resultando em números *fuzzy* triangulares que formaram a matriz de decisão \tilde{D} e o vetor \tilde{W} , com base nas Equações 3 e 4, respectivamente. Os julgamentos convertidos e agregados relativos ao método *Fuzzy-TOPSIS* são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Julgamentos agregados pelo método *Fuzzy-TOPSIS*, em números *fuzzy* triangulares

	Critério	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	
C1	<i>l</i>	0,50	5,00	4,17	4,17	5,00	3,33	5,83	5,00	3,33	5,00	5,83
	<i>m</i>	0,75	7,50	6,67	6,67	7,50	5,83	8,33	7,50	5,83	7,50	8,33
	<i>u</i>	0,92	9,17	9,17	9,17	9,17	8,33	9,17	9,17	8,33	9,17	9,17
C2	<i>l</i>	0,50	5,83	5,83	5,83	5,83	5,83	5,83	5,83	5,83	5,83	5,83
	<i>m</i>	0,75	8,33	8,33	8,33	8,33	8,33	8,33	8,33	8,33	8,33	8,33
	<i>u</i>	0,92	9,17	9,17	9,17	9,17	9,17	9,17	9,17	9,17	9,17	9,17
C3	<i>l</i>	0,75	7,50	5,83	5,83	7,50	5,83	7,50	5,83	7,50	5,83	5,83
	<i>m</i>	1,00	10,00	8,33	8,33	10,00	8,33	10,00	8,33	10,00	8,33	8,33
	<i>u</i>	1,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
C4	<i>l</i>	0,75	5,83	7,50	7,50	7,50	5,83	5,83	7,50	7,50	5,83	5,83
	<i>m</i>	1,00	8,33	10,00	10,00	10,00	8,33	8,33	10,00	10,00	8,33	8,33
	<i>u</i>	1,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
C5	<i>l</i>	0,50	5,00	5,00	5,00	7,50	7,50	4,17	7,50	7,50	6,67	5,00
	<i>m</i>	0,75	7,50	7,50	7,50	10,00	10,00	6,67	10,00	10,00	9,17	7,50
	<i>u</i>	0,92	9,17	9,17	9,17	10,00	10,00	8,33	10,00	10,00	10,00	9,17
C6A	<i>l</i>	0,58	5,00	6,67	5,00	6,67	3,33	5,00	4,17	6,67	5,00	5,00
	<i>m</i>	0,83	7,50	9,17	7,50	9,17	5,83	7,50	6,67	9,17	7,50	7,50
	<i>u</i>	1,00	10,00	10,00	10,00	10,00	8,33	10,00	9,17	10,00	10,00	10,00
C6B	<i>l</i>	0,58	5,00	6,67	5,00	5,00	3,33	5,00	5,00	6,67	6,67	5,00
	<i>m</i>	0,83	7,50	9,17	7,50	7,50	5,83	7,50	7,50	9,17	9,17	7,50
	<i>u</i>	1,00	10,00	10,00	10,00	10,00	8,33	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
C6C	<i>l</i>	0,58	5,83	5,83	5,83	5,83	5,83	5,83	5,83	5,83	5,00	5,83
	<i>m</i>	0,83	8,33	8,33	8,33	8,33	8,33	8,33	8,33	8,33	7,50	8,33
	<i>u</i>	1,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	9,17	10,00
C7	<i>l</i>	0,63	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
	<i>m</i>	0,88	7,50	7,50	7,50	7,50	7,50	7,50	7,50	7,50	7,50	7,50
	<i>u</i>	0,83	9,17	9,17	9,17	9,17	9,17	9,17	9,17	9,17	9,17	9,17
C8	<i>l</i>	0,75	5,83	7,50	7,50	7,50	5,83	7,50	7,50	7,50	5,83	7,50
	<i>m</i>	1,00	8,33	10,00	10,00	10,00	8,33	10,00	10,00	10,00	8,33	10,00
	<i>u</i>	0,92	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00

Fonte: Elaborado pelos autores

Então, calculou-se a matriz normalizada \tilde{R} com base nas Equações 5, 6 e 7 que, em seguida, foi ponderada, obtendo-se a matriz \tilde{V} , conforme as Equações 8 e 9. Foram definidas as soluções ideais positivas e negativas (Equações 10 e 11), exibidas na Tabela 2, e calculadas as distâncias D_i^+ e D_i^- (Equações 12 e 13). Algumas tabelas foram suprimidas neste artigo devido ao espaço limitado.

Tabela 2 – Soluções ideais pelo método *Fuzzy-TOPSIS*

	C1		C2		C3		C4		C5		C6A		C6B		C6C		C7		C8			
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>																			
A+	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
A-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fonte: Elaborado pelos autores

Em relação à aplicação do HFL-TOPSIS (Magalhães, 2020), realizou-se inicialmente o agrupamento dos julgamentos dos decisores em relação aos critérios, seguido pela conversão desses para o formato de HFLTS, de acordo com Rodríguez, Martínez e Herrera (2012). Em seguida, pelo algoritmo de Beg e Rashid (2013), calculou-se a matriz de decisão

agregada (Equações 16 e 17), as soluções ideais positiva e negativa (Equações 18 e 19), mostradas na Tabela 3, e as matrizes de separação positiva e negativa (Equações 20 e 21). Utilizou-se a Equação 23 para o cálculo de RC, que nesta etapa representa o desempenho final de cada critério com base no julgamento dos decisores. E, por fim, normalizou-se RC, obtendo-se os pesos normalizados w_j . Os resultados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Cálculo dos pesos doscritérios no HFL-TOPSIS

Critérios	Matriz de decisão						Matriz de separação negativa						Matriz de separação positiva				RC(C _i)	w _j				
	D ₁		D ₂		D ₃		D ₁	D ₂	D ₃	D ₋	D ₁	D ₂	D ₃	D ₊								
	S _p	S _q	S _p	S _q	S _p	S _q																
C1	5	5	3	3	4	4	1	1	0	0	1	1	4	0	0	2	2	1	1	6	0,40	0,063
C2	4	4	3	3	5	5	0	0	0	0	2	2	4	1	1	2	2	0	0	6	0,40	0,063
C3	5	5	5	5	5	5	1	1	2	2	2	2	10	0	0	0	0	0	0	0	1,00	0,156
C4	5	5	5	5	5	5	1	1	2	2	2	2	10	0	0	0	0	0	0	0	1,00	0,156
C5	4	4	5	5	3	3	0	0	2	2	0	0	4	1	1	0	0	2	2	6	0,40	0,063
C6A	5	5	4	4	4	4	1	1	1	1	1	1	6	0	0	1	1	1	1	4	0,60	0,094
C6B	5	5	4	4	4	4	1	1	1	1	1	1	6	0	0	1	1	1	1	4	0,60	0,094
C6C	5	5	4	4	4	4	1	1	1	1	1	1	6	0	0	1	1	1	1	4	0,60	0,094
C7	4	4	3	3	5	5	0	0	0	0	2	2	4	1	1	2	2	0	0	6	0,40	0,063
C8	5	5	5	5	5	5	1	1	2	2	2	2	10	0	0	0	0	0	0	0	1,00	0,156

Fonte: Elaborado pelos autores

Para o cálculo da avaliação das alternativas pelo HFL-TOPSIS, realizou-se os passos descritos na etapa anterior, porém com a utilização dos pesos normalizados (w_j) para ponderar as alternativas no cálculo das distâncias, conforme as Equações 24 e 25. Os julgamentos convertidos e agregados relativos ao método HFL-TOPSIS são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4- Julgamentos das alternativas agregados pelo método HFL-TOPSIS

Alternativas	Critérios																				
	C1		C2		C3		C4		C5		C6A		C6B		C6C		C7		C8		
	S _p	S _q																			
A1	3	5	3	5	5	5	4	5	3	5	4	4	4	4	4	5	3	5	4	5	
A2	3	4	3	5	4	5	5	5	3	5	4	5	4	5	4	5	3	5	5	5	
A3	3	4	3	5	4	5	5	5	3	5	4	4	4	4	4	5	3	5	5	5	
A4	3	5	3	5	5	5	5	5	5	5	4	5	4	4	4	5	3	5	5	5	
A5	3	4	3	5	4	5	4	5	5	5	3	4	3	4	4	5	3	5	4	5	
A6	3	5	3	5	5	5	4	5	3	5	4	4	4	4	4	5	3	5	5	5	
A7	3	5	3	5	4	5	5	5	5	5	3	4	4	4	4	5	3	5	5	5	
A8	3	4	3	5	5	5	5	5	5	5	4	5	4	5	4	5	3	5	5	5	
A9	3	5	3	5	4	5	4	5	4	5	4	4	4	4	5	3	5	3	5	4	5
A10	3	5	3	5	4	5	4	5	3	5	4	4	4	4	4	5	3	5	5	5	

Fonte: Elaborado pelos autores

A Tabela 5 mostra as soluções ideais obtidas para as alternativas por este método.

Tabela 5 – Soluções ideais para as alternativas pelo método HFL-TOPSIS

	C1		C2		C3		C4		C5		C6A		C6B		C6C		C7		C8	
	Vp1	Vq1	Vp2	Vq2	Vp3	Vq3	Vp4	Vq4	Vp5	Vq5	Vp6A	Vq6A	Vp6B	Vq6B	Vp6C	Vq6C	Vp7	Vq7	Vp8	Vq8
A+	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
A-	3	3	3	3	4	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	4

Fonte: Elaborado pelos autores

Por fim, calculou-se os coeficientes de proximidade pelos métodos *Fuzzy*-TOPSIS e HFL-TOPSIS (Equações 15 e 23, respectivamente) e realizou-se a classificação das alternativas. Os resultados finais são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Ranqueamento obtido pelos métodos *Fuzzy*-TOPSIS e HFL-TOPSIS

Posição	<i>Fuzzy</i> -TOPSIS		HFL-TOPSIS	
	CC _i	Alternativa	RC(A _j)	Alternativa
1º	0,6571	A4	0,7444	A8
2º	0,6558	A8	0,7333	A4
3º	0,6428	A2	0,6596	A2
4º	0,6383	A7	0,6170	A6

5º	0,6316	A9	0,6111	A7
6º	0,6314	A6	0,5957	A3
7º	0,6299	A1	0,5638	A1 e A10
8º	0,6296	A3	0,5638	A1 e A10
9º	0,6285	A10	0,5217	A9
10º	0,6051	A5	0,4444	A5

Fonte: Elaborado pelos autores

Ao se analisar as classificações das alternativas em cada método, considera-se que os resultados são decorrentes da qualidade dos módulos solares fotovoltaicos e, também, das diferentes visões dos decisores quanto às alternativas avaliadas. Nos dois ranqueamentos, tanto a alternativa A4 como a A8 são suscetíveis de serem indicadas como as melhores opções. A2 obteve a terceira posição nos dois métodos, assim como A1, que foi posicionada na sétima posição. Já a alternativa A5 mostrou-se a pior em ambos. Além dessas similaridades, há casos em que ocorreram diferenças de duas posições no ranqueamento, como é o caso de A3 e A6. A maior diferença ocorreu em relação à alternativa A9, que variou quatro posições.

Portanto, dentre as 10 alternativas, três receberam a mesma classificação, quatro variaram uma posição em relação ao outro método, duas alternativas diferiram duas posições e uma variou quatro posições. Apesar dessas divergências, é possível perceber que, em geral, os resultados se mostraram consistentes entre si. As diferenças na classificação podem ser atribuídas à forma distinta de quantificar os julgamentos dos decisores em cada método (seja por meio de números *fuzzy* triangulares, ou de HFLTS), além dos procedimentos de cálculo que também são distintos entre si.

Em relação aos resultados dos pesos dos critérios nota-se que C3, C4 e C8 receberam o maior peso, enquanto C1, C2 e C5 o menor, em ambos os métodos. No método HFL-TOPSIS o C7 também está incluso no grupo dos menores. Assim, o método *Fuzzy*-TOPSIS discriminou melhor os critérios, pois observa-se 4 classes de resultados, enquanto no HFL-TOPSIS apenas 3. Essa constatação pode ser decorrente do método HFL-TOPSIS não ter sido explorado em todo o seu potencial de avaliação hesitante neste estudo.

É importante ressaltar que os módulos importados são os mais adotados no Brasil e essa tecnologia está consolidada internacionalmente há muitas décadas, o que torna o mercado muito competitivo, oferecendo produtos próximos em relação à qualidade. A opinião dos decisores, neste estudo, mostrou um grau de discordância relativamente baixo, demonstrando principalmente a preocupação com critérios similares e, indiretamente, refletindo essa dificuldade de comparar módulos que possuem características parecidas. Esse ponto corrobora a importância da utilização de métodos multicritério para classificação e apoio à decisão, pois permite o ranqueamento com base no desempenho global, além de agregar as diferentes opiniões dos decisores.

Ao analisar as características dos métodos comparados, nota-se que, como ambos os métodos são variações do TOPSIS, adotam o cálculo da distância das alternativas às soluções ideais positivas e negativas, objetivando lidar com incertezas decorrentes tanto da avaliação como de imprecisões nos dados. Nesse contexto, o HFL-TOPSIS se mostra uma versão aprimorada por permitir uma abordagem que representa de forma mais flexível os julgamentos dos decisores. Ao possibilitar aos decisores o uso de expressões linguísticas ou de mais de um termo linguístico simultâneo, o HFL-TOPSIS proporciona resultados mais robustos em cenários de maior incerteza e hesitação. Reitera-se que neste estudo se propôs uma coleta de dados unificada, justamente com o objetivo de mitigar a característica hesitante do método HFL-TOPSIS e tornar possível a comparação entre os métodos. Dessa forma, os decisores avaliaram as alternativas apenas com termos linguísticos, e não com expressões linguísticas.

Na Tabela 6, é possível notar que o método HFL-TOPSIS proporcionou intervalos numéricos entre as alternativas superiores ao *Fuzzy*-TOPSIS, indicando que esse método possui maior amplitude, sendo mais recomendado quanto maior for o número de alternativas, pois permitirá diferenciá-las de forma mais clara. Em contrapartida, o método *Fuzzy*-TOPSIS não apresentou nenhuma sobreposição na classificação das alternativas, o que pode ser considerado um diferencial dependendo da análise a ser realizada.

Sobre a avaliação dos pesos dos critérios, enquanto o *Fuzzy*-TOPSIS utiliza média aritmética *fuzzy* para estimar os pesos a partir da opinião de vários decisores, o HFL-TOPSIS proposto por Beg e Rashid (2013) não permite atribuir pesos distintos aos critérios. Entretanto, ao se adotar o método HFL-TOPSIS e requerer a participação dos decisores também na definição dos pesos, recomenda-se a utilização da versão adaptada proposta por Magalhães (2020) utilizada neste estudo. Essa versão possui um algoritmo com mais etapas para o cálculo dos pesos do que o *Fuzzy*-TOPSIS. Contudo, possui a vantagem de lidar com a hesitação na escolha dos termos linguísticos durante a definição dos pesos.

5. CONCLUSÕES E CONTRIBUIÇÃO TECNOLÓGICA-SOCIAL

Este trabalho apresentou uma comparação entre os métodos de decisão multicritério *Fuzzy*-TOPSIS e HFL-TOPSIS no contexto da seleção de módulos solares fotovoltaicos. A aplicação de ambos os métodos se mostrou adequada, pois possibilita tanto a avaliação de critérios objetivos como subjetivos e que, por ser realizada com o uso de escalas linguísticas, reflete a opinião dos decisores de maneira próxima à linguagem natural. Destacam-se, assim, a versatilidade e robustez desses métodos no apoio à tomada de decisão, capazes de agregarem a opinião individual de múltiplos decisores no julgamento de critérios e alternativas em contextos de decisão complexos. Salienta-se que o objetivo deste trabalho não é escolher entre um método ou outro, pois não há método melhor ou pior, o que existem são métodos que se adequam melhor a um determinado problema do que outros. Em função disso, é importante conhecer bem as características dos métodos multicritério antes de se realizar uma determinada escolha.

As principais contribuições tecnológicas-sociais se apresentam pela proposta de solução para classificação de módulos solares fotovoltaicos e, também, pela comparação entre os métodos *Fuzzy*-TOPSIS e HFL-TOPSIS. Com base na pesquisa bibliográfica realizada, pode-se afirmar que este é o primeiro estudo a comparar a aplicação desses dois métodos. Os resultados dessa comparação podem auxiliar profissionais envolvidos em processos decisórios baseados em múltiplos critérios, especialmente durante a escolha das técnicas de suporte. O estudo também sugere o uso de alguns dos critérios considerados de maior importância ao se avaliar módulos solares fotovoltaicos, além de oferecer uma análise entre os fabricantes e modelos mais representativos atualmente no mercado.

Outra contribuição tecnológica é relacionada ao compartilhamento dos modelos implementados no MS Excel®, que serão disponibilizados na base *Mendeley Data*, podendo ser adaptados e aproveitados por demais pesquisadores e gestores que enfrentem cenários de decisão complexa. Nesse sentido, espera-se contribuir para a disseminação de técnicas de decisão *fuzzy* em empresas brasileiras, fortalecendo assim a interface tecnologia-sociedade.

Para estudos futuros, recomenda-se a utilização e comparação de outros métodos de decisão multicritério para avaliação de módulos solares fotovoltaicos, além da inclusão de novos critérios. Destaca-se que os procedimentos adotados neste estudo podem ser replicados a situações de decisão que contemplem múltiplas alternativas e critérios em praticamente todas as áreas, pois são adaptáveis a diversos contextos devido à capacidade de consolidar julgamentos linguísticos em resultados numéricos.

REFERÊNCIAS

ABDEL-BASSET, M.; GAMAL, A.; HEZAM, I. M.; SALLAM, K. M. **An Effective Analysis of Risk Assessment and Mitigation Strategies of Photovoltaic Power Plants Based on Real Data: Strategies, Challenges, Perspectives, and Sustainability.** *International Journal of Energy Research*, 2023.

ABSOLAR, Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica. **Energia Solar Fotovoltaica no Brasil Infográfico ABSOLAR**, Atualizado em 13/05/2024. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>>. Acesso em: 30 de maio de 2024.

AZEVEDO JUNIOR, C. M. de; PEREIRA JUNIOR, E. L.; ARAUJO, T. M. P. de C., SANTOS, M. dos; GOMES, C. F. S.; PEREIRA, D. A. de M., **Ordering of Solar Photovoltaic Panels using the MEREC-SPOTIS Hybrid Analytical Model**, *Procedia Computer Science*, Volume 230, Pages 808-818, 2023.

BĄCZKIEWICZ, A.; KIZIELEWICZ, B.; SHEKHOVTSOV, A.; YELMIKHEIEV, M.; KOZLOV, V.; SAŁABUN, W. **Comparative Analysis of Solar Panels with Determination of Local Significance Levels of Criteria Using the MCDM Methods Resistant to the Rank Reversal Phenomenon.** *Energies*, 14, 5727, 2021.

BALO, F.; ŞAĞBANŞUA L. **The Selection of the Best Solar Panel for the Photovoltaic System Design by Using AHP**, *Energy Procedia*, Volume 100, Pages 50-53, 2016.

BANKS, J. **Handbook of Simulation: principles, methodology, advances, applications, and practice.** Atlanta, Georgia: Emp Books, 1998.

BEG, I.; RASHID, T. **TOPSIS for hesitant fuzzy linguistic term sets.** *International Journal of Intelligent Systems*, v.28, p.1162-1171, 2013.

BERTRAND, J.; FRANSOO, J.C. **Operations management research methodologies using quantitative modeling.** *International Journal of Operations & Production Management*, v.22, p.241-264, 2002.

BORGES, W. V.; LIMA JUNIOR, F. R.; PEINADO, J.; CARPINETTI, L. C. R. **Proposta de um modelo hesitantfuzzylinguistic TOPSIS para segmentação de fornecedores.** *Revista de Administração Contemporânea*, 26(6), e210133, 2022.

BOUZID, M.; ELLEUCH, M. A.; FRIKHA, A. **Multi-criteria and multi-decision maker ranking of photovoltaic panels in Tunisia.** *International Conference on Decision Aid Sciences and Application (DASA)*, IEEE, 932-937, 2021.

CHEN, C. **Extensionsof the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment.** *Fuzzy sets and systems*, v. 114, n. 1, p. 1-9, 2000.

EL-BAYEH, C. Z.; ALZAAREER K.; BRAHMI, B.; ZELLAGUI M.; EICKER U. **An original multi-criteria decision-making algorithm for solar panels selection in buildings,** *Energy*, Volume 217, 119396, 2021.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. **Relatório Final do PNE 2050**, 2020. Rio de Janeiro. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/sntep/publicacoes/plano-nacional-de-energia/>>. Acesso em: 05 jul. 2024.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2024: Ano base 2023.** Rio de Janeiro: EPE, 2024. Disponível em: <<https://dashboard.epe.gov.br/apps/anuario-livro/>>. Acesso em: 05 jul. 2024.

GNANASEKARAN, S.; VENKATACHALAM, N. **A review on applications of multi-criteria decision making (MCDM) for solar panel selection.** *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, 9(2), 11–20, 2019.

HAJIMOLAALI, M.; KEBRIAEEZADEH, A.; ABDOLLAHIASL, A.; SAFARI, H.; YEKTADOOST, A. **A new approach in identifying and evaluating quality risks in the pharmaceutical industry.** *Journal of Pharmaco economics and Pharmaceutical Management*, v.3, p.17-20, 2017.

KOCABALDIR, C.; YÜCEL, M. A. **GIS-based multicriteria decision analysis for spatial planning of solar photovoltaic power plants in Çanakkale province, Turkey,** *Renewable Energy*, Elsevier, Volume 212, Pages 455-467, 2023.

KUMAR, N.; MAHANTA, J. **A matrix norm-based Pythagorean fuzzy metric and its application in MEREC-SWARA-VIKOR framework for solar panel selection,** *Applied Soft Computing*, Volume 158, 111592, 2024.

KUMAR, S.; BARMAN, A.G. **Fuzzy TOPSIS and fuzzy VIKOR in selecting green suppliers for sponge iron and steel manufacturing.** *Soft Computing*, v. 25, p. 6505-6525, 2021.

- LIMA JUNIOR, F. R.; CARPINETTI, L. **Uma comparação entre os métodos TOPSIS e Fuzzy-TOPSIS no apoio à tomada de decisão multicritério para seleção de fornecedores.** *Gestão&Produção*. 22. 17-34, 2015.
- LONG, S.; GENG, S. **Decision framework of photovoltaic module selection under interval-valued intuitionistic fuzzy environment,** *Energy Conversion and Management*, Volume 106, Pages 1242-1250, 2015.
- MAGALHÃES, W. R. de; LIMA JUNIOR, F. R. **A model based on FMEA and Fuzzy TOPSIS for risk prioritization in industrial processes.** *Gestão & Produção* 28: e5535, 2021.
- MAGALHÃES, W. R. de. **Proposição e aplicação de um modelo para priorização de risco baseado em FMEA e Hesitant Fuzzy-TOPSIS** (Dissertação). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, PR, Brasil, 2020.
- OLIVEIRA, M. E. B. de; LIMA JUNIOR, F. R.; GALO, N. R. **A comparison of hesitant fuzzy VIKOR methods for supplier selection,** *Applied Soft Computing*, Volume 149, Part A, 110920, 2023.
- ONAR, S.C.; OZTAYSI, B.; KAHRAMAN, C. **Strategic decision selection using hesitant fuzzy TOPSIS and interval type-2 fuzzy AHP: a case study.** *International Journal of Computational Intelligence Systems*, v.7, p.1002-1021, 2014.
- PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. L.; RÜTHER, R.; ABREU, S. L.; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G. **Atlas Brasileiro de Energia Solar.** 2.ed. São José dos Campos: INPE, 80p., 2017.
- PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos.** Rio de Janeiro: CEPTEL - CRESESEB, 2014.
- PONTE, G. P. da; CALILI, R. F.; SOUZA, R. C. **Energy generation in Brazilian isolated systems: Challenges and proposals for increasing the share of renewables based on a multicriteria analysis,** *Energy for Sustainable Development*, Volume 61, Pages 74-88, 2021.
- RANI, P.; MISHRA, A. R.; MARDANI, A.; CAVALLARO, F.; ŠTREIMIKIENĖ, D.; KHAN, S. A. R. **Pythagorean Fuzzy SWARA–VIKOR Framework for Performance Evaluation of Solar Panel Selection.** *Sustainability*, 12, 4278, 2020.
- RODRÍGUEZ, R.M.; MARTINEZ, L.; HERRERA, F. **Hesitant fuzzy linguistic term sets for decision making.** *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, v.20, p.109-119, 2012.
- SARAJI, M. K.; STREIMIKIENE, D.; SURESH, V. **A novel two-stage multicriteria decision-making approach for selecting solar farm sites: A case study,** *Journal of Cleaner Production*, Volume 444, 2024.
- SASIKUMAR, G.; AYYAPPAN, S. (2019). **Multi-criteria Decision Making for Solar Panel Selection Using Fuzzy Analytical Hierarchy Process and Technique for Order Preference by Similarity to ideal Solution (TOPSIS): An Empirical Study.** *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*. 2019.
- SEKER, S.; KAHRAMAN, C., **Socio-economic evaluation model for sustainable solar PV panels using a novel integrated MCDM methodology: A case in Turkey,** *Socio-Economic Planning Sciences*, Volume 77, 2021, ISSN 0038-0121, 2021.
- TAYLAN, O.; ALAMOUDI, R.; KABLI, M.; ALJIFRI, A.; RAMZI, F.; HERRERA-VIDEIRA, E. **Assessment of Energy Systems Using Extended Fuzzy AHP, Fuzzy VIKOR, and TOPSIS Approaches to Manage Non-Cooperative Opinions.** *Sustainability*, 12, 2745, 2020.
- TOLMASQUIM, M. T. **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica.** Rio de Janeiro: Editora EPE, 1ª edição, 2016.
- VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações.** São Paulo: Érica, 224p., ISBN 9788536504162, 2012.
- WEISS, W.; SPÖRK-DÜR, M. **Solar Heat Worldwide: Global Market Development and Trends 2022 Detailed Market Figures 2021.** Edição 2023. Austria: AEE - Institute for Sustainable Technologies, IEA Solar Heating & Cooling Programme, 2023.
- ZADEH, L. A. **Fuzzy sets.** *Information and Control*, v. 8, n. 3, p. 338-353, 1965.
- ZADEH, L. A. **Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes.** *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, v. 3, n. 1, p. 28-44, 1973.
- ZIEMBA, P.; SZAJA, M. **Fuzzy Decision-Making Model for Solar Photovoltaic Panel Evaluation.** *Energies*, 16, 5161, 2023.