

Trilha 2 - Métodos, Processos, Técnicas, Práticas e Ferramentas

**AVALIAÇÃO MULTICRITÉRIO DE DESEMPENHO OPERACIONAL
DE USINAS SOLARES DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NO BRASIL:
APLICAÇÃO DA ENTROPIA DE SHANNON E TOPSIS**

*MULTICRITERIA OPERATIONAL PERFORMANCE ASSESSMENT OF
DISTRIBUTED SOLAR PV PLANTS IN BRAZIL: APPLICATION OF
SHANNON ENTROPY AND TOPSIS*

Hudson de Souza e Silva

MSc. Universidade Federal do ABC (UFABC) – Brasil.
hudson.souza@ufabc.edu.br

Marcus Fabius Henriques de Carvalho

PhD. Pontifícia Universidade Católica de Campinas (PUC-Campinas) – Brasil.
marcius@puc-campinas.edu.br

Sérgio Ricardo Lourenço

PhD. Universidade Federal do ABC (UFABC) – Brasil.
sergio.lourenco@ufabc.edu.br

RESUMO

A geração distribuída solar fotovoltaica ocupa posição central na transição energética brasileira, superando 26 GW de capacidade instalada em 2023. Nesse contexto, a avaliação sistemática do desempenho torna-se relevante para aprimorar a gestão dos ativos e apoiar a consolidação do setor. Este estudo combina Entropia de Shannon e TOPSIS para avaliar 20 usinas solares de geração distribuída no Brasil. A análise utiliza dados operacionais primários de 2023 e nove critérios nas dimensões técnica, energética e financeira. A Entropia de Shannon determina os pesos conforme a variabilidade dos dados, enquanto o TOPSIS classifica as usinas com base na proximidade relativa à solução ideal. Os resultados apresentam índices C_i entre 0,27 e 0,71, posicionando UFV05/BA e UFV12/MG nos extremos do ranking da amostra. O custo de arrendamento recebeu o maior peso, 31,41%, destacando a influência dos fatores contratuais e financeiros no modelo. A produção real média atingiu aproximadamente 96% da referência de projeto, evidenciando diferenças entre o desempenho realizado e o previsto. A abordagem oferece uma base transparente e replicável para comparar ativos, identificar direcionadores de desempenho e apoiar decisões técnicas e gerenciais. Fundamentada na literatura sobre conhecimento tácito e aprendizagem interorganizacional, a estrutura metodológica é discutida, sob a perspectiva da Gestão do Conhecimento, como instrumento potencial para organizar e compartilhar experiências operacionais. Estudos futuros deverão validar empiricamente sua efetividade em portfólios mais amplos e diversificados.

PALAVRAS-CHAVE: Geração Distribuída Solar, Entropia de Shannon, TOPSIS, Gestão do Conhecimento.

ABSTRACT

Solar photovoltaic distributed generation plays a central role in Brazil's energy transition, exceeding 26 GW of installed capacity in 2023. In this context, systematic performance assessment is relevant to improving asset management and supporting sector development. This study combines Shannon Entropy and the Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) to evaluate 20 distributed-generation solar plants in Brazil. The analysis uses primary operational data from 2023 and nine criteria covering technical, energy, and financial dimensions. Shannon Entropy determines weights from data variability, while TOPSIS ranks the plants according to their relative closeness to the ideal solution. The resulting C_i indices range from 0.27 to 0.71, placing UFV05/BA and UFV12/MG at the extremes of the sample ranking. Land lease cost received the highest weight, 31.41%, highlighting the influence of contractual and financial factors within the model. Average actual production reached approximately 96% of the project reference, indicating differences between realized and projected performance. The approach provides a transparent and replicable basis for comparing assets, identifying performance drivers, and supporting technical and managerial decisions. Grounded in the literature on tacit knowledge and interorganizational learning, the methodological structure is discussed from a Knowledge Management perspective as a potential instrument for organizing and sharing operational experience. Future studies should empirically validate its effectiveness in larger and more diverse portfolios.

KEYWORDS: *Distributed Solar Generation, Shannon Entropy, TOPSIS, Knowledge Management.*

1. INTRODUÇÃO

A energia solar fotovoltaica consolidou-se como protagonista da transição energética global. Em 2024, foram adicionados 451,9 GW de capacidade solar ao redor do mundo, respondendo por mais de três quartos de toda a expansão renovável do ano, o que representa o maior volume já registrado por uma única fonte em um único ano (IRENA, 2025). A capacidade solar global acumulada atingiu 2.383 GW em 2025, mais que dobrando em apenas três anos (IRENA, 2026). Essa trajetória reflete reduções contínuas de custo, amadurecimento regulatório e crescente conscientização ambiental, fatores que elevaram a fonte solar ao centro das estratégias energéticas internacionais (IEA, 2024).

O Brasil acompanhou esse movimento com intensidade particular. A capacidade de geração distribuída solar cresceu de menos de 1 GW em 2018 para 40 GW em 2025, respondendo por 43% de todas as adições de capacidade elétrica do país nesse período, consolidando-se como o segmento de maior crescimento da matriz elétrica brasileira (EIA, 2025). Em 2024, o país adicionou 14,3 GW, posicionando-se, junto com Índia e Paquistão, com volume equivalente ao de toda a União Europeia no mesmo ano (IEA-PVPS, 2025). O marco regulatório da Lei n.º 14.300/2022, que preservou a compensação de energia para sistemas instalados antes de janeiro de 2023, consolidou a geração distribuída como espinha dorsal econômica do setor solar nacional (ABSOLAR, 2025).

Essa expansão acelerada, contudo, levanta uma questão ainda pouco examinada sistematicamente pela literatura nacional: em que medida a capacidade instalada registrada corresponde à produção efetivamente observada nos ativos em operação? Na amostra analisada, a produção real média correspondeu a aproximadamente 96% da referência anual de projeto. Esse resultado evidencia a necessidade de métodos padronizados para comparar produção prevista e realizada, mas não permite, isoladamente, estimar uma parcela equivalente de potência instalada improdutiva no parque nacional. A literatura internacional ainda privilegia estudos de viabilidade técnico-econômica na fase de projeto, com menor ênfase na mensuração padronizada do desempenho em campo (CHEN; CHIU; HUANG; LIN, 2021).

Diante desse cenário, esta pesquisa procura responder a duas questões interdependentes. A primeira é como avaliar, de forma objetiva e comparável, o desempenho de usinas solares GD heterogêneas, considerando critérios técnicos, energéticos e financeiros. A segunda é como organizar essa avaliação como conhecimento setorial estruturado e compartilhável. Sem um método padronizado, não há base consistente para a comparação de desempenho; sem essa

comparação, o conhecimento operacional de cada usina tende a permanecer restrito à organização que o produziu.

A relevância prática da diferença entre produção prevista e realizada também decorre de seus possíveis efeitos financeiros. Estratégias otimizadas de operação e manutenção (O&M) podem recuperar, em média, 5,27% de energia para uma usina típica, equivalente a US\$ 10.000 por MW anualmente. Sem abordagens estruturadas de O&M, a indústria fotovoltaica global poderia enfrentar perdas da ordem de US\$ 14,5 bilhões anuais (LINDIG; GALLMETZER; HERZ; LOUWEN; KOUMPLI; SEBASTIAN ENRIQUEZ PAEZ; MOSER, 2023). No contexto brasileiro, em que os contratos de arrendamento representam custo fixo relevante e a receita depende da geração efetiva, a comparação padronizada de desempenho pode apoiar a identificação de riscos e oportunidades de melhoria.

O conhecimento produzido na operação cotidiana das usinas inclui padrões de desempenho, causas de indisponibilidade, estruturas de custo e práticas de operação e manutenção. Parte desse conhecimento permanece restrita às equipes e às organizações que o produzem, situação compatível com o conceito de conhecimento tácito não externalizado (POLANYI, 1966; NONAKA; TAKEUCHI, 1995). Uma linguagem comum de indicadores pode reduzir a fragmentação das informações e facilitar a comparação de diagnósticos e práticas. A estrutura metodológica proposta contribui para essa finalidade ao organizar dados operacionais em resultados comparáveis, embora a aprendizagem coletiva decorrente de sua adoção ainda dependa de validação empírica.

A partir desse diagnóstico, este artigo tem como objetivo desenvolver e aplicar uma estrutura multicritério para avaliar o desempenho de 20 usinas solares de geração distribuída no Brasil, identificadas como UFV01 a UFV20, com dados consolidados de 2023. O método combina a Entropia de Shannon, para determinar pesos a partir da variabilidade dos dados, e o TOPSIS, para ranquear as alternativas por proximidade relativa à solução ideal. O trabalho utiliza dados empíricos primários e se articula com publicação anterior que avaliou as mesmas usinas por Análise Envoltória de Dados (DEA) (SILVA; CARVALHO; LOURENÇO, 2025). O estudo busca, assim, oferecer um instrumento replicável de comparação e mapeamento do conhecimento operacional, sem atribuir ao ranking interpretação de eficiência técnica independente do porte dos ativos.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Gestão do Conhecimento: conhecimento tácito, externalização e aprendizagem interorganizacional

A Gestão do Conhecimento (GC) trata do conjunto de processos organizacionais voltados à criação, captura, compartilhamento e aplicação do conhecimento como ativo estratégico, distinto do dado bruto e da informação processada (DAVENPORT; PRUSAK, 1998). Em setores intensivos em conhecimento, a vantagem competitiva depende cada vez menos da posse isolada de recursos físicos e cada vez mais da capacidade de transformar experiência operacional dispersa em conhecimento estruturado, comparável e reutilizável por diferentes agentes da organização e do setor.

Um dos pilares teóricos da GC é a distinção entre conhecimento tácito e conhecimento explícito, proposta originalmente por Polanyi (1966): o conhecimento tácito é pessoal, incorporado à experiência e de difícil formalização, enquanto o conhecimento explícito pode ser codificado, registrado e transmitido de forma sistemática. Nonaka e Takeuchi (1995), no modelo SECI, descrevem a externalização como o processo pelo qual o conhecimento tácito é convertido em conceitos explícitos, por meio de métricas, modelos e representações que tornam comunicável aquilo que antes existia apenas na prática individual. No setor de geração distribuída solar, o conhecimento sobre causas de indisponibilidade, padrões de degradação e boas práticas de operação e manutenção é predominantemente tácito: reside na experiência das equipes técnicas de cada organização operadora e raramente é registrado em métricas comparáveis entre ativos ou entre empresas.

A aprendizagem interorganizacional refere-se ao processo pelo qual organizações distintas adquirem conhecimento a partir da observação, comparação e interação com seus pares (ARGOTE; INGRAM, 2000). Easterby-Smith, Lyles e Tsang (2008) destacam que esse processo depende da existência de mecanismos que tornem o desempenho de uma organização comparável ao de outras, reduzindo a assimetria de informação e permitindo que boas práticas identificadas em um contexto sejam adaptadas e absorvidas em outro. Sem esses mecanismos, cada organização tende a repetir diagnósticos já solucionados por seus pares, e o conhecimento setorial permanece fragmentado.

O *benchmarking*, entendido como a comparação sistemática de desempenho entre unidades ou organizações a partir de indicadores padronizados, constitui um dos mecanismos mais consolidados de GC para viabilizar a aprendizagem interorganizacional (CAMP, 1989): ao tornar o desempenho de diferentes ativos comparável segundo os mesmos critérios, o

SBGC – Sociedade Brasileira de Gestão do Conhecimento – sbgc.org.br
KM Brasil 2026 - 21º Congresso Brasileiro de Gestão do Conhecimento – kmbrasil.org

benchmarking funciona como instrumento de mapeamento de conhecimentos essenciais e críticos de um setor, explicitando onde o desempenho diverge e sinalizando oportunidades de melhoria. É essa função de mapeamento e comparação estruturada que fundamenta, neste estudo, a leitura do problema da avaliação de desempenho de usinas GD solares como um problema também de Gestão do Conhecimento, e não apenas de engenharia ou de finanças, conforme retomado nas considerações finais.

2.2 O setor solar fotovoltaico no mundo e no Brasil

A expansão da energia solar fotovoltaica nas últimas décadas constitui um dos fenômenos mais expressivos da história energética global. Levou mais de 40 anos para que a capacidade solar mundial atingisse 1,18 TW, em 2022, e apenas dois anos adicionais para dobrá-la, chegando a 2,25 TW ao final de 2024 (IEA-PVPS, 2025). Em 2024, a capacidade global de renováveis cresceu 15,1%, o maior crescimento anual já registrado, com a solar fotovoltaica respondendo por 451,9 GW das adições, seguida pela eólica com 113 GW. Juntas, as duas fontes representaram 96,6% de toda a expansão renovável do ano (IRENA, 2025). As projeções da IEA (2024) indicam que adições anuais de renováveis devem crescer dos 666 GW registrados em 2024 para quase 935 GW em 2030, com solar e eólica respondendo por 95% desse total.

No Brasil, a trajetória é igualmente robusta. Até junho de 2025, a capacidade solar total instalada no país correspondia a 23% da capacidade elétrica nacional, com a modalidade distribuída alcançando 40 GW, crescimento de menos de 1 GW em 2018 para esse patamar em apenas sete anos (EIA, 2025). Em 2023, o setor solar expandiu 68,1% em geração e 54,8% em capacidade instalada, consolidando o Brasil como referência regional (EPE, 2025; ABSOLAR, 2025). A Lei n.º 14.300/2022 estabeleceu o marco regulatório da micro e minigeração distribuída, preservando a compensação de energia na proporção de um para um para sistemas instalados até janeiro de 2023, o que gerou forte antecipação de instalações e consolidou o segmento como base econômica do setor (ABSOLAR, 2025).

2.3 Capacidade instalada versus capacidade produtiva: uma lacuna crítica

A rápida acumulação de capacidade instalada não equivale necessariamente à correspondente capacidade produtiva. O desempenho real de um sistema fotovoltaico é determinado por múltiplos fatores operacionais que podem afastá-lo significativamente das projeções de projeto: degradação dos módulos, perdas por indisponibilidade interna e externa, desvios de irradiação em relação à série histórica utilizada no modelo financeiro e eficiência

dos inversores (IEA-PVPS, 2025; REDISKE; MICHELS; SILUK; RIGO; ROSA; LIMA, 2024). O Performance Ratio e o Fator de Capacidade são indicadores amplamente utilizados para mensurar essa diferença entre o potencial instalado e a energia efetivamente gerada, conforme as diretrizes de monitoramento da norma 61724-1 (IEC, 2021).

Na amostra analisada, a produção anual real das 20 usinas variou de 87,74% a 106,46% da referência prevista em projeto, com média de aproximadamente 96%. Esse resultado descreve uma diferença energética no período analisado e não equivale diretamente a uma parcela de potência instalada improdutiva. A comparação entre produção prevista e realizada pode ser afetada por premissas de irradiação, probabilidades P50 e P90, perdas técnicas, indisponibilidades e práticas de O&M. Em razão da ausência de representatividade estatística da amostra, o percentual observado não foi extrapolado para o parque nacional (LINDIG; GALLMETZER; HERZ; LOUWEN; KOUMPLI; SEBASTIAN ENRIQUEZ PAEZ; MOSER, 2023; NREL, 2024).

2.4 Métodos multicritério de apoio à decisão: Entropia de Shannon e TOPSIS

Os Métodos de Decisão Multicritério (MCDM) constituem um campo consolidado de pesquisa operacional voltado à avaliação e ranqueamento de alternativas quando múltiplos critérios conflitantes estão presentes. A análise isolada de indicadores individuais é insuficiente para representar a complexidade do desempenho de ativos energéticos: uma usina pode apresentar alta disponibilidade com baixo fator de capacidade; outra pode ter receita elevada com custo de arrendamento desproporcionalmente alto. Os métodos multicritério integram essas dimensões em uma métrica única e comparável (HWANG; YOON, 1981).

A Entropia de Shannon foi originalmente proposta por Shannon (1948) como medida matemática da incerteza ou da distribuição da informação em um conjunto de dados. Em aplicações multicritério, o método é utilizado para atribuir pesos conforme a capacidade discriminante de cada critério: maior variabilidade produz maior divergência e, consequentemente, maior peso. Esse peso expressa informação estatística na amostra, e não necessariamente importância técnica ou gerencial. Critérios homogêneos recebem pesos reduzidos porque contribuem menos para distinguir as alternativas (HWANG; YOON, 1981; HAFEZALKOTOB; HAFEZALKOTOB, 2016; QUINTANILLA; HENNEAUX; ROBIDOUX, 2023).

O TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*), desenvolvido por Hwang e Yoon (1981), baseia-se no princípio de que a melhor alternativa é aquela que apresenta simultaneamente a menor distância euclidiana da solução ideal positiva,

formada pelos melhores valores observados em cada critério, e a maior distância da solução ideal negativa, formada pelos piores valores. O índice de proximidade relativa C_i , que varia de 0 a 1, sintetiza esse posicionamento: valores próximos de 1 indicam desempenho global superior. A integração Entropia-TOPSIS é amplamente referenciada na literatura recente de avaliação de sistemas energéticos (YIN; ZHANG; WANG; LI, 2025; QUINTANILLA; HENNEAUX; ROBIDOUX, 2023; LE ROUX; LE GRANGE; BELLO-OCHEDE, 2023), por combinar objetividade na ponderação com robustez matemática no ranqueamento.

2.5 Aplicações de MCDM em sistemas fotovoltaicos

A aplicação de métodos MCDM a sistemas fotovoltaicos tem crescido significativamente na literatura internacional. Chen, Chiu, Huang e Lin (2021) aplicaram DEA para avaliação de usinas fotovoltaicas em Taiwan, identificando *benchmarks* e potencial de otimização. Ghaffarian e Ebrahimi (2021) utilizaram DEA com saídas indesejáveis para análise de eficiência com componente ambiental. Recentemente, estudos passaram a combinar métodos objetivos e subjetivos: Al-Abadi, Handhal, Abdulhasan, Ali, Hassan e Al Aboodi (2024) aplicaram a combinação Entropia-TOPSIS com AHP-TOPSIS para seleção de localização de usinas solares no Iraque; Yin, Zhang, Wang e Li (2025) utilizaram Entropia-TOPSIS para avaliação ecológica de usinas FV em Xinjiang; e estudos de seleção de painéis FV para sistemas flutuantes aplicaram Entropia, CRITIC e TOPSIS em combinação (LEAL; SOUZA FILHO; ZANON; SIGAHI; RAMPASSO; ANHOLON, 2024). No contexto brasileiro, estudo prévio dos mesmos autores aplicou DEA-CCR e DEA-BCC a 20 usinas GD solares, identificando heterogeneidade relevante de eficiência e estabelecendo a base empírica sobre a qual o presente estudo avança (SILVA; CARVALHO; LOURENÇO, 2025).

3. METODOLOGIA

3.1 Caracterização da amostra

A amostra compreende 20 usinas solares de geração distribuída em operação no Brasil, identificadas como UFV01 a UFV20, com dados operacionais, técnicos e financeiros consolidados para o ano de 2023. As usinas estão distribuídas em oito estados: São Paulo (SP), Minas Gerais (MG), Bahia (BA), Espírito Santo (ES), Rio Grande do Sul (RS), Goiás (GO), Rio Grande do Norte (RN) e Pará (PA), abrangendo diferentes condições climáticas, regimes de irradiação e estruturas contratuais. A capacidade instalada varia de 807,36 kWp a 6.176,25 kWp, cobrindo o espectro de minigeração distribuída conforme definido pela Resolução SBGC – Sociedade Brasileira de Gestão do Conhecimento – sbgc.org.br
KM Brasil 2026 - 21º Congresso Brasileiro de Gestão do Conhecimento – kmbrasil.org

Normativa n.º 1.000/2021 da ANEEL (ANEEL, 2021). Os dados foram compilados a partir de registros operacionais (SCADA), bases meteorológicas do INMET (INMET, 2023) e registros financeiros das empresas operadoras, seguindo critérios de completude, rastreabilidade e padronização. A identificação das usinas foi anonimizada para preservar a confidencialidade dos dados primários. Os valores brutos dos nove critérios para as 20 usinas, incluindo capacidade instalada, produção anual, disponibilidade, custos e receita por ativo, estão publicados na íntegra nos anais do 25º Congresso Internacional de Engenharia Mecânica e Industrial (FENEMI), em Silva, Carvalho e Lourenço (2025), estudo anterior que utilizou a mesma amostra.

3.2 Critérios de avaliação

Foram selecionados nove critérios organizados em três dimensões, conforme Quadro 1. A classificação como critério de benefício (quanto maior, melhor) ou custo (quanto menor, melhor) determina o tratamento dado na identificação das soluções ideais no TOPSIS. Os critérios foram escolhidos por sua relevância operacional e financeira para a gestão de ativos GD solar, com base na literatura especializada (IEA, 2024; IRENA, 2025; REDISKE; MICHELIS; SILUK; RIGO; ROSA; LIMA, 2024; SANTOS; LIMA; TEIXEIRA; CAMPOS, 2021).

A matriz mantém capacidade instalada, produção, receita e custos em valores absolutos para representar o desempenho multicritério do portfólio sob uma perspectiva gerencial. Essa escolha faz com que o índice Ci também incorpore efeitos de escala: usinas maiores tendem a apresentar simultaneamente maior capacidade, produção, receita e custos. Como produção, capacidade, fator de capacidade e receita possuem relações estruturais, os resultados devem ser interpretados como um ranking relativo às 20 usinas e às premissas adotadas, e não como medida de eficiência operacional independente do porte. A comparação com indicadores unitários e cenários alternativos de pesos é indicada como análise de sensibilidade.

Quadro 1 - Critérios de avaliação por dimensão

Nº	Critério	Dimensão	Tipo
C1	Capacidade Instalada (kWp)	Técnica	Benefício
C2	Disponibilidade Interna Anual (%)	Técnica	Benefício
C3	Disponibilidade Externa Anual (%)	Técnica	Benefício
C4	Irradiação Solar Local Anual (% vs. normal)	Energética	Benefício
C5	Produção de Energia Anual (MWh)	Energética	Benefício
C6	Fator de Capacidade Médio Anual (%)	Energética	Benefício
C7	Custo de Serviços de O&M Anual (R\$)	Financeira	Custo
C8	Custo de Arrendamento Anual (R\$)	Financeira	Custo
C9	Receita Bruta Anual (R\$)	Financeira	Benefício

Fonte: Elaborada pelos autores (2026)

3.3 Entropia de Shannon: determinação dos pesos

A Entropia de Shannon (SHANNON, 1948; HWANG; YOON, 1981) é um método objetivo de ponderação em MCDM que reduz a dependência de julgamentos subjetivos na atribuição dos pesos, ao derivá-los da variabilidade observada nos dados. A seleção dos critérios, sua orientação como benefício ou custo, a normalização e a composição da amostra permanecem decisões metodológicas dos pesquisadores. O procedimento segue quatro etapas, aplicadas a uma matriz com $n = 20$ usinas e $m = 9$ critérios.

Etapa 1: Normalização da matriz de decisão (Equação 1)

$$P_{ij} = x_{ij} / \sum_i x_{ij}, \quad i = 1, \dots, n; \quad j = 1, \dots, m \quad (1)$$

Etapa 2: Cálculo da entropia por critério (Equação 2)

$$E_j = -k \cdot \sum_i (P_{ij} \cdot \ln P_{ij}), \quad k = 1/\ln(n) \quad (2)$$

Etapa 3: Grau de divergência (Equação 3)

$$d_j = 1 - E_j \quad (3)$$

Etapa 4: Pesos normalizados (Equação 4)

$$w_j = d_j / \sum_j d_j \quad (4)$$

Critérios com alta variabilidade entre as usinas recebem pesos maiores, pois contribuem mais para discriminar o desempenho relativo dos ativos. Critérios homogêneos recebem pesos reduzidos, pois oferecem pouca informação discriminante.

3.4 TOPSIS: ranqueamento das usinas

O TOPSIS (HWANG; YOON, 1981) classifica as alternativas por sua proximidade simultânea à solução ideal positiva e afastamento da solução ideal negativa, em cinco etapas (Equações 5 a 9):

$$r_{ij} = x_{ij} / \sqrt{(\sum_i x_{ij}^2)} \quad (5)$$

$$v_{ij} = w_j \cdot r_{ij} \quad (6)$$

$$A^+ = \{ \max(v_{ij}), \text{benefício}; \min(v_{ij}), \text{custo} \} \quad A^- = \{ \min(v_{ij}), \text{benefício}; \max(v_{ij}), \text{custo} \} \quad (7)$$

$$D^+_i = \sqrt{[\sum_j (v_{ij} - v^+_j)^2]} \quad D^-_i = \sqrt{[\sum_j (v_{ij} - v^-_j)^2]} \quad (8)$$

$$C_i = D^-_i / (D^+_i + D^-_i), \quad C_i \in [0,1] \quad (9)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Pesos obtidos pela Entropia de Shannon

A Tabela 1 e a Figura 1 apresentam os pesos finais obtidos pelo método da Entropia de Shannon. O custo de arrendamento (C8) recebeu o maior peso, 31,41%, refletindo a alta variabilidade desse critério na amostra: os valores variam de R\$ 13.821 a R\$ 215.903, com coeficiente de variação de 70,7%. As disponibilidades interna (C2) e externa (C3) receberam pesos ínfimos, 0,07% e 0,02% respectivamente, pois todas as usinas apresentam valores muito próximos nessas métricas. Esse resultado é metodologicamente coerente: em uma amostra onde a disponibilidade é homogênea, ela pouco discrimina o desempenho relativo dos ativos. Os três critérios de maior peso somam 67% do total, sendo arrendamento (C8), produção (C5) e receita (C9), revelando que a competitividade das usinas GD solar na amostra é determinada principalmente pelas dimensões financeira e produtiva.

Tabela 1 - Pesos obtidos pela Entropia de Shannon

Nº	Critério	Tipo	Entropia (Ej)	Peso (wj)
C1	Capacidade Instalada (kWp)	Benefício	0,9619	16,86%
C2	Disponibilidade Interna (%)	Benefício	0,9998	0,07%
C3	Disponibilidade Externa (%)	Benefício	0,9999	0,02%
C4	Irradiação Solar (% vs. normal)	Benefício	0,9998	0,09%
C5	Produção Anual (MWh)	Benefício	0,9579	18,61%
C6	Fator de Capacidade (%)	Benefício	0,9976	1,06%
C7	Custo de O&M (R\$)	Custo	0,9664	14,84%
C8	Custo de Arrendamento (R\$)	Custo	0,9290	31,41%
C9	Receita Bruta (R\$)	Benefício	0,9615	17,02%

Fonte: Elaborada pelos autores (2026)

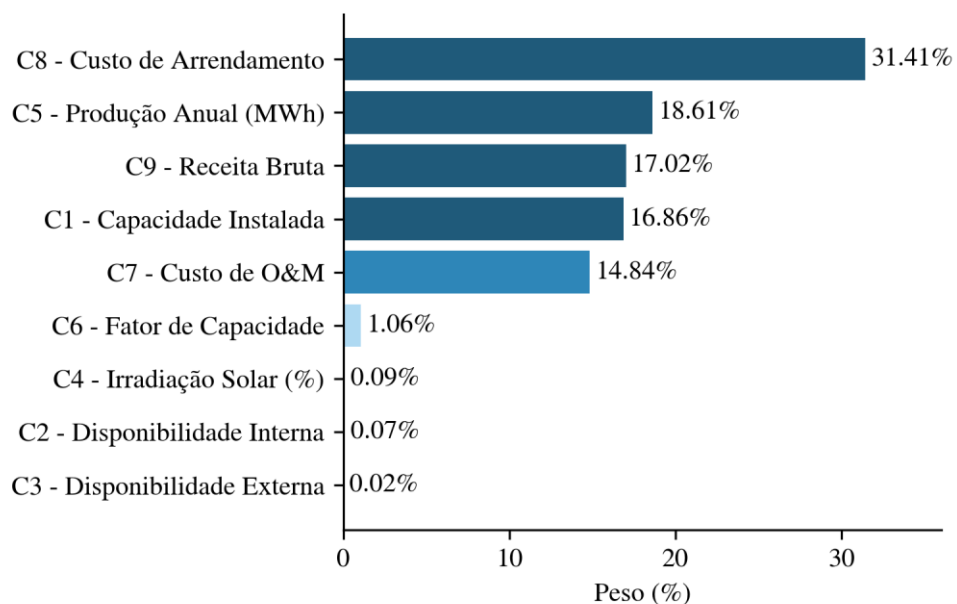


Figura 1 - Distribuição dos pesos dos critérios pela Entropia de Shannon (%)

Fonte: Elaborada pelos autores (2026)

4.2 Ranking TOPSIS

A Tabela 2 e a Figura 2 apresentam o ranking final das 20 usinas pelo índice C_i do TOPSIS. A amplitude de 0,4401 entre o maior ($C_i = 0,7118$) e o menor valor ($C_i = 0,2717$) demonstra que o modelo distingue as alternativas da amostra. O índice médio de 0,5362 indica proximidade relativa intermediária em relação à solução ideal positiva, considerando simultaneamente o afastamento da solução ideal negativa. Esse valor não corresponde,

necessariamente, a uma posição linear de 53,62% entre as duas soluções, nem constitui, por si só, um limite normativo de desempenho satisfatório.

Tabela 2 - *Ranking TOPSIS* das 20 usinas GD solar (ano-base 2023)

Rank	Usina	Estado	D+	D-	Ci
1	UFV05	BA	0,0706	0,1743	0,7118
2	UFV01	SP	0,0762	0,1466	0,6579
3	UFV17	ES	0,0920	0,1516	0,6223
4	UFV10	MG	0,0944	0,1479	0,6104
5	UFV18	RS	0,0934	0,1450	0,6082
6	UFV02	SP	0,0935	0,1388	0,5975
7	UFV04	BA	0,1150	0,1597	0,5814
8	UFV03	SP	0,0966	0,1305	0,5746
9	UFV19	ES	0,1323	0,1663	0,5569
10	UFV15	SP	0,1228	0,1506	0,5509
11	UFV06	RN	0,1309	0,1564	0,5444
12	UFV07	GO	0,1053	0,1214	0,5355
13	UFV16	SP	0,1153	0,1316	0,5330
14	UFV20	PA	0,1311	0,1455	0,5260
15	UFV09	MG	0,1038	0,1110	0,5167
16	UFV11	MG	0,1042	0,1106	0,5150
17	UFV14	MG	0,1135	0,1003	0,4691
18	UFV08	MG	0,1361	0,0803	0,3711
19	UFV13	MG	0,1362	0,0798	0,3694
20	UFV12	MG	0,1756	0,0655	0,2717

Fonte: Elaborada pelos autores (2026)

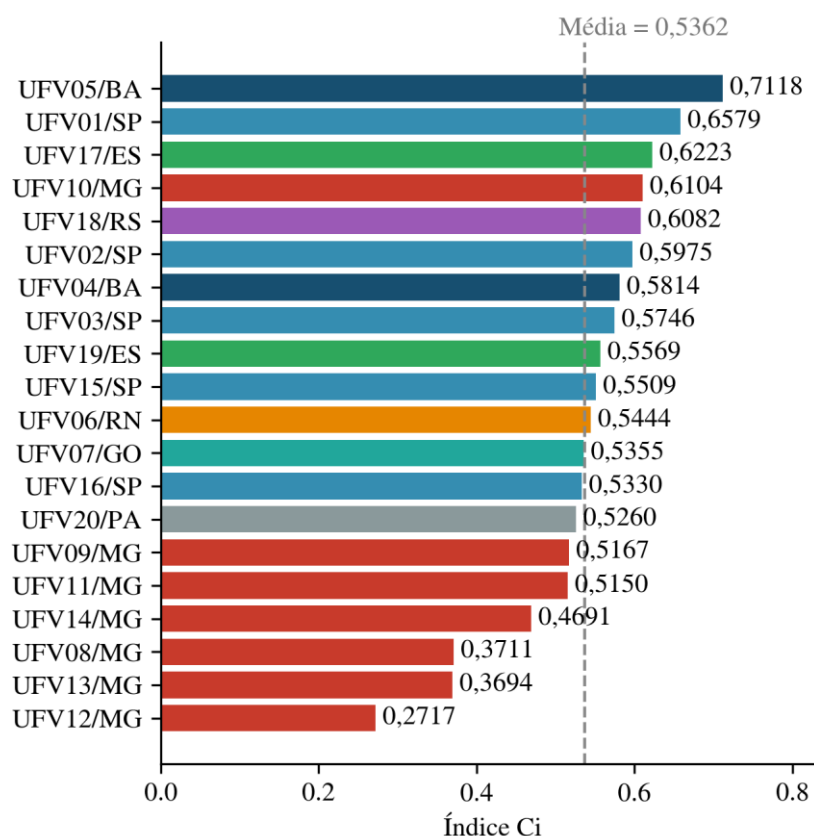


Figura 2 - *Ranking* das 20 usinas pelo índice Ci do TOPSIS

Fonte: Elaborada pelos autores (2026)

4.3 Análise dos resultados e da produção realizada

A usina Ufv05/BA lidera o ranking com $C_i = 0,7118$. Trata-se da maior usina da amostra (6.176,25 kWp), com a maior produção anual (12.876 MWh) e a maior receita bruta (R\$ 5,39 milhões), posicionando-se próxima à solução ideal positiva nos critérios de maior peso. Como capacidade, produção e receita foram utilizadas em valores absolutos, o resultado também reflete o porte do ativo e não deve ser interpretado como medida isolada de eficiência operacional. Apesar do maior custo absoluto de O&M, a combinação dos critérios e pesos favorece seus elevados valores de produção e receita.

No extremo oposto, Ufv12/MG ocupa a última posição ($C_i = 0,2717$), penalizada principalmente pelo custo de arrendamento, o maior da amostra, quase 16 vezes superior ao menor valor observado. Como o arrendamento recebeu o maior peso pelo método da Entropia (31,41%), esse critério determina de forma decisiva o posicionamento da usina próxima à solução ideal negativa. As demais usinas de MG (Ufv08, Ufv09, Ufv11, Ufv13, Ufv14) também ocupam as posições mais baixas do *ranking*, com exceção de Ufv10, cuja estrutura de

custo diferenciada a coloca em 4º lugar geral, com o menor custo de arrendamento de MG e a melhor disponibilidade interna da amostra (99,76%).

Como análise descritiva complementar, calculou-se o índice de produção anual pela razão entre a produção real e a produção prevista em projeto, multiplicada por 100. Esse indicador percentual não integra os nove critérios da matriz TOPSIS, cujo critério C5 corresponde à produção anual em MWh, e não deve ser confundido com o Performance Ratio da IEC 61724-1. Na amostra, os valores variam de 87,74% a 106,46%, com média aproximada de 96%, e apenas uma usina supera a referência de projeto. As diferenças podem estar associadas a desvios de irradiação em relação às premissas de projeto, perdas técnicas, indisponibilidades ou práticas de O&M (REDISKE; MICHELS; SILUK; RIGO; ROSA; LIMA, 2024; NREL, 2024). Em razão do tamanho, da distribuição e da seleção não probabilística da amostra, esse percentual não foi convertido em estimativa de potência improdutiva para o parque nacional.

4.4 Análise descritiva por estado

A análise por estado apresenta diferenças descritivas dentro da amostra, ilustradas na Figura 3. As duas usinas da Bahia (UFV05 e UFV04) apresentam a maior média estadual observada, $C_i = 0,6466$, e se caracterizam por níveis elevados de irradiação na amostra (2.306 a 2.307 kWh/m²/ano) e estruturas de custo competitivas. A única usina do Rio Grande do Sul (UFV18) apresenta $C_i = 0,6082$. As usinas do Espírito Santo (UFV17 e UFV19) têm C_i médio de 0,5896, seguidas das cinco usinas de São Paulo, com média de 0,5828. As únicas usinas da amostra localizadas no Rio Grande do Norte (UFV06), em Goiás (UFV07) e no Pará (UFV20) apresentam, respectivamente, C_i de 0,5444, 0,5355 e 0,5260. A linha horizontal da Figura 3 representa a média geral das 20 usinas (0,5362). As sete usinas de Minas Gerais apresentam C_i médio de 0,4462; no modelo, esse resultado está associado ao elevado peso do custo de arrendamento, embora UFV10 ocupe a quarta posição geral. Como RS, RN, GO e PA possuem apenas uma usina na amostra e os demais estados também apresentam poucos casos, os resultados não permitem inferências representativas sobre o desempenho dos estados ou das regiões brasileiras.

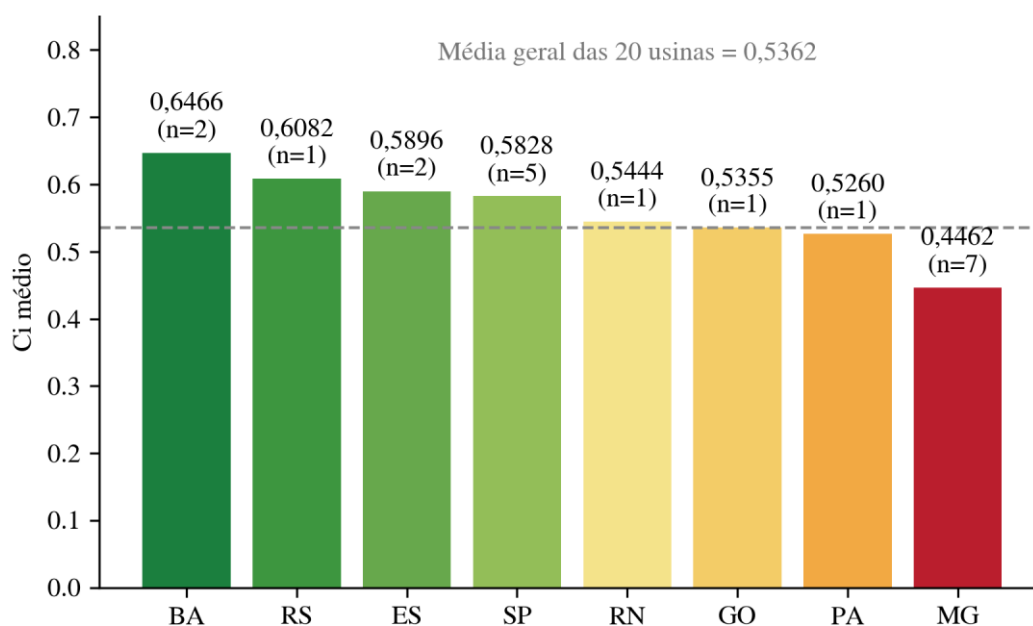


Figura 3 - Índice Ci médio por estado (n = número de usinas)

Fonte: Elaborada pelos autores (2026)

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E IMPLICAÇÕES

5.1 Contribuição do trabalho

Este estudo aplicou a combinação Entropia de Shannon e TOPSIS à avaliação de 20 usinas solares de geração distribuída no Brasil, com dados primários de 2023. O modelo produziu índices Ci com amplitude de 0,4401 entre os extremos da amostra. O custo de arrendamento, critério de maior variabilidade, recebeu o maior peso (31,41%), mostrando sua influência na estrutura do ranking. O estudo complementa a abordagem anterior baseada em DEA ao acrescentar um ranqueamento multicritério ponderado. No plano teórico, aproxima a literatura de MCDM aplicada a sistemas fotovoltaicos da Gestão do Conhecimento. No plano metodológico, demonstra a aplicação da combinação Entropia de Shannon–TOPSIS a dados reais. No plano gerencial, oferece um instrumento para comparar ativos e orientar investigações sobre os fatores associados ao desempenho.

5.2 Implicações teóricas e práticas

No plano teórico, este trabalho contribui para a literatura de MCDM aplicada a sistemas fotovoltaicos ao mostrar como a Entropia de Shannon distribui os pesos em uma amostra com

elevada variabilidade financeira e baixa variabilidade operacional. Os pesos reduzidos das disponibilidades interna e externa indicam homogeneidade desses critérios nas 20 usinas analisadas, mas não permitem concluir que o setor brasileiro tenha atingido determinado nível de maturidade operacional.

No plano prático, a estrutura metodológica oferece ao gestor uma base para identificar a posição relativa de cada ativo e os critérios associados ao seu afastamento da solução ideal. A UFV05/BA pode servir como referência interna para investigar práticas potencialmente transferíveis, desde que sejam consideradas as diferenças de porte, tecnologia, condições ambientais e contratos. Para a UFV12/MG, o modelo indica que o custo de arrendamento merece investigação prioritária, mas não demonstra, isoladamente, que a renegociação contratual seja a única ou a mais viável ação gerencial.

5.3 Implicações gerenciais

Para os operadores de usinas GD solar, o estudo demonstra que a avaliação por um único critério é insuficiente para representar as diferentes dimensões do desempenho. A abordagem multicritério explicita compensações: uma usina pode apresentar receita elevada e fator de capacidade reduzido, enquanto outra pode combinar alta disponibilidade com custos elevados. O índice C_i integra essas dimensões em uma medida comparativa válida para a amostra e para as premissas adotadas. Para investidores e formuladores de políticas públicas, a diferença observada entre produção prevista e realizada reforça a necessidade de mecanismos padronizados de acompanhamento, sem permitir extrapolação direta para o parque nacional.

5.4 Contribuições para a Gestão do Conhecimento

No campo da Gestão do Conhecimento, a estrutura metodológica propõe uma linguagem comum para organizar dados operacionais, financeiros e energéticos e convertê-los em informações comparáveis. Fundamentada na literatura sobre conhecimento tácito e externalização (POLANYI, 1966; NONAKA; TAKEUCHI, 1995), essa estrutura pode apoiar o mapeamento de conhecimentos críticos e a identificação de diferenças de desempenho entre ativos. Sua capacidade de produzir aprendizagem entre organizações, contudo, depende da adoção do método e ainda requer verificação empírica.

A replicação do método em uma base nacional poderia apoiar um processo sistemático de captura, organização e comparação de informações operacionais. Uma referência comum permitiria investigar práticas associadas a melhores resultados sem divulgar a identidade dos ativos. Esse uso é compatível com o conceito de aprendizagem interorganizacional (ARGOTE;

INGRAM, 2000), mas o presente estudo não avaliou se as organizações efetivamente aprendem ou modificam suas práticas a partir do ranking.

A diferença identificada entre produção prevista e realizada constitui uma informação relevante ainda pouco sistematizada no setor. A adoção de métricas comuns pode ampliar a capacidade das organizações de diagnosticar seus portfólios e compartilhar referências de desempenho. Nesse sentido, o método apoia uma gestão orientada por resultados observados, mas não substitui a análise técnica das causas específicas de desempenho de cada usina.

5.5 Limitações da pesquisa e estudos futuros

Este estudo apresenta limitações que devem orientar a interpretação dos resultados. A amostra compreende 20 usinas solares GD distribuídas em oito estados, com dados de um único ano-base (2023), e não é estatisticamente representativa do parque nacional. Por isso, a diferença média entre produção prevista e realizada possui caráter estritamente amostral e não foi extrapolada para a capacidade instalada brasileira. A ampliação da amostra e a replicação do método em diferentes regiões e períodos constituem etapas necessárias para avaliar sua generalização.

Em segundo lugar, os dados utilizados são de corte transversal, referentes a um único ano-base. A avaliação de séries temporais multianuais permitiria capturar efeitos de degradação progressiva dos módulos, variabilidade interanual de irradiação e tendências de desempenho ao longo do ciclo de vida dos ativos, aspectos não capturados pelo desenho atual.

Em terceiro lugar, as contribuições para a Gestão do Conhecimento têm natureza teórico-conceitual. A estrutura metodológica foi fundamentada na literatura sobre conhecimento tácito, externalização e aprendizagem interorganizacional (POLANYI, 1966; NONAKA; TAKEUCHI, 1995; ARGOTE; INGRAM, 2000), mas sua capacidade de promover aprendizagem entre organizações não foi verificada empiricamente. Uma pesquisa direta com gestores e equipes técnicas constitui, portanto, etapa prioritária para avaliar esse efeito.

Por fim, a Entropia de Shannon deriva os pesos da variabilidade dos dados e não incorpora diretamente o julgamento de especialistas sobre a importância dos critérios. Além disso, o uso conjunto de capacidade instalada, produção, fator de capacidade, receita e custos pode introduzir dependência entre critérios e influência do porte dos ativos. Estudos futuros devem comparar o cenário atual com pesos iguais, pesos obtidos por AHP (SAATY, 1980), exclusão da capacidade instalada e indicadores unitários, como geração específica, receita por MWh, custo de O&M por MWh ou por kWp e arrendamento por kWp. Recomenda-se avaliar

a estabilidade das posições por correlação de Spearman. Essa análise de sensibilidade exige a matriz bruta completa e permitirá distinguir desempenho multicritério de efeitos de escala.

6. REFERÊNCIAS

- ABSOLAR - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA. Boletim Anual de Mercado Solar Brasileiro. São Paulo: ABSOLAR, 2025. Disponível em: <https://www.absolar.org.br>. Acesso em: jun. 2026.
- AL-ABADI, A. M.; HANDHAL, A. M.; ABDULHASAN, M. A.; ALI, W. L.; HASSAN, J. J.; AL ABOODI, A. H. *Optimal siting of large photovoltaic solar farms at Basrah governorate, Southern Iraq using hybrid GIS-based Entropy-TOPSIS and AHP-TOPSIS models. Renewable Energy*, v. 241, 122308, 2024.
- ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução Normativa n.º 1.000/2021. Brasília: ANEEL, 2021.
- ARGOTE, L.; INGRAM, P. *Knowledge transfer: a basis for competitive advantage in firms. Organizational Behavior and Human Decision Processes*, v. 82, n. 1, p. 150-169, 2000.
- CAMP, R. C. *Benchmarking: the search for industry best practices that lead to superior performance*. Milwaukee: ASQC Quality Press, 1989.
- CHEN, Y. C.; CHIU, Y. H.; HUANG, C. C.; LIN, T. W. *Performance evaluation of solar PV power plants in Taiwan using Data Envelopment Analysis. Energies*, v. 14, n. 9, p. 2503, 2021.
- DAVENPORT, T. H.; PRUSAK, L. *Working knowledge: how organizations manage what they know*. Boston: Harvard Business School Press, 1998.
- EASTERBY-SMITH, M.; LYLES, M. A.; TSANG, E. W. K. *Inter-organizational knowledge transfer: current themes and future prospects. Journal of Management Studies*, v. 45, n. 4, p. 677-690, 2008.
- EIA - U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. *Distributed solar generating capacity is the fastest-growing power source in Brazil*. Washington, DC: EIA, 2025. Disponível em: <https://www.eia.gov>. Acesso em: jun. 2026.
- EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Painel de Dados de Micro e Minigeração Distribuída (PDGD). Rio de Janeiro: EPE, 2025. Disponível em: <https://dashboard.epe.gov.br/apps/pdgd/>. Acesso em: jun. 2026.
- GHAFFARIAN, S. A.; EBRAHIMI, M. *Efficiency analysis of photovoltaic plants: A DEA approach with undesirable outputs. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 145, 111105, 2021.
- HAFEZALKOTOB, A.; HAFEZALKOTOB, A. *Extended MULTIMOORA method based on Shannon entropy weight for materials selection. Journal of Industrial Engineering International*, v. 12, n. 1, p. 1-13, 2016.
- HWANG, C. L.; YOON, K. *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*. Berlin: Springer-Verlag, 1981.
- IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Renewables 2024: Analysis and Forecast to 2030*. Paris: IEA, 2024.

IEA-PVPS - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY PHOTOVOLTAIC POWER SYSTEMS PROGRAMME. *Snapshot of Global PV Markets 2025*. Paris: IEA-PVPS, 2025.

IEC - INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. *IEC 61724-1: photovoltaic system performance – part 1: monitoring*. 2. ed. Geneva: IEC, 2021.

INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa. Brasília, 2023. Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br>. Acesso em: jun. 2026.

IRENA - INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. *Renewable Capacity Statistics 2025*. Abu Dhabi: IRENA, 2025.

IRENA - INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. *Renewable Capacity Highlights 2026*. Abu Dhabi: IRENA, 2026.

LEAL, A. B.; SOUZA FILHO, H. N.; ZANON, L. G.; SIGAHI, T. F. A. C.; RAMPASSO, I. S.; ANHOLON, R. *Selection of photovoltaic panels for floating systems: an analysis based on Entropy, CRITIC and TOPSIS*. *International Journal of Sustainable Engineering*, v. 17, n. 1, p. 1173-1185, 2024.

LE ROUX, E.; LE GRANGE, L.; BELLO-OCHEDE, T. *Combining entropy weight and TOPSIS method for selection of tank geometry and filler material of a packed-bed thermal energy storage system*. *Journal of Cleaner Production*, v. 413, 137409, 2023.

LINDIG, S.; GALLMETZER, S.; HERZ, M.; LOUWEN, A.; KOUMPLI, E.; SEBASTIAN ENRIQUEZ PAEZ, P.; MOSER, D. *Towards the development of an optimized decision support system for the PV industry: a comprehensive statistical and economical assessment of over 35,000 O&M tickets*. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, v. 31, n. 12, p. 1215-1234, 2023.

NONAKA, I.; TAKEUCHI, H. *The knowledge-creating company: how Japanese companies create the dynamics of innovation*. New York: Oxford University Press, 1995.

NREL - NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY. *PV Fleet Performance Data Initiative*. Golden, CO: U.S. Department of Energy, 2024.

POLANYI, M. *The tacit dimension*. London: Routledge & Kegan Paul, 1966.

QUINTANILLA, P.; HENNEAUX, P.; ROBIDOUX, P.-L. *A multiple criteria decision making method to weight the sustainability criteria of renewable energy technologies under uncertainty*. *IFAC-PapersOnLine*, v. 56, n. 2, p. 2317-2322, 2023.

REDISKE, G.; MICHELS, L.; SILUK, J. C. M.; RIGO, P. D.; ROSA, C. B.; LIMA, A. C. A *proposed set of indicators for evaluating the performance of the operation and maintenance of photovoltaic plants*. *Applied Energy*, v. 354, 122158, 2024.

SAATY, T. L. *The Analytic Hierarchy Process*. New York: McGraw-Hill, 1980.

SANTOS, A. H. M.; LIMA, L. F.; TEIXEIRA, A. C. R.; CAMPOS, R. A. C. *Economic performance indicators for grid-connected photovoltaic systems: a case study in Brazil*. *Energy Policy*, v. 149, 111942, 2021.

SHANNON, C. E. *A Mathematical Theory of Communication*. *Bell System Technical Journal*, v. 27, n. 3, p. 379-423; n. 4, p. 623-656, 1948.

SILVA, H. de S. e; CARVALHO, M. F. H.; LOURENÇO, S. R. *Avaliação de desempenho operacional de usinas solares de geração distribuída no Brasil utilizando modelos DEA-CCR e DEA-BCC*. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA E

INDUSTRIAL, 25., 2025, João Pessoa. Anais [...]. João Pessoa: Even3, 2025. p. 1-16. DOI: <https://doi.org/10.29327/27644294.1249716>.

YIN, J.; ZHANG, M.; WANG, Y.; LI, X. *Comprehensive ecological effect evaluation of photovoltaic stations using entropy-weighted TOPSIS*. *Ecological Indicators*, v. 170, 113035, 2025.