LVI SBPO SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL
DE 04 ATÉ 07 NOVEMBRO 2024
FORTALEZA | CEARÁ

PRIORIZANDO ALTERNATIVAS DE ENERGIA RENOVÁVEL UTILIZANDO O MÉTODO HÍBRIDO PSI PrOPPAGA NO CENÁRIO DE TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

Anderson Gonçalves Portella
Universidade Federal Fluminense - UFF
Niterói RJ 24210-346, BRASIL
andersonportella@yahoo.com.br

Marcos dos Santos
Instituto Militar de Engenharia - IME
Praça Gen. Tibúrcio, 80 - Urca, Rio de Janeiro - RJ, 22290-270
marcosdossantos@ime.eb.br

RESUMO

A transição para fontes renováveis de energia é um assunto de grande importância no atual contexto global, dada a crescente demanda por energia e os desafios ambientais e socioeconômicos que o mundo enfrenta. A busca por uma matriz energética mais sustentável tornou-se uma prioridade inegável em todo o mundo. Este estudo tem como objetivo ranquear as melhores fontes de energia renovável para o Brasil, utilizando o método híbrido PSI PrOPPAGA. Os critérios considerados incluem Eficiência na Geração de Energia, Viabilidade Econômica e Aceitação Social. Após uma análise minuciosa e consulta a especialistas por meio de questionários anônimos, a Energia Solar surge como a opção mais viável, seguida pelo Gás Natural e Energia Hidrelétrica. O método mostrou-se eficaz na redução da subjetividade na tomada de decisão, oferecendo uma abordagem sistemática para priorizar alternativas de energia renovável.

PALAVRAS-CHAVE. Energia Renovável, PSI PrOPPAGA, Transição Energética.

Tópicos (Apoio Multicritério à Decisão – AMD, Pesquisa Operacional, Energia Renovável)

ABSTRACT

The transition to renewable energy sources is a matter of great importance in the current global context, given the increasing demand for energy and the environmental and socioeconomic challenges the world is facing. The pursuit of a more sustainable energy matrix has become an undeniable priority worldwide. This study aims to rank the best renewable energy sources for Brazil, using the hybrid PSI PrOPPAGA method. The considered criteria include Energy Generation Efficiency, Economic Viability, and Social Acceptance. After a thorough analysis and consultation with experts via anonymous questionnaires, Solar Energy emerges as the most viable option, followed by Natural Gas and Hydroelectric Energy. The method proved effective in reducing subjectivity in decision-making, offering a systematic approach to prioritize renewable energy alternatives.

KEYWORDS. Renewable Energy, PSI PrOPPAGA, Energy Transition.

Paper topics (Multicriteria Decision Aid – MDA, Operational Research, Renewable Energy)

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193908
https://proceedings.science/p/193908?lang=en

1. Introdução

A transição para fontes de energia renovável é uma preocupação global diante dos desafios ambientais e socioeconômicos enfrentados pelo mundo contemporâneo. Com a crescente demanda por energia e os impactos das mudanças climáticas, a busca por uma matriz energética mais sustentável tornou-se uma prioridade inegável em nível mundial.

Eventos climáticos extremos, como ondas de calor, secas, inundações e tempestades, tornaram-se mais frequentes e intensos devido às mudanças climáticas *Intergovernmental Panel on Climate Change* - IPCC [2021]. Esses eventos representam riscos significativos para a infraestrutura energética, direta e indiretamente, ao interromper a geração, transmissão e distribuição de eletricidade segundo Suman *et al.* [2023].

Além disso, eventos climáticos extremos podem afetar significativamente a disponibilidade e a confiabilidade dos recursos energéticos, especialmente os que dependem de fontes estáveis de água, como usinas hidrelétricas e térmicas Zhang *et al.* [2015]. À medida que estas perturbações climáticas se tornam mais prevalentes, a diversificação das fontes de energia e o aumento da resiliência das infraestruturas têm sido cada vez mais reconhecidos como componentes críticos das políticas energéticas nacionais Grafakos *et al.* [2020].

As energias renováveis, como a energia solar, a energia eólica e a energia das marés, oferecem alternativas promissoras para reduzir as emissões de carbono responsáveis pelas alterações climáticas e promover a resiliência face a eventos climáticos extremos segundo a *Energy Information Administration* – EIA [2021]. Ao promover um portfólio diversificado de recursos energéticos, os países podem mitigar a dependência de uma única fonte de energia suscetível a interrupções climáticas.

Por sua vez, essa diversificação pode acelerar a transição energética global para um futuro mais sustentável, resiliente e de baixo carbono EIA [2021]. Além disso, o investimento em infraestruturas de energias renováveis, sistemas de armazenamento de energia e tecnologias de redes inteligentes pode proporcionar capacidades adicionais de reserva contra fenómenos extremos e contribuir para as medidas de adaptação às alterações climáticas necessárias para proteger ativos valiosos e garantir a segurança energética Grafakos *et al.* [2020].

O recente evento na Europa serve como um ponto de partida importante para o Brasil diversificar suas fontes de energia e aumentar a participação de energia limpa e renovável em sua matriz energética. A dependência excessiva de uma única fonte energética pode representar riscos significativos para a segurança energética de um país, especialmente em situações de instabilidade geopolítica ou interrupções no fornecimento.

Ao observar os desafios enfrentados pela Europa devido à sua dependência do gás russo, o Brasil pode aprender lições importantes e agir proativamente para fortalecer sua resiliência energética. Aumentar a participação de fontes de energia renovável, como solar, eólica, hidrelétrica e biomassa, não apenas reduziria a dependência de combustíveis fósseis, mas também contribuiria para mitigar as mudanças climáticas e promover a sustentabilidade ambiental.

O Brasil, apresenta vasto potencial para a geração de energia renovável, contando com recursos abundantes de energia solar, eólica, hídrica e de biomassa. Diante da necessidade imperativa de uma matriz energética mais limpa e sustentável, a seleção criteriosa das fontes renováveis mais apropriadas se torna essencial, considerando uma gama de fatores.

Nesse cenário, a avaliação e priorização das alternativas de energia renovável exige uma abordagem sistemática, considerando diversos fatores. Eficiência na geração de energia, impacto ambiental, viabilidade econômica, maturidade tecnológica, escalabilidade, aceitação social e impacto na comunidade são alguns dos critérios relevantes que devem ser ponderados.

A Pesquisa Operacional, por meio de ferramentas de tomada de decisão multicritério, pode auxiliar na priorização das alternativas de energia renovável. Através de modelos matemáticos e algoritmos, essa abordagem permite considerar todos os critérios relevantes para a escolha, ponderando suas importâncias de acordo com as necessidades específicas de cada região.

Para auxiliar nesse processo complexo, propõe-se um método híbrido denominado PSI PrOPPAGA. A abordagem combina a técnica PSI (*Preference Selection Index*) proposto por

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193908
https://proceedings.science/p/193908?lang=en

Maniya e Bath (2010) com o método PrOPPAGA (Prioridade Observada a Partir da Presunção de Atitude Gaussiana das Alternativas), proposto por Santos e Santos (2021). Enquanto a PSI permite a consideração das preferências individuais do decisor, o PrOPPAGA possibilita a projeção de perspectivas futuras e a agregação de preferências em um contexto global.

O método híbrido PSI PrOPPAGA oferece uma abordagem sistemática e abrangente para essa tomada de decisão, contribuindo para a construção de um futuro energético sustentável para humanidade. Desta forma, aplicado em um framework pretende-se priorizar as alternativas de energia renovável em escala global, considerando critérios e particularidades de cada região.

O artigo está organizado em 7 seções: a seção 1 compreende esta introdução, a seção 2 apresenta a descrição do problema; na seção 3 é apresentada a fundamentação teórica buscando analisar a visão acadêmica sobre o problema e possíveis soluções encontradas; na seção 4 é apresentada a metodologia utilizada, evidenciando o caminho percorrido até a apresentação do resultado final; a seção 5 traz a aplicação prática, mostrando a proposta de solução para o problema; a seção 6 descreve as conclusões acerca do desenvolvimento do artigo; na seção 7 são apresentadas as considerações finais sobre o propósito da pesquisa e o objetivo alcançado, além das possíveis contribuições para academia. Ao final, as referências bibliográficas, documentando os materiais utilizados neste artigo.

2. Descrição do Problema

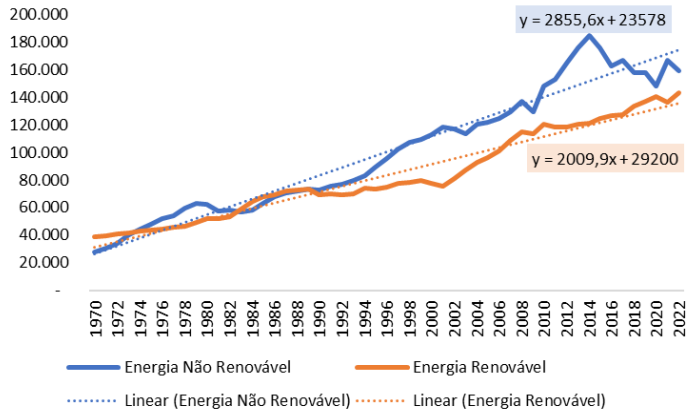
A transição para fontes de energia renovável é uma questão de grande importância no contexto global atual, dada a crescente demanda por energia e os desafios ambientais e socioeconômicos que o mundo enfrenta. A busca por uma matriz energética mais sustentável tornou-se uma prioridade inegável em nível mundial.

Os eventos climáticos extremos e a recente crise energética na Europa servem como ponto de partida para o Brasil diversificar suas fontes de energia e aumentar a participação de energia limpa e renovável em sua matriz energética. A dependência excessiva de uma única fonte energética pode representar riscos significativos para a segurança energética de um país, especialmente em situações de instabilidade geopolítica ou interrupções no fornecimento.

Ao observar os desafios enfrentados pelo continente devido à sua dependência do gás russo, o Brasil pode aprender lições importantes e agir proativamente para fortalecer sua resiliência energética. Aumentar a participação de fontes de energia renovável, como solar, eólica, hidrelétrica e biomassa, não apenas reduziria a dependência de combustíveis fósseis, mas também contribuiria para mitigar as mudanças climáticas e promover a sustentabilidade ambiental.

O Brasil, com seu vasto potencial para a geração de energia renovável, está em uma posição única para liderar essa transição, conforme Gráfico 1. No entanto, a seleção criteriosa das fontes renováveis é essencial, considerando uma variedade de fatores.

Gráfico 1 – Fontes de energia renovável *versus* não renovável



Fonte: Autores Adaptado de Boletim Energético Nacional (2024)

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193908
https://proceedings.science/p/193908?lang=en

Nesse cenário, a avaliação e priorização das alternativas de energia renovável exige uma abordagem sistemática, levando em conta diversos fatores. Eficiência na geração de energia, impacto ambiental, viabilidade econômica, maturidade tecnológica, escalabilidade, aceitação social e impacto na comunidade são alguns dos critérios relevantes que devem ser ponderados.

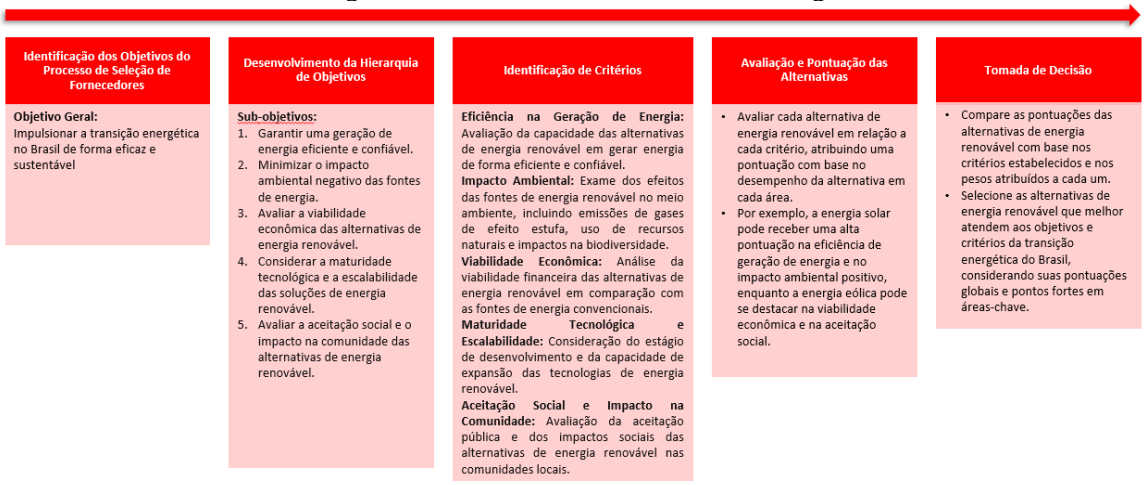
A Pesquisa Operacional, por meio de ferramentas de tomada de decisão multicritério, pode auxiliar na priorização das alternativas de energia renovável. Utilizando-se de modelos matemáticos e algoritmos, essa abordagem permite considerar os critérios relevantes para a escolha, ponderando suas importâncias de acordo com as necessidades específicas de cada região.

Adicionalmente, os métodos de estruturação de problemas (*Problem Solving Methods*, do inglês, PSM) oferecem ao decisor a capacidade de modelar questões decisórias que ainda não foram estruturadas pelos envolvidos, ajudando assim na avaliação de problemas, reduzindo incertezas e complexidade no ambiente de decisão.

Conforme esclarece Rosenhead [1996], os PSM dão suporte sistemático aos decisores na definição de uma estrutura específica para seu problema, permitindo que os analistas tenham um maior envolvimento com problemas estratégicos, como aqueles que incluem diversos decisores com relativa independência.

Esta pesquisa utilizou o método de estruturação de problemas conhecido como VFT (*Value-Focused Thinking*). Introduzido por Keeney [1992], o VFT é um processo que busca identificar os valores que servirão de guia para o decisor no processo geral de tomada de decisão. Ao se concentrar na identificação de valores, o VFT adota uma abordagem que se destingue das convencionais, pois não se concentra apenas nas alternativas disponíveis, conforme Figura 1.

Figura 1 – VFT – Value-Focused Thinking



Fonte: Autores (2024)

3. Fundamentação Teórica

A fundamentação teórica foi construída em resposta à necessidade de um entendimento mais aprofundado dos métodos acadêmicos de tomada de decisão e da metodologia utilizada, assegurando sua aplicação precisa e imparcial.

Para isso, foi realizada a busca na base de dados Scopus utilizando 2 strings diferentes, sendo a primeira *string* buscando de maneira geral os artigos publicados com relação aos métodos multicritérios selecionados, principalmente aos métodos PSI e PrOPPAGA, separadamente ou como método híbrido.

Já a segunda string priorizando os métodos utilizados que envolviam a escolha de energia renovável ou áreas correlatadas, mostrado no Quadro 1 apresentado a seguir:

Quadro 1 - Strings de busca

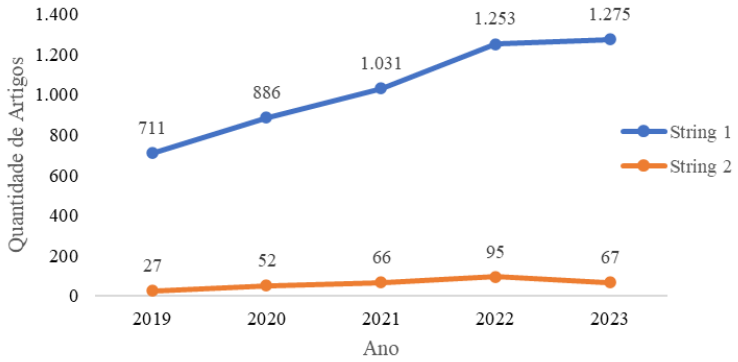
DOI: 10.59254/sbpo-2024-193908
https://proceedings.science/p/193908?lang=en

String 1	(mcdm OR psi OR proppaga OR multicriteria OR amd OR (psi AND proppaga)) AND (selection OR choice OR choose)
String 2	(mcdm OR psi OR proppaga OR multicriteria OR amd OR (psi AND proppaga)) AND (selection OR choice OR choose) AND (renewable energy)

Fonte: Autores (2024)

Depois de empregar as *strings*, implementamos dois critérios de exclusão. O primeiro eliminou todos os trabalhos que não se classificavam como artigos. O segundo critério excluiu todos os publicados antes de 2019. Isso resultou em um intervalo que abrange de 2019 a 2024. O Gráfico 2, ilustra a evolução temporal dos artigos baseada nas *strings* utilizadas.

Gráfico 2 - Quantidade de artigos por *string*

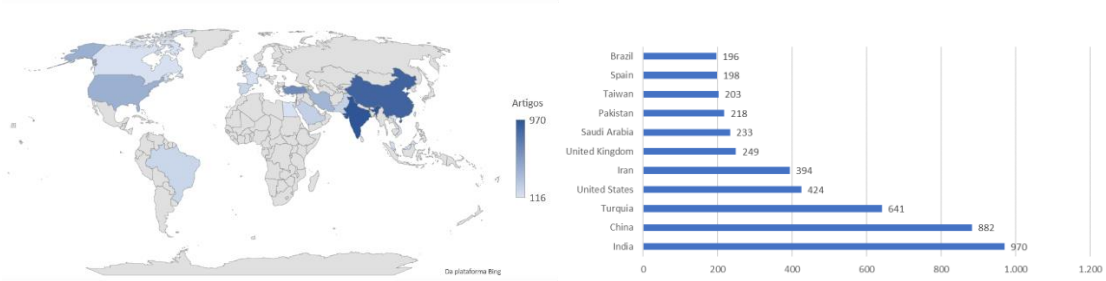


Fonte: Autores (2024)

O Gráfico 3, utilizando-se da *string* 1, mostra quais continentes/países mais publicam artigos voltados a AMD, onde os métodos são mais desenvolvidos e estudados, e no desdobramento destes dados é possível ver que o Brasil ocupa a décima primeira posição dentre os principais países que estudam sobre o tema, possuindo participação de 4,3% entre os 11 primeiros.

Índia (21%) e China (19%) são os motores à frente da AMD, o que representa 2/5 (dois quintos) dos artigos dentre os 11 países que mais pesquisam o tema.

Gráfico 3 – Visão coroplética e Visão por países utilizando *string* 1



Fonte: Autores com dados SCOPUS (2024)

Nguyen *et al.* [2022] desenvolveram um modelo de tomada de decisão baseado em conjuntos difusos esféricos para selecionar fornecedores de turbinas eólicas em projetos de energia eólica, usando o Vietnã como estudo de caso. O MCDM proposto ajuda os investidores a avaliar critérios qualitativos e quantitativos para encontrar o fornecedor ideal. Os resultados podem orientar especialistas na seleção de fornecedores adequados e projetos de energia renovável.

Melek *et al.* [2024] propuseram um novo modelo para a seleção de locais adequados para sistemas fotovoltaicos flutuantes (FPV) usando um método robusto de tomada de decisão multicritério (MCDM). Após uma revisão da literatura e um questionário com 30 especialistas, o modelo *Fuzzy Einstein-based Logarithmic Additive Estimation of Weight Coefficients* (LAAW) foi

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193908
https://proceedings.science/p/193908?lang=en

aplicado para determinar os pesos de 4 critérios principais e 41 sub-critérios. Os principais critérios foram classificados em ordem de importância: econômico, técnico, ambiental e social e regulamentações. Os resultados são consistentes, mesmo com diferenças nos critérios e método.

Gribiss *et al.* [2023] apresentaram 16 configurações diferentes para o autoconsumo de energia em comunidades de energia renovável (REC) com fábricas industriais variadas. Modelos matemáticos são propostos e comparados de acordo com critérios econômicos, ambientais, técnicos e sociais. Quatro métodos MCDM são usados para escolher as melhores configurações. Os resultados mostram que as configurações mais eficazes combinam autoconsumo individual e coletivo, com a produção coletiva trazendo múltiplos benefícios, incluindo aumento dos ganhos econômicos, redução das emissões de CO2, melhoria na autossuficiência e aumento da criação de empregos. A incorporação de armazenamento aumenta a autossuficiência e reduz a dependência da rede elétrica, diminuindo as emissões de CO2.

Günen [2021] utilizou sistemas de informações geográficas e métodos MCDM para encontrar a melhor localização para usinas solares fotovoltaicas em Kayseri, Turquia. Foram determinados três critérios principais, doze subcritérios e seus indicadores. Os métodos MCDM baseados em rank e AHP foram usados para determinar os pesos dos critérios, e 33 usinas solares fotovoltaicas existentes foram utilizadas para verificar o sucesso dos métodos MCDM. Os resultados mostram que a maioria das usinas solares está em áreas convenientes do mapa de adequação, e Sarız, Tomarza e Incesu foram identificados como os locais mais adequados

Ali *et al.* [2019] investigaram qual seria a melhor tecnologia de energia renovável (RET) para Bangladesh, focando na região sul. Avaliando sistemas de energia solar, eólica, biomassa, biogás e híbrido solar-eólica-bateria, a análise de decisão multicritério (MCDM) com um modelo integrado Entropia-EDAS foi aplicada, considerando critérios econômicos, técnicos, ambientais e sociopolíticos. Usando o método de Entropia de Shannon, o sistema híbrido solar-eólica-bateria foi selecionado como a melhor opção, podendo ser aplicado em outras áreas isoladas do país.

Kadric *et al.* [2024] investigaram o potencial de economia de energia e redução de emissões de CO2 em edifícios hospitalares na Bósnia e Herzegovina por meio de medidas de renovação energética. Foram analisadas medidas como instalação de isolamento térmico e planta fotovoltaica. Utilizou-se o método PSI para avaliar os cenários de renovação. Os resultados destacam a eficiência energética e redução do impacto ambiental em hospitais na região.

Suman *et al.* [2023] investigaram o avanço da tecnologia fotovoltaica (PV) como fonte limpa de energia. Neste estudo, uma abordagem MCDM modificada, integrando medida de informação Pythagorean Fuzzy (PF) e a técnica TOPSIS, foi proposta para auxiliar na seleção de tecnologias PV adequadas. Esta abordagem foi aplicada em um caso de seleção de tecnologia PV, demonstrando sua viabilidade e eficácia, ao auxiliar nas escolhas sustentáveis na seleção de tecnologias e no apoio à políticas governamentais.

Wang *et al.* [2019] investigaram a seleção de locais para usinas de energia a hidrogênio no Vietnã, utilizando tomada de decisão multicritério difusa (FMCDM). Os critérios são determinados por especialistas e revisões da literatura, e o método TOPSIS é usado para classificar locais potenciais. O DMU010 foi identificado como a solução ótima, e esse modelo pode ser útil para energias renováveis no Vietnã e em outros países.

Kaur *et al.* [2022] propuseram um algoritmo eficiente baseado em MCDM difuso para selecionar a melhor planta de energia hibridizada na Turquia, comparando estudos e investigando instalações de usinas de energia renovável. Utilizando a teoria da combinação e o método difuso TOPSIS, o algoritmo seleciona a melhor alternativa entre as opções de energia única e híbrida na Turquia. Os resultados destacam a melhor combinação de várias fontes de energia na Turquia.

Portella *et al.* [2024], analisaram o impacto do desemprego na sociedade, destacando a importância de escolher empresas. Utilizando uma abordagem híbrida, o PSI para pesos e o SPOTIS para classificação, com dados do Glassdoor, foi possível oferecer orientação valiosa para trabalhadores, permitindo decisões informadas sobre emprego através de abordagem sistêmica.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193908
https://proceedings.science/p/193908?lang=en

Após considerar as aplicações de métodos de auxílio à tomada de decisão multicritério identificadas na literatura, o método PSI proposto por Maniya e Bhatt [2010] e o PrOPPAGA proposto por Santos *et al.* [2021] foi utilizado de maneira híbrida para analisar o problema.

4. Metodologia

A pesquisa foi iniciada com a análise dos critérios de escolha que nortearam a seleção de fontes de energia renováveis. Com o auxílio da metodologia VFT (*Value-Focused Thinking*) foi possível elencar as alternativas e os critérios que deveriam ser utilizados para escolha.

Adicionalmente, para obter o resultado para os critérios qualitativos foi elaborado questionário utilizando a escala Likert [1932], conforme figura 2.

Figura 2 – Escalas Likert

Escala Likert	Concordância	Frequência	Probabilidade
5	Concordo Totalmente	Muito frequente	Quase sempre verdade
4	Concordo	Frequentemente	Geralmente verdade
3	Não concordo, nem discordo	Eventualmente	Às vezes é verdade
2	Discordo	Raramente	Geralmente e falso
1	Discordo totalmente	Nunca	Quase sempre é falso

Fonte: Adaptado Autores (2024)

Um questionário online anônimo foi submetido a um grupo de especialistas da área de Transição Energética para coletar suas percepções sobre as fontes de energia renovável.

Tabela 1 – Questionário online

#	Critério	Questão
1	Impacto Ambiental	Com qual FREQUÊNCIA a alternativa abaixo acarreta Impacto Ambiental?
2	Aceitação Social e Impacto na Comunidade	Com qual PROBABILIDADE a alternativa abaixo possui Aceitação Social e Impacto (positivo) na Comunidade?
3	Viabilidade Econômica	Você CONCORDA que a alternativa abaixo possui Viabilidade Econômica?
4	Maturidade Tecnológica e Escalabilidade	Você CONCORDA que a alternativa abaixo possui Maturidade Tecnológica e Escalabilidade?

Fonte: Autores (2024)

Com os critérios selecionados, as alternativas pré-estabelecidas e os dados coletados com o auxílio do questionário, foi possível elaborar os dados que formaram a matriz de decisão.

Após a fundamentação teórica, o método PSI proposto por Maniya e Bhatt [2010] foi escolhido para elaborar os pesos e o método PrOPPAGA proposto por Santos e Santos [2021] para selecionar as alternativas, realizando uma abordagem híbrida para o problema, o que permite demonstrar a eficácia do MCDA para uma ordenação lógica e racional. Facilitando a aplicação e o entendimento, reduzindo as limitações de outros métodos e, dificultando a existência de inconsistências/incoerências no processo ao reduzir a subjetividade.

4.1 Alternativas

Após o conhecimento do problema, foram selecionadas 5 fontes de energia renovável, as quais são objeto de estudo e amplamente aplicadas por empresas de diversos portes e cidadãos comuns em suas residências, como é o caso da energia solar e do gás natural. E por outro lado excluímos fontes como hidrogênio, apesar do grande potencial.

Tabela 2 – Alternativas

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193908
https://proceedings.science/p/193908?lang=en

#	Alternativa	Descrição
A1	Energia Solar	É gerada através da captura da luz do sol e sua conversão em eletricidade ou calor. Isso pode ser feito usando painéis solares fotovoltaicos para gerar eletricidade ou coletores solares térmicos para aquecer água ou fluidos. É uma fonte de energia renovável e sustentável
A2	Energia Eólica	É gerada pelo movimento do ar, capturado por turbinas eólicas que giram e geram eletricidade. Ela é produzida quando o vento faz as pás da turbina girarem, acionando um gerador. A energia eólica é uma fonte de energia renovável e limpa
A3	Energia Hidroelétrica	É produzida pela conversão da energia cinética da água em energia elétrica. Isso é feito em usinas hidrelétricas, onde a água em movimento é usada para girar turbinas que acionam geradores elétricos. É uma fonte de energia renovável, mas sua implementação pode ter impactos ambientais significativos
A4	Biomassa Energética	Refere-se ao uso de materiais orgânicos, como resíduos agrícolas, madeira, lixo orgânico e culturas energéticas, para produzir calor, eletricidade ou biocombustíveis. É uma fonte de energia renovável, pois os materiais utilizados podem ser regenerados, mas sua utilização pode ter impactos ambientais e sociais se não for gerenciada de forma sustentável
A5	Gás Natural	É uma fonte de energia fóssil composta principalmente por metano. Ele é extraído de depósitos subterrâneos e pode ser usado para gerar eletricidade, aquecer residências e como combustível veicular. Apesar de ser mais limpo do que muitos combustíveis fósseis, a queima de gás natural ainda produz emissões de gases de efeito estufa e sua exploração pode ter impactos ambientais negativos

Fonte: Autores (2024)

4.2 Critérios

Os critérios foram selecionados a partir dos requisitos levantados com o auxílio do VFT, que identificou os relevantes para o problema e a natureza de sua monotonicidade, ou seja, critério de custo, ou critério de benefício.

Tabela 3 - Critérios

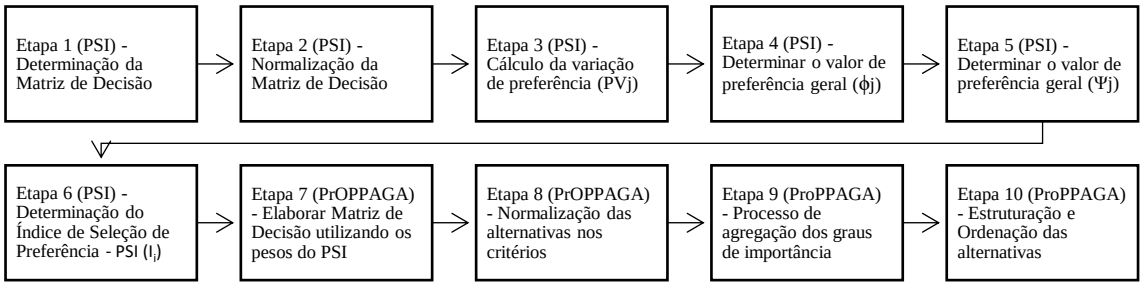
#	Critério	Descrição
C1	Eficiência na Geração de Energia	Avaliação da capacidade das alternativas de energia renovável em gerar energia de forma eficiente e confiável
C2	Impacto Ambiental	Exame dos efeitos das fontes de energia renovável no meio ambiente, incluindo emissões de gases de efeito estufa, uso de recursos naturais e impactos na biodiversidade
C3	Viabilidade Econômica	Análise da viabilidade financeira das alternativas de energia renovável em comparação com as fontes de energia convencionais
C4	Maturidade Tecnológica e Escalabilidade	Consideração do estágio de desenvolvimento e da capacidade de expansão das tecnologias de energia renovável
C5	Aceitação Social e Impacto na Comunidade	Avaliação da aceitação pública e dos impactos sociais das alternativas de energia renovável nas comunidades locais

Fonte: Autores (2024)

5. Proposta de Solução

Na proposta que para aplicação do método híbrido PSI PrOPPAGA, o PSI proposto por Maniya e Bhatt [2010] foi utilizado para geração dos pesos e o PrOPPAGA [Santos e Santos 2021] para realização dos cálculos posteriores até o ordenamento das alternativas.

Figura 3 – Etapas do método híbrido PSI PrOPPAGA



Fonte: Adaptado de [Maniya e Bhatt 2010 e Santos *et al.* 2021]

5.1 Etapas do método

5.1.1 Etapa 1

Nesta etapa é construída a matriz, conforme apresentado na Eq. (1) e (2), onde *i* é equivalente a linha determinada pelas alternativas e *j* equivalente a coluna determinada pelos critérios, de tal forma que um conjunto de critérios ou atributos de decisão, onde x_{ij} representa o desempenho da alternativa A_i quando examinada com o critério C_j.

$$A = \{A_i \text{ para } i = 1, 2, 3, ..., n\} \quad (1)$$

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193908
https://proceedings.science/p/193908?lang=en

$$C = \{C_j \text{ para } j = 1, 2, 3, ..., m\} \quad (2)$$

5.1.2 Etapa 2

Após construir a matriz de decisão, é necessário normalizá-la de acordo com o tipo de critério: Eq. (3) benéfico ou Eq. (4) baseado em custos.

$$R_{ij} = \frac{X_{ij}}{X_j^{max}} \quad (3)$$

$$R_{ij} = \frac{X_j^{min}}{X_{ij}} \quad (4)$$

5.1.3 Etapa 3

Em seguida, é calculado o valor da variação de preferência para cada atributo, determinado pelo conceito de variação quadrática de preferências da amostra, conforme a Eq. (5).

$$PV = \sum_{i=1}^{N} |R_{ij} - \bar{R}j|^2 \quad (5)$$

Onde está a média do valor normalizado do atributo *j*, conforme Eq. (6):

$$\bar{R}j\bar{R}j = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} R_{ij}. \quad (6)$$

5.1.4 Etapa 4

Nesta etapa é determinado o desvio das preferências conforme a Eq. (7).

$$\phi_j = 1 - PV_J \quad (7)$$

5.1.5 Etapa 5

Nesta etapa é determinado o valor da preferência global conforme a Eq. (8), onde a soma da preferência total para todos os atributos deve ser igual a 1:

$$\psi_j = \frac{\phi_j}{\sum_{j=1}^{M} \phi_j} \quad \text{onde } \sum j\, \psi_j = 1 \quad (8)$$

5.1.6 Etapa 6

Nesta etapa é determinado o Índice de Seleção de Preferência - PSI (I_i) para cada alternativa utilizando a Eq. (9):

$$I_i = \sum_{j=1}^{M} (R_{ij} \times \psi_j) \quad (9)$$

5.1.7 Etapa 7

Nesta etapa é elaborada a matriz de decisão similar à Etapa 1 anteriormente descrita e utilizando os pesos calculados mediante o método PSI, Eq. (5).

5.1.8 Etapa 8

Nesta etapa é realizada a normalização da matriz das alternativas nos critérios, conforme Eq. (10) para o cálculo da média, Eq. (11) para o cálculo do desvio padrão e Eq. (12) para normalização.

$$\mu_j = \frac{\sum_{i=1}^{n} d_{ij}}{n} \quad (10)$$

$$\sigma_j = \sqrt{\left(\frac{\sum_{i=1}^{n} (d_{ij} - u_j)^2}{n}\right)} \quad (11)$$

$$p_{ij} = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_j}} \int_{-\infty}^{d_{ij}} exp\left[-\frac{(x-\mu_j)^2}{2\sigma_j^2}\right] dx \quad (12)$$

5.1.9 Etapa 9

Nesta etapa é realizada é realizado o processo de agregação dos graus de importância, através do cálculo da cardinalidade para cada alternativa, seguindo a Eq. (13).

$$v_{i1} = \sum_{j=1}^{m} w_j p_{ij} \quad (13)$$

5.1.10 Etapa 10

Nesta etapa é efetuada a estruturação e ordenação das alternativas, normalizando seus desempenhos, conforme a Eq. (14).

$$v_i = \frac{v_i}{\sum_{i=1}^{n} v_i} \quad (14)$$

5.2.1 Etapa 1

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193908
https://proceedings.science/p/193908?lang=en

Tabela 4 – Matriz de Decisão

Tipo	MAX	MIN	MAX	MAX	MAX
Alternativas/critérios	Eficiência na Geração de Energia	Impacto Ambiental	Viabilidade Econômica	Maturidade Tecnológica e Escalabilidade	Aceitação Social e Impacto na Comunidade
Energia Solar	0,2	2,0	5,0	5,0	5,0
Energia Eólica	0,5	3,0	4,0	4,0	3,0
Energia Hidroelétrica	0,9	4,0	2,0	5,0	3,0
Biomassa Energética	0,4	3,0	3,0	3,0	2,0
Gás Natural	0,6	4,0	4,0	5,0	3,0

Fonte: Autores (2024)

5.2.2 Etapa 2

Tabela 5 – Matriz de Decisão Normalizada

Alternativas/critérios	Eficiência na Geração de Energia	Impacto Ambiental	Viabilidade Econômica	Maturidade Tecnológica e Escalabilidade	Aceitação Social e Impacto na Comunidade
Energia Solar	0,24444	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
Energia Eólica	0,55556	0,66667	0,80000	0,80000	0,60000
Energia Hidroelétrica	1,00000	0,50000	0,40000	1,00000	0,60000
Biomassa Energética	0,44444	0,66667	0,60000	0,60000	0,40000
Gás Natural	0,66667	0,50000	0,80000	1,00000	0,60000

Fonte: Autores (2024)

5.2.3 Etapa 3

Tabela 6 – Cálculo da Variação de Preferência PV_j e dos pesos

	Eficiência na Geração de Energia	Impacto Ambiental	Viabilidade Econômica	Maturidade Tecnológica e Escalabilidade	Aceitação Social e Impacto na Comunidade
Média	0,58222	0,66667	0,72000	0,88000	0,64000
PV	0,31546	0,16667	0,20800	0,12800	0,19200
W	0,31230	0,16500	0,20592	0,12672	0,19008

Fonte: Autores (2024)

5.2.4 Etapa 7

Tabela 7 – Matriz de Decisão ProPPAGA com pesos PSI

	MAX	MIN	MAX	MAX	MAX
Peso %	31,23%	16,50%	20,59%	12,67%	19,01%
Alternativas/critérios	Eficiência na Geração de Energia	Impacto Ambiental	Viabilidade Econômica	Maturidade Tecnológica e Escalabilidade	Aceitação Social e Impacto na Comunidade
Energia Solar	0,22	2	5	5	5
Energia Eólica	0,50	3	4	4	3
Energia Hidroelétrica	0,90	4	2	5	3
Biomassa Energética	0,40	3	3	3	2
Gás Natural	0,60	4	4	5	3

Fonte: Autores (2024)

5.2.5 Etapa 6, 8, 9 e 10

Tabela 8 – Matriz estruturada comparando resultado PSI ProPPAGA com PSI

Alternativas/critérios	Eficiência na Geração de Energia	Impacto Ambiental	Viabilidade Econômica	Maturidade Tecnológica e Escalabilidade	Aceitação Social e Impacto na Comunidade	Peso Final	Ranking (PSI - ProPPAGA)	Ranking PSI
Energia Solar	**0,089**	**0,946**	**0,915**	**0,773**	**0,967**	**0,654**	**1**	**1**
Energia Eólica	0,458	0,605	0,653	0,309	0,419	0,496	4	4
Energia Hidroelétrica	0,952	0,143	0,058	0,773	0,419	0,510	3	3
Biomassa Energética	0,292	0,605	0,278	0,040	0,110	0,274	5	5
Gás Natural	0,632	0,143	0,653	0,773	0,419	0,533	2	2

Fonte: Autores (2024)

6. Discussão dos resultados

O método híbrido PSI PrOPPAGA foi utilizado com o objetivo de avaliar e priorizar as alternativas de energia renovável utilizando-se de uma abordagem sistemática, considerando diversos fatores, requisitos e critérios obtidos por intermédio da análise do VFT e submetidos à

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193908
https://proceedings.science/p/193908?lang=en

especialistas através de um questionário anônimo. O critério Eficiência na Geração de Energia obteve peso 31%, seguido do critério Viabilidade Econômica com 21% e Aceitação Social e Impacto na Comunidade com 19%, o que demonstrou a importância destes critérios na opção por uma das fontes de energia renovável.

Energia Solar, segundo a análise e as opiniões coletadas com especialistas, foi avaliada como 1ª opção, seguida por Gás Natural e por Energia Hidroelétrica. Ao utilizarmos as demais etapas do método PSI o ranking foi corroborado, o que confirmou o resultado via método híbrido.

7. Considerações finais

O objetivo do nosso artigo foi classificar as melhores fontes de energia renovável para o Brasil usando o método híbrido de tomada de decisão multicritério PSI PrOPPAGA. Consideramos uma variedade de fatores, como eficiência na geração de energia, impacto ambiental, viabilidade econômica, maturidade tecnológica, escalabilidade, aceitação social e impacto na comunidade, validados por meio de questionários anônimos com especialistas.

A abordagem demonstrou eficácia e resiliência ao lidar com os desafios e complexidade do tema. Além de alcançar os objetivos propostos, ajudou a reduzir a subjetividade na escolha, fornecendo uma estrutura sólida para embasar a tomada de decisões governamentais, utilizando-se de recursos matemáticos e estatísticos que reduziram a subjetividade.

Recomendamos futuras pesquisas para explorar a inclusão de critérios alternativos, remover critérios atuais e comparar os resultados com outros métodos. Isso poderia aumentar ainda mais a confiabilidade na seleção de fontes de energia renovável e fornecendo uma base sólida para comparações entre os resultados obtidos pelo método híbrido PSI PrOPPAGA.

Referências

Ali, T., Ma, H., & Nahian, A. J. (2019). An analysis of the renewable energy technology selection in the southern region of Bangladesh using a hybrid multi-criteria decision making (MCDM) method. *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, ***9*** **(4)**, 1838-1848.

Bandira, P. N. A., Tan, M. L., Teh, S. Y., Samat, N., Shaharudin, S. M., Mahamud, M. A., ... & Samsudin, M. S. (2022). Optimal solar farm site selection in the george town conurbation using GIS-based multi-criteria decision making (MCDM) and NASA POWER data. *Atmosphere*, ***13*** **(12)**, 2105.

EIA (2021). Renewable energy explained. U.S. Energy Information Administration. Web page: https://www.eia.gov/energyexplained/renewable-sources/. Acessado em: 2024-01-02.

Empresa de Pesquisa Energética (EPE). (2024). Boletim Energetico Nacional Interativo. Web page: https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-interativo. Acessado em: 2024-01-02.

Gao, J., Wang, Y., Huang, N., Wei, L., & Zhang, Z. (2022). Optimal site selection study of wind-photovoltaic-shared energy storage power stations based on GIS and multi-criteria decision making: A two-stage framework. *Renewable Energy*, **201**, 1139-1162.

Grafakos, S., Flamos, A., & Enseñado, E. M. (2020). Enhancing the Resilience of Electricity Systems through the Renewable Energy and Energy Efficiency Nexus. *Energies*, **13 (6)**, 1508.

Gribiss, H., Aghelinejad, M. M., & Yalaoui, F. (2023). Configuration selection for renewable energy community using MCDM methods. *Energies*, ***16*** **(6)**, 2632.

Günen, M. A. (2021). Determination of the suitable sites for constructing solar photovoltaic (PV) power plants in Kayseri, Turkey using GIS-based ranking and AHP methods. *Environmental Science and Pollution Research*, ***28*** **(40)**, 57232-57247.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193908
https://proceedings.science/p/193908?lang=en

IPCC (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. Web page: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/. Acessado em: 2024-01-02.

Kadric, D., Blazevic, R., Bajric, H., & Kadric, E. (2024). Evaluation of Energy Renovation Measures for Hospital Buildings using the PSI Method. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, ***14*** **(1)**, 12753-12758.

Kaur, G., Majumder, A., & Yadav, R. (2022). An efficient generalized fuzzy TOPSIS algorithm for the selection of the hybrid energy resources: A comparative study between single and hybrid energy plant installation in Turkey. *RAIRO-Operations Research*, ***56*** **(3)**, 1877-1899.

Likert, R. (1932). A technique for the measurement of attitudes. *Archives of psychology*.

Maniya, K., & Bhatt, M. G. (2010). A selection of material using a novel type decision-making method: Preference selection index method. *Materials & Design*, ***31*** **(4)**, 1785-1789.

Melek, A. B., Gökmener, S., Haspolat, E., Çiçek, D. D., Deveci, M., Oğuz, E., & Khorasanchi, M. (2024). Fuzzy Einstein-based decision-making model for the evaluation of site selection criteria of floating photovoltaic system. *Ocean Engineering*, **301**, 117521.

Mosetlhe, T., Babatunde, O., Yusuff, A., Ayodele, T., & Ogunjuyigbe, A. (2023). A MCDM approach for selection of microgrid configuration for rural water pumping system. *Energy Reports*, **9**, 922-929.

Nguyen, V. T., Hai, N. H., & Lan, N. T. K. (2022). Spherical fuzzy multicriteria decision-making model for wind turbine supplier selection in a renewable energy project. *Energies*, ***15*** **(3)**, 713.

Portella, A. G., Da Silva, M. P. R. L., Dos Santos, M., & Gomes, C. F. S. (2024, January). A New Multi-Criteria Approach to the Identification of the Best Companies to Work for, using the PSISPOTIS Hybrid Method. In *2024 5th International Conference on Mobile Computing and Sustainable Informatics (ICMCSI)* (pp. 249-256). IEEE.

Santos, F. B. D., Santos, M. (2021). Prioridade observada a partir da presunção de atitude gaussiana das alternativas (PrOPPAGA): proposta axiomática e desenvolvimento de uma plataforma computacional para um novo método multicritério de apoio à tomada de decisão. Revista SIMEP, v. 1, n. 1.

Suman, Sonia, Jasrotia, R., & Singh, S. P. (2023). A MCDM-based framework for selection of photovoltaic cell technology using novel information measure under Pythagorean fuzzy environment. *International Journal of Information Technology*, ***15*** **(8)**, 4233-4242.

Thanh, N. V., & Lan, N. T. K. (2022). Solar energy deployment for the sustainable future of Vietnam: Hybrid SWOC-FAHP-WASPAS analysis. *Energies*, ***15*** **(8)**, 2798.

Wang, C. N., Hsueh, M. H., & Lin, D. F. (2019). Hydrogen power plant site selection under fuzzy multicriteria decision-making (FMCDM) environment conditions. *Symmetry*, *11*(4), 596.

Zhang, Y., Zhu, X., & Wang, P. (2015). Impacts of climate change on hydropower in China: A review. Renewable and Sustainable Energy *Reviews*, **44**, 35-42.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193908
https://proceedings.science/p/193908?lang=en