



Análise multicritério para seleção de alternativas renováveis para geração de energia elétrica em Roraima (Brasil)

Multicriteria decision analysis for selection of alternatives for electricity generation in Roraima (Brasil)

Daniela Tiemi Taira¹  [0000-0002-0881-3925](https://orcid.org/0000-0002-0881-3925)

Paola Saturnino Lopes¹  [0000-0002-3976-8039](https://orcid.org/0000-0002-3976-8039)

Nathan de Castro Costa Pinto¹  [0000-0001-6092-4748](https://orcid.org/0000-0001-6092-4748)

Amarilis Lucia Casteli Figueiredo Gallardo²  [0000-0002-5169-997X](https://orcid.org/0000-0002-5169-997X)

Resumo

Mesmo com um robusto sistema nacional de geração e distribuição de energia como o Sistema Integrado Nacional, o acesso à energia elétrica não é uma realidade para todas as famílias do Brasil. Para suprir essa demanda imediata, os sistemas isolados exercem um papel fundamental no abastecimento dessas regiões remotas. Muitos desses sistemas implantados no Brasil causam um impacto ambiental significativo pois não utilizam fontes renováveis para a geração de energia, sendo constituídos majoritariamente por usinas termelétricas a óleo diesel. O presente trabalho propõe a aplicação de Análise de Decisão Multicritério para a priorização de diferentes fontes renováveis para geração de energia elétrica no município de Uiramutã, em Roraima. Foram analisados parâmetros que possuem influência na aplicação da Análise Multicritério, buscando-se analisar os benefícios e limitações na aplicação do método. A energia solar fotovoltaica mostrou-se como a mais promissora alternativa para a região selecionada. Não obstante limitações, reafirma-se nesse estudo o potencial das ferramentas de análise multicritério para a tomada de decisão no planejamento de energia pautado em ampla análise de alternativas para que seja selecionada a mais sustentável.

Palavras-chave: Análise Multicriterial. Setor elétrico. Sistemas Isolados. Tomada de decisão.

Abstract

Even with a robust national energy generation and distribution system such as the National Integrated System (SIN), access to electricity is not yet a reality for all families in Brazil. To meet this immediate demand, Isolated Systems play a key role in these remote regions. However, for the most part, the

¹ Universidade de São Paulo, Escola Politécnica. Av. Prof. Almeida Prado, 83, Butantã, 05508-070. São Paulo, SP, Brasil. Correspondência para/Correspondence to: D. T. Taira. E-mail: daniela.taira@alumni.usp.br

² Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental; Universidade Nove de Julho, Programa de Pós-Graduação em Cidades Inteligentes e Sustentáveis. São Paulo, SP, Brasil.

Isolated Systems implemented in Brazil cause a significant environmental impact as they do not use renewable sources for energy generation, being constituted mostly by thermoelectric plants. The present work proposes the application of Multicriteria Decision Analysis for the analysis and prioritization of different renewable sources for energy generation in the municipality of Uiramutã in Roraima, Brazil. Parameters that influence the application of Multicriteria Analysis were analyzed, seeking to evaluate the benefits and limitations in the application of the method. In most cases, photovoltaic solar energy proved to be the best alternative for the selected region. However, it is observed that the method may be subject to a certain degree of subjectivity depending on the decision makers, the refinement of data collection and the choice of preference functions.

Keywords: *Multicriteria Analysis. Electric sector. Isolated Systems. Decision making.*

Introdução

A energia é a base fundamental para toda e qualquer atividade que a humanidade desenvolve, sendo essencial para a sociedade moderna. Dentre os vários desafios que enseja a garantia da segurança energética em um contexto de promoção de sustentabilidade, as energias renováveis vêm sendo discutidas como a promessa da energia limpa (Goldemberg, 2006; Gallardo; Bond, 2011). Ainda que o Brasil também tenha uma dependência grande da energia fóssil, o cenário de oferta de energia nacional tem uma diversificação e participação de fontes renováveis muito maior devido à abundância desses recursos renováveis (Vieira *et al.*, 2021). Da Silva *et al.* (2016) discutem que a geração diversificada de energia elétrica no país é uma estratégia para melhorar a segurança no fornecimento de eletricidade nacional. De acordo com a Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua (PNAD Contínua 2019), cerca de 99,8 % da população brasileira tem acesso à energia elétrica em seus domicílios (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2019). No entanto, dada a heterogeneidade em termos sociais, econômicos e de desenvolvimento regional do país, algumas regiões possuem disponibilidade energética abaixo da a média nacional.

De acordo com o WWF Brasil (2020), existem cerca de 237 regiões isoladas energeticamente, a maior parte localizada no norte do país nos estados de Roraima, Rondônia, Acre, Amazonas, Amapá e Pará. O consumo elétrico nessas regiões é baixo, representando menos de 1% da carga total de eletricidade do país e essa demanda é atendida, principalmente, por usinas termelétricas locais e por óleo diesel (WWF Brasil, 2020).

Nesse contexto, Roraima merece destaque visto que é o único estado brasileiro que não está conectado ao Sistema Integrado Nacional (SIN) e até o início de 2019 dependia do fornecimento de energia elétrica da Venezuela, através do Linhão de Guri. Para enfrentar essa limitação na região de Uiramutã (RR), o governo brasileiro propôs o projeto de construção do Linhão de Tucuruí, entre Manaus e Boa Vista, que afetará a Terra Indígena Waimiri-Atroari, o que suscitou diversas polêmicas e um significativo atraso das obras, até hoje não iniciadas (Schmidt, 2021). Segundo Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA) (2020), Roraima apresenta áreas que não possuem atendimento de energia elétrica, abrangendo principalmente comunidades indígenas e Unidades de Conservação.

Mesmo lugares com abastecimento elétrico, a qualidade do serviço é insuficiente, 53 sistemas isolados do estado não apresentam fornecimento contínuo com atendimento variando de 5h a 20h por dia (Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2020). Desse modo, estabelece-se Roraima como um estudo de caso apropriado para a discussão da oferta de fontes alternativas para suprimento de energia elétrica com cobertura e qualidade de atendimento adequados, como esperado para a garantia de segurança energética nacional.

As decisões do planejamento energético são normalmente complexas e envolvem um grande número de variáveis multidisciplinares. Assim, necessita-se para tomada de decisão o suporte de ferramenta robusta que comporte um espectro amplo de critérios que possam ser integrados nesse planejamento, sob diferentes aspectos em um cenário de incertezas. A aplicação da Análise Multicritério (AMC) – (*Multiple Criteria Decision Analysis*, MCDA) –, representa uma ferramenta que abrange métodos e modelos matemáticos que vêm se mostrando eficientes para a resolução de diversos problemas, sendo de grande suporte ao processo de tomada de decisão. De acordo com Kumar *et al.* (2017), no contexto do desenvolvimento sustentável, o planejamento energético está cada vez mais complexo impondo grandes restrições para os tomadores de decisão otimizarem as alternativas de energia especialmente no caso de comunidades rurais e a MCDA vem suportando resultados ótimos em cenários complexos, incluindo vários indicadores, objetivos e critérios conflitantes.

Esse artigo tem como objetivo explorar o uso da Análise de Decisão Multicritério (MCDA) para discutir diferentes alternativas, com ênfase nas variáveis técnicas e socioambientais, para a geração de energia renovável na região do município de Uiramutã, em Roraima. Espera-se que esse trabalho possa contribuir para a agenda de promoção de sustentabilidade no planejamento energético, por meio da discussão dos benefícios e limitações de métodos MCDA nesse contexto.

Materiais e Métodos

Análise Multicritério: seleção e etapas

O método de MCDA é uma ferramenta operacional comumente utilizada para auxiliar o processo de tomada de decisão racional que, muitas vezes, é caracterizado por diversas variáveis, problemas complexos com alta incerteza, objetivos conflitantes, diferentes formas de dados e informações, interesses e perspectivas, que se relacionam e interagem entre si de maneira complexa (Wang *et al.*, 2009). De acordo com Diakoulaki *et al.* (2005), as metodologias MCDA têm um papel fundamental no fornecimento de uma combinação harmoniosa de abordagens quantitativas e qualitativas e na criação de plataformas de decisão que permitem a fusão da racionalidade com julgamentos subjetivos e preocupações éticas.

De forma geral, de acordo com Wang *et al.* (2009), pode-se definir que o método de MCDA engloba quatro passos principais:

- 1) Definição e seleção dos critérios que farão parte da análise das variáveis: é uma etapa

subjetiva em que os critérios podem estar agrupados de modo generalizado ou específico, mas deve se evitar a repetibilidade e garantir a relevância dos critérios selecionados;

2) definição dos pesos de cada critério: é essencial para determinar a relação e o impacto de cada critério no processo de tomada de decisão, considerando-se o grau de variância e a independência dos critérios e a preferência subjetiva dos tomadores de decisão;

3) escolha do tipo de método de análise multicritério: escolheu-se o método “*Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation*” (Promethee), que é um método recente desenvolvido por Brans (1982) que compara as alternativas par a par e explora os pontos fracos e pontos fortes de prevalência e dominância entre cada par de alternativas. É um aplicado para um número finito de alternativas que necessitam ser classificadas e escolhidas entre um conjunto de critérios que, muitas vezes, são conflitantes. É um método relativamente simples em sua concepção quando comparado com os outros métodos, com isso, sua utilização e aplicação pelos tomadores de decisão vem aumentando significativamente (Behzadian *et al.*, 2010). Ademais o método Promethee vem se demonstrando apropriado para avaliar alternativas de oferta de energia (Seddiki; Bennadii, 2019);

4) a escolha da melhor alternativa: o último passo em que o tomador de decisão seleciona a melhor alternativa com base na ordem de classificação resultante do método MCDA aplicado. No entanto, a credibilidade do processo de tomada de decisão deve ser verificada e, portanto, os resultados obtidos podem ser agregados novamente e o melhor esquema de alternativas é selecionado. Para a aplicação do método Promethee, segundo José *et al.* (2011), nessa etapa tem-se o cálculo do índice de preferência que mede a intensidade que determinada alternativa é preferida em relação a outra, na comparação entre os pares de alternativas. Este índice utiliza como base o resultado das funções de preferências e leva em consideração cada um dos critérios e seus respectivos pesos. Segue-se o cálculo dos fluxos positivos (quanto uma alternativa é dominante em relação às demais), negativos (quanto uma alternativa é superada pela demais) e líquidos para cada par de alternativas (José *et al.*, 2011). Esse método também foi escolhido pois permite utilizar softwares que fornecem os resultados graficamente, tendo sido selecionado o *Software Visual Promethee*, que possibilita também a análise “*Graphical Analysis for Interactive Assistance*” (GAIA) que provê informações gráficas de problemas com critérios conflitantes e mostra o impacto de cada peso nas diferentes alternativas.

Área de Estudo e suas alternativas de energia

Roraima é o único estado em que a sua capital, Boa Vista, não está conectada ao SIN. Todo o sistema elétrico estadual é abastecido por sistemas isolados e até março de 2019, o sistema era complementado por importação de energia da Venezuela (Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2019). O Plano Anual da Operação Energética dos Sistemas Isolados para 2021 - PEN SISOL 2021, publicado pela ONS, menciona que Roraima é composta por 65 sistemas isolados (Figura 1) com uma carga de 157,79 MWmed.

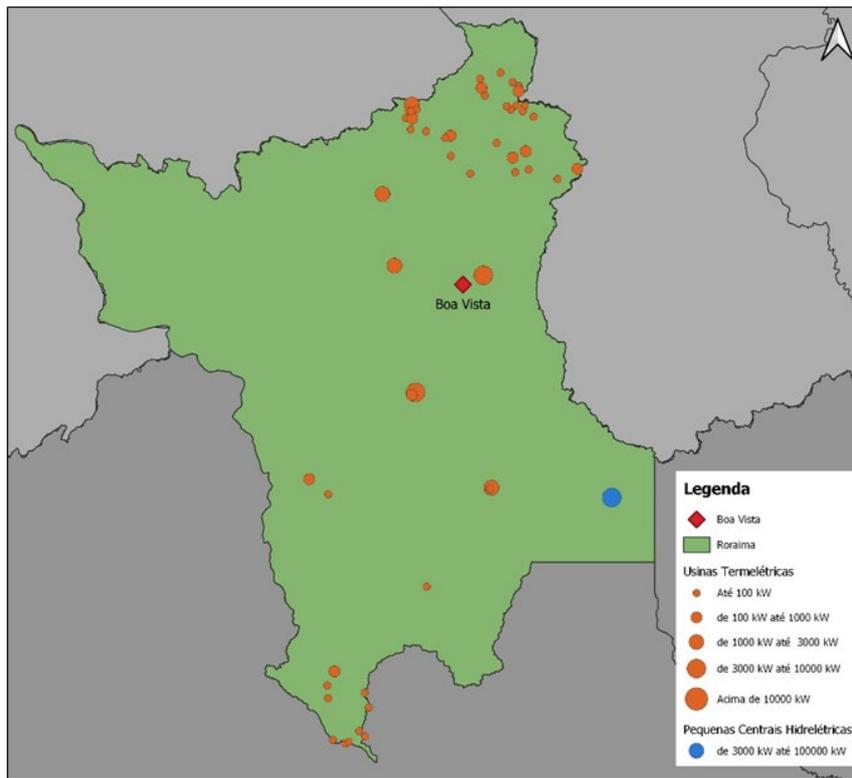


Figura 1 – Sistemas Isolados de Roraima considerados no PEN SISOL 2021.

Fonte: Elaborado pelos autores (2022), com base em Agência Nacional de Energia Elétrica (2021).

Para análise do potencial energético solar fotovoltaico, foi analisado o total diário de irradiação global horizontal em todo o estado de Roraima, podendo-se verificar que o estado possui uma média anual de *Global Horizontal Irradiation* (GHI) entre 4250 a 5500 Wh/m²d, sendo que grande parte do território apresenta valores acima de 4750 Wh/m²d. A porção nordeste de Roraima é a que apresenta maiores valores de GHI, mas todo o estado apresenta altos valores de irradiação, inclusive maiores que a máxima irradiação global horizontal anual da Alemanha, país que possui 56 GW de capacidade instalada em usinas fotovoltaicas (Fraunhofer Ise, 2021). Diante disso, numa análise preliminar, Roraima possui um bom recurso solar, possível de ser utilizado para a geração de energia elétrica.

A energia eólica no Brasil vem ganhando maior mercado, principalmente para geração centralizada, e as usinas eólicas estão concentradas na região Nordeste e sul do Brasil pelo seu maior potencial eólico que apresentam velocidades do vento superiores de 10m/s (Agência Nacional de Energia Elétrica, 2021). Porém, considerando-se os sistemas isolados de Roraima, buscou-se uma análise do potencial eólico apto para sistemas menores, ou seja, com turbinas de pequena escala e que se adaptam a uma velocidade de vento menor. Diante disso, foi observado que essas turbinas possuem uma velocidade mínima para funcionamento entre 3,5 e 4,5m/s (Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito, 2021) e uma altura de cubo em torno de 30m. Com base nisso, foi analisado a velocidade média do vento a uma altura de 50m. Ao norte da capital Boa Vista, os ventos apesar de menos intensos ainda apresentam uma velocidade média de 5m/s, ou seja, maior do que o mínimo necessário para o funcionamento de uma turbina eólica de

pequena escala. O recurso eólico em Roraima é mais restritivo do que o recurso solar, mas o estado apresenta algumas porções em que o vento se mostrou ser um recurso capaz de gerar energia para a comunidade local.

Um estudo da EPE (Empresa de Pesquisa Energética, 2017) analisa as alternativas para abastecimento de Roraima, considerando diversas fontes energéticas e quanto à biomassa: palma, acácia (resíduos de madeira) e o arroz. Segundo esse estudo, em 2010 uma usina termelétrica a biomassa, mais especificamente, de cavaco de madeira com capacidade de 9,8 MW ganhou o leilão de energia. Tal usina estava planejada para construção no município de São João da Baliza, no sudeste de Roraima. Porém, decorrente o pedido do empreendedor para prorrogação do suprimento energético, a então distribuidora na época solicitou o fim do contrato. Apesar da não construção, o planejamento da usina indica a possibilidade de geração de energia elétrica por cavaco de madeira naquela região. Além disso, de acordo com o Plano de Manejo Florestal do Projeto Ouro Verde, em 2007, foram plantados 80866 ha em quatro municípios de Roraima próximos à capital Boa Vista (Herzog, 2007). O plantio estabelecido representa vantagem para redução do tempo de implantação do empreendimento. A biomassa de arroz também é analisada considerando que o estado tem grande capacidade de produção de arroz irrigado, principalmente nas regiões ao norte de Roraima, mais especificamente nas várzeas dos rios como apontado por Sakazaki *et al.* (2008). A Embrapa (2019) realizou um estudo sobre o uso de gramíneas forrageiras, como o capim-elefante, para geração de energia em Roraima e constatou que tal cultivo se adapta a áreas em que a produção de alimentos é pouco viável, como ocorre em partes do cerrado de Roraima, localizado no nordeste do estado. Quanto ao óleo de palma, também conhecido como óleo de dendê, Roraima apresenta algumas áreas aptas para seu cultivo no sul do estado. Roraima apresenta também uma produção de cana-de-açúcar conforme dados obtidos pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2021), equivalente a 2.290 toneladas no ano de 2020. Atualmente, Roraima não possui usinas termelétrica a base de biomassa em operação.

Em termos de energia hidráulica, Roraima possui uma pequena central hidrelétrica (PCH) em operação. com 10 MW de potência, a PCH Alto Jatapu localizada em São João da Baliza. A EPE iniciou em 2007 o Estudo de Inventário Hidrelétrico do Rio Branco, onde foram analisadas diversas alternativas para melhor potencial hidrelétrico na região, indicando quatro aproveitamentos que totalizam 1049 MW (Empresa de Pesquisa Energética, 2011, 2020). Diante da PCH Alto Jatapu em operação e do planejamento da UHE Bem Querem, em fase de elaboração de estudos de impacto ambiental (EIA) é possível indicar que Roraima apresenta um potencial do recurso hídrico para geração de energia elétrica. Contudo, é necessário ressaltar que grande extensão do estado é composta por Unidades de Conservação de Proteção Integral e terras indígenas. Desta forma, a implantação de usinas hidrelétricas, fica mais restrita a determinadas áreas.

Selecionou-se a região nordeste do estado de Roraima, mais especificamente o município de Uiramutã, que apresenta três localidades com previsão de déficit a partir do ano de 2023, a Comunidade Indígena Santa Creuza, Comunidade Indígena Enseada e Comunidades Indígena de

Pedra Branca, pelo foco de sistemas isolados sem abastecimento integral de energia elétrica, além da área apresentar um bom potencial energético para diversas fontes renováveis solar, eólica, biomassa e a possibilidade de sistemas híbridos entre essas. Porém, notando-se que o potencial eólico é o mais restritivo em termos de áreas aptas, restringiu-se a área de estudo foi mais restringida para regiões com ventos superiores a 4,5 m/s a uma altura de 50 m do solo, retirando a área delimitada do Parque Nacional do Monte Roraima, configurando a área de estudo como mostrado na Figura 2.

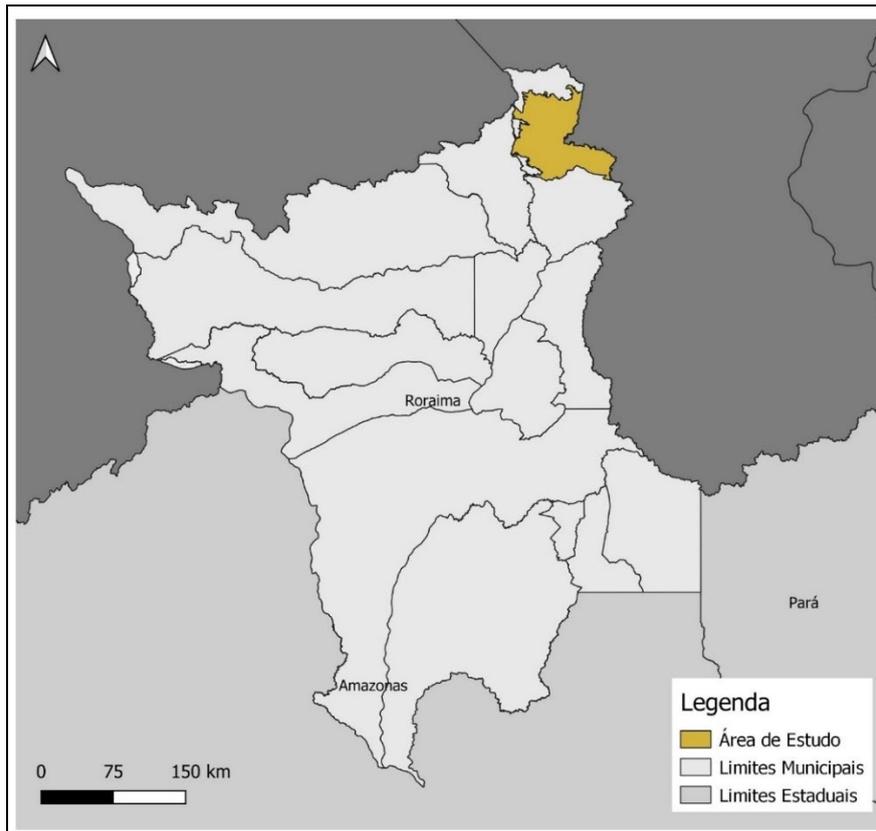


Figura 2 – Área de estudo.

Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

Resultados e Discussão

Foram analisadas 5 alternativas para o abastecimento das comunidades localizadas na área do estudo: solar fotovoltaica (A1), eólica (A2), biomassa a partir do bagaço da cana (A3), sistema híbrido de solar fotovoltaico e eólica (A4) e sistema híbrido de solar fotovoltaico e biomassa (A5).

Considerando que o sistema de energia elétrica não estará ligado à rede, deve-se prever o uso de um sistema de baterias. O dimensionamento dessas baterias depende da intermitência horária e diária do recurso, além das características técnicas da própria bateria. Diante disso, busca-se definir os critérios considerando essa característica, porém notaram-se dificuldades referentes a esse levantamento de dados que, quando pertinentes, são apontadas na definição dos critérios considerados.

Para definir a capacidade instalada necessária para cada alternativa, foram considerados dois parâmetros, a demanda de energia e o fator de capacidade de cada fonte energética. A demanda de energia tomou-se como base a carga prevista em 2025 para localidades dentro do município de Uiramutã e foi projetada para 2055, considerando 30 anos de operação da usina e a taxa de crescimento médio no consumo de energia elétrica do estado de Roraima entre 2004 e 2020. Desse modo, foi considerada uma demanda de 9500 MWh. O fator de capacidade foi obtido com base no histórico de usinas já em operação e para sistemas híbridos foram considerados a proporção de 3:2 sendo a maior proporção para a fonte solar. Os resultados de capacidade instalada são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Características das alternativas.

Alternativa	Fator de Capacidade (%)	Capacidade instalada necessária (MW)
A1: Solar fotovoltaica	22 ¹	4,85
A2: Eólica	45 ¹	2,40
A3: Biomassa (bagaço da cana)	27 ²	4,02
A4: Solar e Eólica	32	3,44
A5: Solar e Biomassa	24	4,48

Notas: (1) A partir dos dados de fator de capacidades médios publicados nos "Boletins de Operação - ONS" entre agosto de 2020 e agosto de 2021 (Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2021a, 2021b). (2) Com base no Balanço Energético Nacional 2021 (ano base 2020) (EPE, 2021b).

Fonte: Elaborada pelos autores (2022), com base em Operador Nacional do Sistema Elétrico (2021a, 2021b) e Empresa de Pesquisa Energética (2021b).

Definição dos critérios

A análise das alternativas utilizou seis critérios como base, sendo três deles de teor técnico ou econômico (segurança energética, vida útil da tecnologia e LCOE – Levelized Cost of Energy) e outros três socioambientais (poluição sonora, poluição atmosférica e impacto sobre o uso do solo). A segurança energética foi definida como um critério qualitativo podendo ser baixa, média ou alta. Para a definição da nota atribuída a cada alternativa foi adotada a relação Fator de Capacidade x Energia Gerada que se relaciona diretamente com a disponibilidade e variabilidade no fornecimento de energia. Os fatores de capacidade foram obtidos pelos “Boletins de Operação – ONS” (Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2021a, 2021b) referente ao período de agosto de 2020 a agosto de 2021 e pela energia eólica apresentar uma maior variabilidade ao longo do ano, ela foi classificada como baixa em termos de segurança energética. Em seguida, a energia solar fotovoltaica é classificada como média, uma vez que ao longo do ano não demonstrou grandes variações como a eólica, mas ainda assim é dependente de fatores externos como a luz do dia, nebulosidade, entre outros. Por último, a biomassa garante maior segurança energética considerando que a usina pode ser acionada em qualquer momento do dia dependendo apenas do fornecimento de combustível. Para o critério de segurança energética que foi considerado qualitativo, determinou-se a nota atribuída a cada categoria do critério e a partir disso, foi definida uma função de preferência “em

níveis” que melhor se adapta a estes tipos de critérios.

A vida útil do projeto indica o tempo médio estimado para a duração de determinada tecnologia. Para este critério foram tomados como base os dados publicados pelo *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) (National Renewable Energy Laboratory, 2021) e nos casos em que é apontado um intervalo de tempo, como no caso de solar fotovoltaica e da biomassa, utilizou-se a média do intervalo. Nos sistemas híbridos, considerou-se o pior cenário, ou seja, a tecnologia com a vida útil menor. Diante disso, foram adotados os seguintes valores para cada alternativa: solar fotovoltaica (30), eólica (20), biomassa (25), solar-eólica (20) e solar-biomassa (25). A definição da função de preferência para o critério de vida útil seguiu o padrão linear, em que o limiar de indiferença é de 5 anos ($q = 5$ anos) e o limiar de preferência de 10 anos ($p = 10$ anos).

Para comparar os custos de cada alternativa de fonte de geração, procurou-se um indicador que representasse o custo considerando a energia produzida pela fonte ao longo de sua vida útil. Considerou-se como critério então o *Levelized Cost of Energy* (LCOE) que indica o custo em R\$/MWh. Esses valores foram obtidos pela Empresa de Pesquisa Energética (2021c) e podem ser visualizados na Tabela 2. Com acesso aos dados quantitativos acima para cada fonte de geração, foi selecionada a função gaussiana como função de preferência com $\sigma = 40$ R\$/MWh.

Quanto os critérios socioambientais, a poluição sonora foi considerada qualitativamente em quatro categorias de intensidade, com base no nível do impacto sonoro: Impacto não significativo, Impacto dentro das localidades da planta, Impacto sentido dentro da localidade e nas proximidades da planta, Impacto regional afetando núcleos urbanos. A função de preferência escolhida para o critério foi a função em níveis com $q = 0,32$ e $p = 0,65$, sendo menor a nota, melhor a alternativa.

O critério de poluição atmosférica considerou a emissão de gás carbônico ao longo de todo seu ciclo de vida obtida por Conde (2013) e são apresentados na Tabela 2. A função de preferência selecionada foi a gaussiana considerando como o σ , a média entre o menor e o maior valor observados nas médias de tCO₂/MWh de cada alternativa ($\sigma=0,017$), sendo o menor valor o da eólica (0,012 tCO₂/MWh) e o maior valor o da solar fotovoltaica (0,046 tCO₂/MWh). Também para este critério, quanto menor a nota, melhor a alternativa.

Por último, para quantificar o impacto sobre o uso do solo foi utilizado o a área transformada, que indica a área que passou de um estado de referência para outro, segundo Fthenakis e Kim (2009). Para a definição da área transformada para cada alternativa, utilizou-se os dados provenientes de Conde (2013) que tomou como base os indicadores de área transformada de Fthenakis e Kim (2009). Para os casos de sistemas híbridos, tomou-se a média ponderada considerando 3:2 com a maior proporção em solar, ou seja, 3 solar fotovoltaica e 2 eólica para a alternativa A4 ou 3 solar fotovoltaica e 2 biomassa para a alternativa A5. Os valores considerados de área transformada para cada alternativa foram obtidos a partir da multiplicação do indicador pela capacidade instalada e são apontados na Tabela 2. Ressalta-se ainda que no caso da biomassa, foi considerada somente a área da usina, sem considerar a plantação já que em muitos casos, é utilizado o resíduo da cana-de-açúcar. Já no caso da eólica, é importante ressaltar que as áreas entre turbinas

podem ser utilizadas para outros usos como pastagem e agricultura, de modo que o valor obtido se encontra superestimado. No caso da área transformada, a função de preferência foi definida como uma função gaussiana em que $\sigma=0,2009$, tal número foi obtido a partir da metade da diferença entre o maior (0,4320km²) e o menor valor (0,0301km²) encontrado.

Tabela 2 - Nota das alternativas para cada critério.

Alternativa	Segurança energética	Vida útil da tecnologia (anos)	LCOE (R\$/MWh)	Poluição sonora	Poluição atmosférica (tCo ² /MWh)	Área transformada (km ²)
A1: Solar Fotovoltaica	Média	30	171,92	Não significativa	46	0,1455
A2: Eólica	Baixa	20	145,11	Local e nas proximidades da planta	12	0,432
A3: Biomassa (bagaço da cana)	Alta	25	280,75	Dentro das localidades da planta	18	0,0301
A4: Solar e Eólica	Alta	20	161,2	Local e nas proximidades da planta	32	0,3097
A5: Solar e Biomassa	Alta	25	215,45	Dentro das localidades da planta	35	0,0958

Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

Cenários e seus resultados

Muitos trabalhos consultados levantam a questão da subjetividade na aplicação de métodos MCDA. Qualquer alteração nas variáveis de input como critérios considerados, pesos atribuídos, nível de detalhamento dos dados para cada alternativa, função de preferência escolhida *etc.*, pode afetar as notas e, com isso, influenciar os resultados. Neste sentido foram analisados cinco cenários. Os três primeiros cenários consistem na variação do peso dado a cada critério. Esse peso seguiu a escala Likert de 3 pontos, em que para a menor importância atribui-se o peso 1, importância média, peso 2 e a maior importância, o peso 3. No primeiro cenário, os critérios técnicos possuem peso 3 enquanto a poluição atmosférica e o impacto sobre o uso do solo peso 2 e de menor importância a poluição sonora. Este critério teve menor peso considerando que a área de estudo possui baixa concentração populacional, e conseqüentemente dando a possibilidade de o empreendimento ser realizado distante de concentrações urbanas ou comunidades. Em seguida o cenário 2 fornece uma maior importância para critérios técnicos/econômicos com peso 3 e critérios socioambientais com menor importância, peso 1. Em contrapartida, o cenário 3 explora o oposto, isto é, critérios socioambientais com maior importância.

O cenário 4 explora a subjetividade no nível de detalhamento dos dados levantados por meio da variação na área transformada. Para classificação do desempenho de cada alternativa nesse critério, foram utilizados os dados provenientes de Conde (2013) que consideram como

área transformada para a geração eólica toda a área do parque eólico, o que prejudica consideravelmente o desempenho da alternativa neste critério quando comparado às outras alternativas. Essa premissa poderia ser considerada parcial uma vez que o parque eólico ocupa uma grande área, mas transforma e/ou desmata uma parcela muito menor. Descontando-se as áreas em torno da base de cada turbina e as vias de acesso entre elas, a maior parte da área do parque eólico pode ser utilizada para outros fins como agricultura ou até mesmo preservação da mata nativa. Para simular a hipótese de ser considerada como área transformada para a geração eólica apenas a área efetivamente desmatada, foi rodado novamente o programa alterando-se apenas a área transformada dessa alternativa para 20% da área considerada por Conde (2013), o que resultaria em uma área de 0,0878 km², este número foi obtido sendo o valor mediano entre a área transformada da alternativa A3 (Biomassa) e da alternativa A1 (Solar).

Por último, o cenário 5 explora a subjetividade na escolha da função de preferência. Neste trabalho, tomou-se por premissa que quanto mais baixo o custo representado pelo LCOE melhor. A princípio, foi determinada a função gaussiana que atribui as notas de desempenho de cada alternativa através de uma curva contínua. No entanto, considerou-se uma função de preferência “U-shape” que pode ocorrer caso o tomador da decisão possua um orçamento pré-definido para a implantação do empreendimento e o único fator limitante é que o custo não ultrapasse de uma certa porcentagem do valor inicial. A função “U-shape” equivale à uma função binária na qual qualquer valor de LCOE dentro do percentual permitido recebem a nota 0 (preferível) e qualquer valor acima do mesmo recebem nota 1 (menos preferível). A Figura 3 e a Tabela 3 consolidam os cenários estudados.

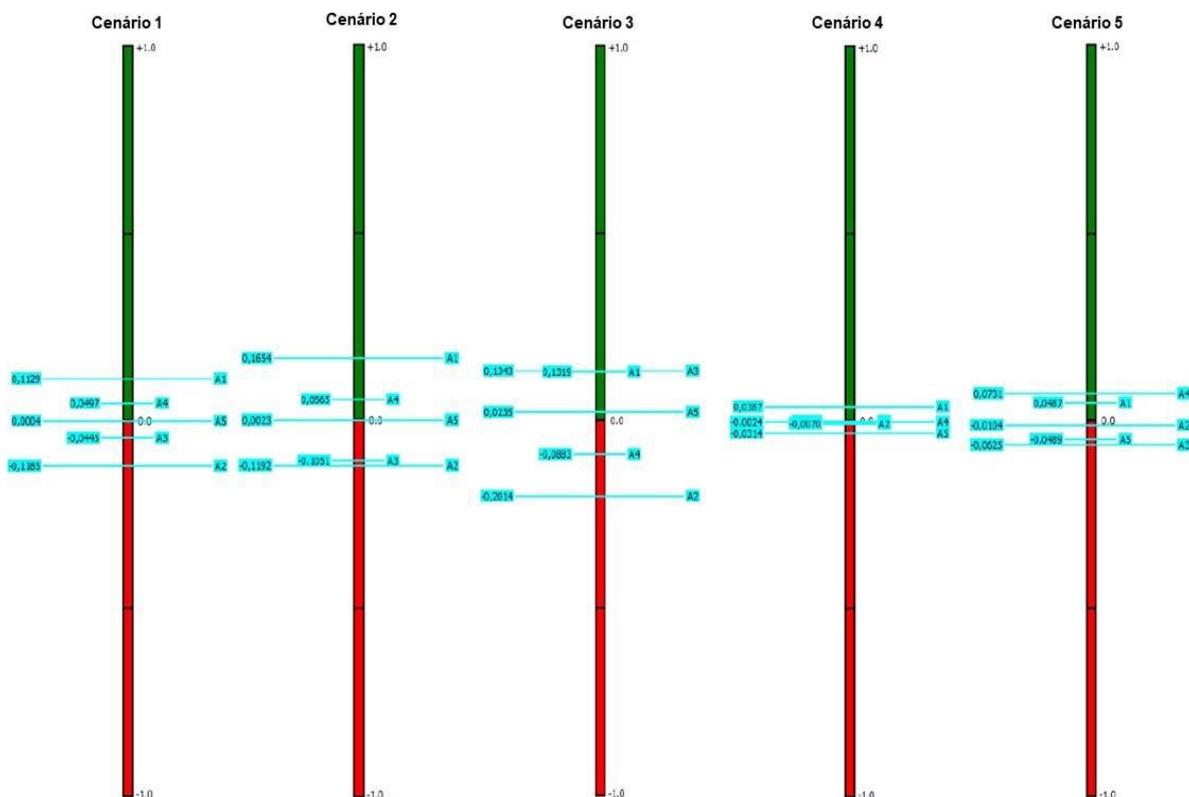


Figura 3 – Resultados dos cenários 1 a 5.
 Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

De acordo com a Tabela 3, apesar da alternativa A1 (Solar) ter sido vencedora na maioria dos casos, é possível notar que o método depende de diversos parâmetros e que isso pode ocasionar uma certa subjetividade. Por exemplo, a definição exata do local do projeto traz um refinamento dos dados referente à área transformada da eólica e conseqüentemente isso pode trazer uma mudança no ranking. No caso analisado, a alteração no dado, resulta na alternativa A2 (Eólica) obtendo uma posição melhor e com menor fluxo negativo. A função de preferência também é outro parâmetro que pode impactar nos resultados, essa consideração de uma diferente restrição no custo do projeto, resulta na alternativa A4 (Solar e Eólica) como melhor alternativa para Uiramutã. Por último, os diferentes pesos dados a um certo critério, impactam de forma significativa nos resultados. No caso em que se prioriza critérios socioambientais, a alternativa A3 (Biomassa) apresentou o melhor desempenho seguida de A1 (Solar), devido principalmente a emissão de gás carbônico relacionado com a fase de manufatura das placas solares. A alternativa A2 continua não apresentando bons resultados decorrente da grande área transformada, uma vez que foi considerado o polígono inteiro do parque eólico e por conta dos ruídos provenientes da operação das turbinas eólicas.

Tabela 3 – Resumo dos resultados para cada cenário.

Ranking	Resultado inicial	Priorização critérios técnicos	Priorização critérios socioambientais	Varição na área transformada (eólica)	Função de preferência
1	Solar	Solar	Biomassa	Solar	Solar e Eólica
2	Solar e Eólica	Solar e Eólica	Solar	Biomassa	Solar
3	Solar e Biomassa	Solar e Biomassa	Solar e Biomassa	Solar e Eólica	Eólica
4	Biomassa	Biomassa	Solar e Eólica	Eólica	Solar e Biomassa
5	Eólica	Eólica	Eólica	Solar e Biomassa	Biomassa

Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

Conclusão

A insegurança energética representa um importante problema social no país, com centenas de regiões isoladas energeticamente, principalmente na região Norte com Roraima sendo o único estado ainda totalmente desconectado do SIN. Ressalta-se a importância da conexão de Roraima ao SIN, de forma a trazer um abastecimento elétrico garantindo maior segurança energética e viabilidade econômica. No entanto, diante das dificuldades para implantação da linha de transmissão, a análise e o uso do recurso energético presente no local tornam-se uma boa alternativa. Desta forma, este trabalho buscou analisar as possibilidades de geração de energia elétrica por meio do recurso solar, eólico e de biomassa. O desenvolvimento deste trabalho considerado o recorte de estudo em Roraima, mais precisamente no município de Uiramutã, possibilitou explorar essa problemática a partir de um levantamento de dados, o que permitiu aplicar o método Promethee de análise multicriterial para a classificação das alternativas disponíveis de oferta de energia para superar esse

entrave nacional.

Com a definição das alternativas, critérios de avaliação, pesos e notas inicialmente definidos, foi construído o modelo Promethee que realizou a classificação das alternativas. A energia solar fotovoltaica foi apontada como melhor alternativa de geração para Uiramutã em praticamente todas as rodadas de aplicação do método, o que indica que, com base nos dados disponíveis e premissas consideradas, a energia solar fotovoltaica é a melhor indicação para o problema de Uiramutã. Vale ressaltar algumas limitações no levantamento de dados, como a falta de dados quantitativos para certos critérios e a não inclusão do custo das baterias, que eventualmente, se considerados dados mais apurados ou diferentes premissas, poderia resultar em diferenças na conclusão da aplicação do método.

No desenvolvimento do trabalho, foi possível confirmar a subjetividade intrínseca à aplicação do método multicriterial, como alertado na literatura sobre o tema. Muitas variáveis relevantes para a aplicação podem apresentar alterações significativas de acordo com os objetivos, interesses ou visão subjetiva dos stakeholders envolvidos na definição das mesmas. As fontes de subjetividade que podem resultar em alterações das notas e, conseqüentemente, do resultado final são diversas: desde a própria seleção dos critérios de avaliação, passando pela atribuição dos pesos dos critérios, nível de precisão no levantamento de dados, etc., até a escolha da função de preferência mais adequada para cada um dos critérios avaliados. Como explorado neste trabalho, um dado agente poderia atribuir maior peso a critérios técnicos-econômicos enquanto um outro agente atribuiria maior peso para critérios socioambientais, resultando em melhores alternativas diferentes, sendo essas A1 (Solar fotovoltaica) e A3 (Biomassa), respectivamente.

Considerando a análise de uma situação mais ampla, em que a tomada de decisão envolve diferentes agentes interessados no resultado da classificação das alternativas, como em um projeto de grande porte de interesse público e privado, é de grande importância a interação e o envolvimento dos diversos stakeholders envolvidos. Com as diferentes alterações feitas nas variáveis de input do modelo, buscou-se refletir como o contexto ou a visão subjetiva de um dado stakeholder pode alterar os resultados do modelo, por isso a importância de envolver todos os agentes interessados. Apesar do aumento significativo na complexidade da orquestração entre esses diferentes agentes, eles podem trazer visões e argumentos complementares que vão culminar na elaboração de um modelo mais personalizado que resultará na melhor alternativa para aquele contexto e grupo específico de stakeholders. O envolvimento de diferentes especialistas, por exemplo, pode tornar um modelo mais fiel à realidade, trazendo maior precisão e refinamento no levantamento de dados, resultando em um modelo mais robusto para a classificação das alternativas.

Desse modo, o método Promethee, assim como outros métodos de análise multicriterial, representam poderosas ferramentas para subsidiar a tomada de decisão de um ou mais agentes envolvidos, agregando tanto mais valor quanto maior o número de critérios e alternativas a serem considerados para a aplicação do método, dado o alto nível de complexidade resultante. Reforça-se, por último, a importância do envolvimento do maior número possível de stakeholders (partes

interessadas) relevantes para a tomada de decisão, para que a classificação final das alternativas seja realizada por meio de um modelo que reflita, da melhor forma possível, todas as diferentes facetas do problema em questão, garantindo uma adequada tomada de decisão para a sociedade.

Colaboração

D. T. Taira colaborou com a análise e discussão dos resultados e escrita do artigo. P. S. Lopes colaborou com o levantamento de dados sobre os métodos de MCDA, definição do método e escrita do artigo. N. C. C. Pinto colaborou com o levantamento e análise dos dados referente ao setor elétrico no Brasil e escrita do artigo. A. L. C. F. Gallardo colaborou com as informações sobre o tema, supervisão da pesquisa e revisão do artigo.

Referências

- Agência Nacional de Energia Elétrica. *Sistema de Informações Georreferenciadas do Setor Elétrico: SIGEL*. [S.l.]: ANEEL, 2021. Disponível em: <https://sigel.aneel.gov.br/portal/home/>. Acesso em: 27 jun. 2021.
- Behzadian, M. *et al.* Promethee: a comprehensive literature review on methodologies and applications. *European Journal of Operational Research*, v. 200, n. 1, p. 198-215, 2010.
- Brans, J.-P. *L'ingénierie de la decision: L'élaboration d'instruments d'aide à la décision*. Quebec: University Laval, 1982.
- Conde, M. R. *Incorporação da dimensão ambiental no planejamento de longo prazo da expansão da geração de energia elétrica por meio de técnicas multicritério de apoio a tomada de decisão*. 2013. 114 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Planejamento Energético) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.
- Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito. *FAQ Eólica*. [S.l.]: CRESESB, 2021. Disponível em: http://cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&catid%5b%5d=1&catid%5b%5d=5. Acesso em: 1 jul. 2021.
- Da Silva, R. C.; De Marchi Neto, I.; Seifert, S. S. Electricity supply security and the future role of renewable energy sources in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 59, p. 328-341, 2016.
- Diakoulaki, D.; Antunes, C. H.; Martins, A. G. MCDA and energy planning. In: Figueira, J.; Greco, S.; Ehrgott, M. (ed.). *Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys*. [S.l.]: Springer, 2005. p. 859-890.
- Embrapa. *Panorama para geração de energia por fermentação de gramíneas em Roraima*. Campinas: Embrapa, 2019.
- Empresa de Pesquisa Energética. *Estudos de Inventário Hidrelétrico: relatório final: Bacia Hidrográfica do Rio Branco/RR*. Brasília: EPE, 2011.
- Empresa de Pesquisa Energética. *GT Roraima: subgrupo IV identificação de alternativas de atendimento: médio e longo prazo*. Brasília: EPE, 2017.
- Empresa de Pesquisa Energética. *Linha do Tempo: UHE Bem Querer*. [S.l.]: EPE, 2020. Disponível em: <http://www.uhebemquerer.com.br/linha-do-tempo/>. Acesso em: 20 jun. 2021.
- Empresa de Pesquisa Energética. *Planejamento para Atendimento aos Sistemas Isolados, Horizonte 2025: Ciclo 2020*. Rio de Janeiro: EPE, 2021a. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-614/EPE-NT-Planejamento%20SI-ciclo_2020.pdf. Acesso em: 14 jul. 2021.

Empresa de Pesquisa Energética. *Balanço energético nacional: 2021* (Ano base 2020). Rio de Janeiro: EPE, 2021b. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublishingImages/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/caderno-de-precos-da-geracao/CadernodePre%c3%a7osdeGera%c3%a7%c3%a3o_r0.pdf. Acesso em: 20 jul. 2021.

Empresa de Pesquisa Energética. *Caderno de Preços da Geração 2021*. 2021c. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublishingImages/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/caderno-de-precos-da-geracao/CadernodePre%c3%a7osdeGera%c3%a7%c3%a3o_r0.pdf. Acesso em: 20 jul. 2021.

Fraunhofer, I. *Net installed electricity generation capacity in 2021*. *Energy Charts*, 2021. Disponível em: https://energy-charts.info/charts/installed_power/chart.htm?l=en&c=DE&stacking=single&chartColumnSorting=default&year=2021. Acesso em: 28 jun. 2021.

Fthenakis, V.; Kim, H. C. Land use and electricity generation: a life-cycle analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 13, n. 6-7, p. 1465-1474, 2009.

Gallardo, A. L. C. F.; Bond, A. Investigating the effectiveness of environmental assessment of land use change: a comparative study of the approaches taken to perennial biomass crop planting in São Paulo and England. *Biomass and Bioenergy*, v. 35, n. 5, p. 2285-2297, 2011.

Goldemberg, J. The promise of clean energy. *Energy Policy*, v. 34, n. 15, p. 2185-2190. 2006.

Herzog, F. *Resumo público do plano de manejo florestal: Projeto Ouro Verde*. Boa Vista: [s.n.], 2007.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *PNAD Contínua: Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua*. Rio de Janeiro: IBGE, 2019. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pnadca/tabelas>. Acesso em: 20 jul. 2021.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Pesquisa de Produção Agrícola Municipal – 2020 (PAM-2020)*. Rio de Janeiro: IBGE, 2021. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pam/tabelas>. Acesso em: 20 out. 2021.

Instituto de Energia e Meio Ambiente. *Exclusão elétrica na Amazônia Legal: quem ainda está sem acesso à energia elétrica?* São Paulo: IEMA, 2020. Disponível em: <https://energiaambiente.org.br/wp-content/uploads/2021/02/relatorio-amazonia-2021-bx.pdf> Acesso em: 11 out. 2021.

José, T. *et al.* Decisão em Grupo com Promethee GDSS e GAIA: priorização de subsistemas no projeto do satélite ITA-SAT. Ubatuba: SBPO, 2011. Disponível em: <http://www.din.uem.br/sbpo/sbpo2011/pdf/87115.pdf>. Acesso em: 11 out. 2021.

Kumar, A. *et al.* A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 69, p. 596-609, 2017.

National Renewable Energy Laboratory. *Energy analysis: useful life*. [S.l.]: NREL, 2016. Disponível em: <https://www.nrel.gov/analysis/tech-footprint.html>. Acesso em: 14 out 2021.

Operador Nacional do Sistema Elétrico. *Plano anual da operação energética dos sistemas isolados para 2020*: PEN SISOL 2020. Rio de Janeiro: ONS, 2019.

Operador Nacional do Sistema Elétrico. *Sumario executivo do plano anual da operação energética dos sistemas isolados para 2021*: PEN SISOL 2021. Rio de Janeiro: ONS, 2020.

Operador Nacional do Sistema Elétrico. *Boletim mensal de geração solar fotovoltaica*. Rio de Janeiro: ONS, 2021a. Disponível em: <http://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/fator-capacidade.aspx>. Acesso em: 14 out. 2021.

Operador Nacional do Sistema Elétrico. *Boletim mensal de geração eólica*. Rio de Janeiro: ONS, 2021b. Disponível em: <http://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/fator-capacidade.aspx>. Acesso em: 14 out. 2021.

Sakazaki, R. T.; Alves, J. M. A.; Lopes, G. N. Arroz irrigado em Roraima. *Revista Agro@ambiente On-Line*, v. 2, n. 1, p. 69-76, 2008. Disponível em: <https://revista.ufr.br/index.php/agroambiente/article/download/166/97>. Acesso em: 5 jul. 2021.

Schmidt, S. Após 10 anos de impasse, indígenas revelam hoje parecer sobre Linhão de Tucuruí. *CNN Brasil*, 2021. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/nacional/apos-10-anos-de-impasse-indigenas-revelam-hoje-parecer-sobre-linhao-de-tucuruui/>. Acesso em: 22 nov. 2021.

Seddiki, M.; Bennadji, A. Multi-criteria evaluation of renewable energy alternatives for electricity generation in a residential building. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 110, p.101-117, 2019.

Vieira, B.; Nadaleti, W. C.; Sarto, E. The effect of the addition of castor oil to residual soybean oil to obtain biodiesel in Brazil: energy matrix diversification. *Renewable Energy*, v. 165, p. 657-667, 2021.

Wang, J.-J. *et al.* Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 13, n. 9, p. 2263-2278, 2009.

WWF Brasil. *Acesso à energia com fontes renováveis em regiões remotas no Brasil: Lições aprendidas e Recomendações*. [S.l.]: WWF Brasil, 2020. Disponível em: https://wwfbr.awsassets.panda.org/downloads/21abr20_avaliacao_de_impactos_pt_1.pdf. Acesso em: 5 jul. 2021.

Taira, D. T. *et al.* Análise multicritério para seleção de alternativas renováveis para geração de energia elétrica em Roraima (Brasil). *Sustentabilidade: Diálogos Interdisciplinares*, v. 3, e226933, 2022. <https://doi.org/10.24220/2675-7885v3e2022a6933>

Recebido em 17 de outubro de 2022, versão final em 19 de outubro de 2022, aprovado em 19 de outubro de 2022.