

## **ANÁLISE MULTICRITÉRIO DA IMPLEMENTAÇÃO DE UM PARQUE EÓLICO OFFSHORE NA COSTA DO RIO DE JANEIRO**

**MATEUS COSTA CORRÊA**

COPPE / UFRJ (COORDENAÇÃO PROGRAMAS PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA/ UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO)

**CLAUDE COHEN**

UFF - UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

### **Resumo**

Com o aumento do consumo mundial de energia e o conseqüente maior interesse na busca por fontes renováveis, a transição energética ganha destaque junto às emergências climáticas, a urgência pela superação das dependências dos fósseis e a necessidade de esforços por um desenvolvimento sustentável. Neste contexto, o Brasil tem contribuído para uma matriz energética mundial mais renovável e, embora possua uma matriz própria de maioria renovável por meio das usinas hidrelétricas, é perceptível a chance de diversificação de sua matriz com o aumento das fontes solar e eólica, em especial na sua modalidade offshore, que tem atraído investimentos na costa de diversos estados com potencial para energia eólica dado a atratividade da linha de costa brasileira, com 9650km de potencial de exploração eólica offshore, e as características da produção de energia eólica offshore que comportam a alta velocidade dos ventos em alto-mar, baixo impacto visual em relação à produção onshore e a ausência de ocupação do solo. O estado do Rio de Janeiro não é uma exceção, mas a escolha pela melhor localização de um parque eólico é complexa e envolve variados critérios, portanto, o objetivo deste estudo é identificar áreas prioritárias à implementação de um parque eólico offshore na costa do estado do Rio de Janeiro por meio de uma Análise Multicritério na esfera do geoprocessamento e sensoriamento remoto. A Análise Multicritério é uma metodologia que, no ambiente do geoprocessamento e sensoriamento remoto, busca auxiliar na tomada de decisões complexas por meio da combinação de dados espaciais georreferenciados em mapas finais. Os resultados obtidos expressam o fato de que apenas uma pequena parte da costa do estado do Rio de Janeiro possui uma alta prioridade para a instalação de um parque eólico offshore e a sobreposição dos projetos de complexos eólicos com licenciamento em aberto pode representar uma competição pelas melhores localizações.

### **Palavras Chave**

Eólica Offshore, Análise Multicritério, Sensoriamento Remoto

### **Agradecimento a órgão de fomento**

O autor Mateus Costa Corrêa agradece o financiamento do CNPq pela sua bolsa de mestrado.

# ANÁLISE MULTICRITÉRIO DA IMPLEMENTAÇÃO DE UM PARQUE EÓLICO OFFSHORE NA COSTA DO RIO DE JANEIRO

## 1 INTRODUÇÃO

O consumo de energia mundial sofreu uma constante elevação nos últimos anos, causando um maior interesse na busca por fontes renováveis de energia a fim de suprir o crescimento da demanda sem aumentar o consumo de combustíveis fósseis (GOMES et al, 2019). A transição energética, por sua vez, ganha destaque junto às emergências climáticas, a urgência pela superação da dependência dos fósseis e a necessidade de esforços por um desenvolvimento sustentável (NASCIMENTO et al, 2022).

Neste contexto, o Brasil tem contribuído para uma matriz energética mundial mais renovável e, embora possua uma matriz própria de maioria renovável por meio das usinas hidrelétricas, é perceptível a chance de diversificação de sua matriz com o aumento das fontes solar e eólica, em especial na sua modalidade offshore. Tal afirmação justifica-se pela atratividade da linha de costa brasileira, com 9650 km de potencial de exploração eólica offshore, além das características da produção de energia eólica offshore que comportam a alta velocidade dos ventos em alto-mar, baixo impacto visual em relação à produção onshore e a ausência de ocupação do solo (OZATO et al, 2023).

A finalidade última da seleção de um local ótimo para um parque eólico offshore é otimizar a produção de energia e, ao mesmo tempo, manter uma segurança para as atividades marinhas e os habitats dentro da área de influência do empreendimento (DÍAZ et al, 2022). Por meio desta finalidade, o objetivo deste estudo é identificar áreas prioritárias à implementação de um parque eólico offshore na costa do estado do Rio de Janeiro por meio de uma Análise Multicritério na esfera do geoprocessamento e sensoriamento remoto.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A atração de investidores pelos parques eólicos offshore no Brasil pode ser compreendida pelo dado de que o potencial da energia eólica offshore no país até uma profundidade de 50m é cerca de 700 GW (EPE, 2020). O estado do Rio de Janeiro não é uma exceção, vários projetos de parques eólicos offshore estão com seu licenciamento em processo aberto pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA, 2024), com projetos devidamente mapeados e Termo de Referência padronizado pelo órgão.

Neste contexto, a avaliação dos parâmetros que definem o local o qual será realizado a construção do parque eólico offshore possui destaque, assim como o método empregado para esta análise. O Processo Hierárquico Analítico (AHP) é uma ferramenta empregada na Análise Multicritério (AMC), foi proposto por Saaty (1994) e possui o objetivo de auxiliar a tomada de decisão que envolve problemas complexos, processos subjetivos e julgamentos pessoais (MARTINS & COELHO, 2012). O AHP atribui pesos a cada fator de decisão que envolva o problema, estes fatores são representados por matrizes e podem conter variáveis categóricas ou contínuas (VALENTE, 2005). No âmbito da pesquisa voltada à energia o AHP é empregado no planejamento de microgrids, planejamento da demanda elétrica em zonas rurais remotas, avaliação de políticas relacionadas com energia solar e projetos de energia hidráulica (OSPINO-CASTRO et al, 2023).

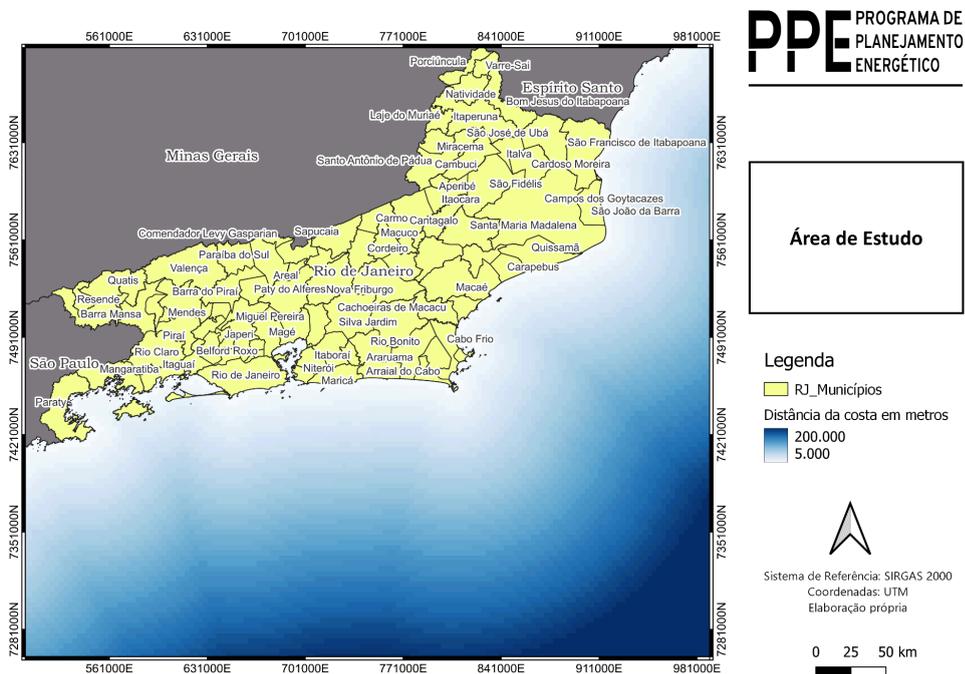
Os critérios em comum encontrados na revisão da literatura podem ser resumidos em: ambientais, como rotas migratórias de aves e áreas protegidas; técnicos, com velocidade do vento e batimetria; econômicos e logísticos, como distância até os portos e ao grid, entretanto, alguns critérios específicos que tornam as áreas prioritárias mais adequadas à área de estudo devem ser destacados (KIM et al, 2021; VAGIONA & KAMILAKIS, 2018). Por exemplo, Ospina-Castro et al (2023), utilizou rotas de furacões, rotas de pesca e áreas militares como critérios de restrição, Díaz et al (2022), selecionou 23 critérios tidos como apropriados para a seleção de um parque eólico offshore de estruturas flutuantes, alguns deles destacam-se dos demais estudos como: rotas migratórias da vida marinha, população atendida, temperatura e distância das residências.

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo compreende toda a costa do estado do Rio de Janeiro e se estende até uma distância de 200km da costa. Tal área foi definida por conta da abrangência da área de profundidade até 50m e pela limitação de dados do recurso eólico para distâncias da costa além dos 200 km. A Figura 1 exibe toda a extensão da área de estudo, onde todos os dados referentes aos critérios serão delimitados e a AMC realizada.

Figura 1 - Mapa da costa do estado do Rio de Janeiro até a distância de 200km



Fonte: autoria própria

#### 3.3 MÉTODOS

Primeiramente, é importante ressaltar que o projeto foi realizado com o sistema de coordenadas de referência SIRGAS 2000/UTM 23K. Quanto à Análise Multicritério no ambiente do geoprocessamento e sensoriamento remoto, esta é dividida em três etapas:

Normalização dos dados, Processo Hierárquico Analítico e Combinação Linear Ponderada. (MALCZEWSKI, 2006; TAIRA et al, 2022) A etapa de Normalização dos dados, quando os critérios tratam de variáveis contínuas, se dá por meio de funções fuzzy que podem ser lineares, gaussianas, sigmoidais e outras. Batimetria, Velocidade do vento e Distância da costa são os critérios selecionados para este estudo e todos representam variáveis contínuas, portanto, serão normalizadas por uma função fuzzy linear crescente ou decrescente que estão, respectivamente, exibidas na Eq. (1) e Eq. (2).

$$X_i = R_i - R_{mín}/R_{máx} - R_{mín}, \quad (1)$$

$$X_i = R_{máx} - R_i/R_{máx} - R_{mín}, \quad (2)$$

Onde:  $X_i$  = pontuação padronizada;  $R_i$  = valor dos pixels do critério;  $R_{máx}$  e  $R_{mín}$  = valores máximos e mínimos dos pixels do critério. A Eq. (1) foi aplicada aos critérios de velocidade do vento e batimetria, já a Eq. (2) foi aplicada ao critério de distância da costa. Por meio da normalização dos critérios, todos os três critérios passaram a ter uma escala entre 0 e 1 e assim a próxima etapa pôde ser concluída.

O AHP pode ser traduzido nas sub etapas de classificação do grau de importância e cálculo dos pesos dos fatores de decisão. O grau de importância, neste caso, foi classificado par à par entre os critérios e um valor dentro da Escala de Saaty foi atribuído. A Figura 2 demonstra as classificações dos critérios par-à-par e a Figura 3, as interpretações da escala:

Figura 2 - Aplicação do Grau de Importância entre os critérios de acordo com a Escala de Saaty

A - wrt AHP priorities - or B?		Equal	How much more?
1	<input checked="" type="radio"/> Batimetria	<input type="radio"/> Distância da costa	<input type="radio"/> 1 <input checked="" type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
2	<input type="radio"/> Batimetria	<input checked="" type="radio"/> Recurso eólico	<input type="radio"/> 1 <input checked="" type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
3	<input type="radio"/> Distância da costa	<input checked="" type="radio"/> Recurso eólico	<input type="radio"/> 1 <input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input checked="" type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9

CR = 0.4% OK

Fonte: autoria própria

Figura 3 - Escala de Saaty e Interpretação dos Graus de Importância

Escala numérica	Escala Conceitual	Descrição
1	Igual	Os dois elementos comparados contribuem igualmente para o objetivo.
3	Moderada	O elemento comparado é ligeiramente importante ao outro.
5	Forte	A experiência e o julgamento favorecem fortemente o elemento em relação ao outro.
7	Muito Forte	O elemento comparado é muito mais forte em relação ao outro, e tal importância pode ser observada na prática.
9	Absoluta	O elemento comparado apresenta o mais alto nível de evidência possível a seu favor.
2,4,6,8	Valores intermediários entre dois julgamentos, utilizados quando o decisor sentir dificuldade ao escolher entre dois graus de importância adjacentes.	

Fonte: Ribeiro, Alves (2016).

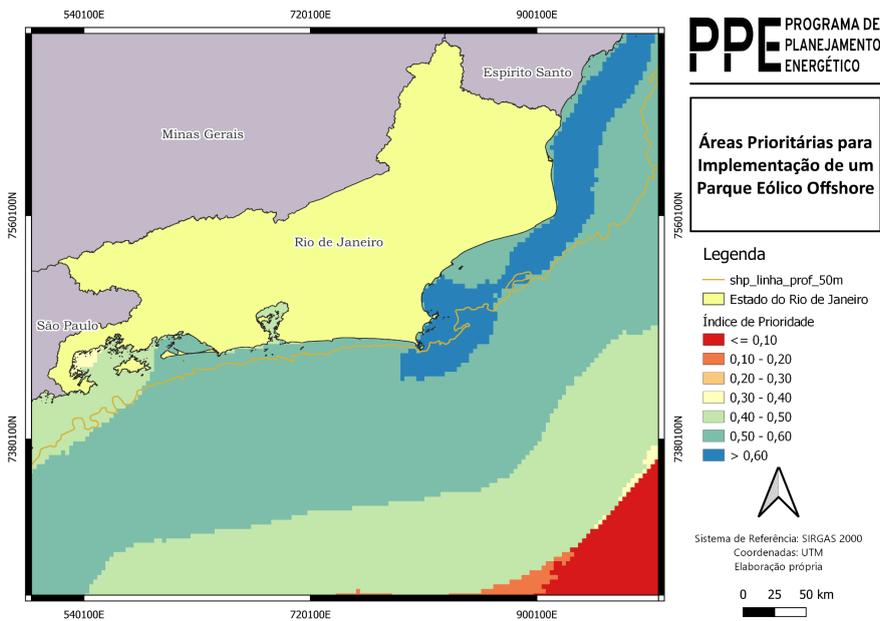
A sigla CR, observada na Figura 2, significa Razão de Consistência e representa a chance de que os valores atribuídos tenham sido gerados randomicamente. Segundo Saaty (1994), as matrizes recíprocas com valores de RC superiores a 0,10 devem ser reanalisadas.

A próxima etapa é o cálculo dos pesos, ambas as sub etapas foram realizadas na plataforma AHP Priority Calculator. A partir da atribuição dos graus de importância, os pesos referentes a cada critério são calculados por uma média geométrica. As prioridades empregadas nos critérios deste trabalho são: Recurso Eólico, 58,2%; Batimetria, 30,9%; Distância da costa, 10,9%. A Combinação Linear Ponderada consiste na última etapa deste método e pode ser resumida no somatório da multiplicação dos pesos pelas matrizes normalizadas de pixels dos respectivos critérios. Como resultado, um mapa final é gerado com as áreas prioritárias.

#### 4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O mapa final gerado pelo método da AMC consiste na classificação da área de estudo onde os critérios estão inseridos de acordo com a convergência entre os dados dos fatores, ponderados pelos pesos dos critérios. A Figura 4 contém o mapa final gerado pela AMC:

Figura 4 - Áreas Prioritárias para Implementação de um Parque Eólico Offshore na costa do Rio de Janeiro



Fonte: autoria própria

É necessário destacar, em um primeiro momento, que a área classificada em menos de 0,1 se deu pela falta de dados de velocidade do vento além dos 200 km de distância da costa. A linha em laranja representa o limite onde a profundidade é exatamente 50m e, conforme citado anteriormente, abriga um potencial de 700 GW de acordo com pesquisas da EPE (2020), sua importância consiste no fato de que as áreas com maior prioridade encontram-se, em sua maior parte, dentro da área cuja profundidade está até 50m. Apenas uma pequena área após a linha de profundidade de 50m com índice de prioridade acima de 0,6 foi classificada e está localizada na costa de Arraial do Cabo até parte da costa de Macaé.

A viabilidade dos dados gerados por este estudo pode ser assegurada pela semelhança entre as áreas de alta prioridade, ou seja, acima do índice de prioridade 0,6, com a localização de projetos de complexos eólicos offshore na costa do estado do Rio de Janeiro que estão com processos de licenciamento em aberto no IBAMA (2024), tal semelhança solidifica os

resultados locais obtidos através da AMC. Algumas diferenças podem ser vistas em relação à área ótima da AMC e a área dos projetos em licenciamento, tal discrepância pode ser justificada pela ausência de critérios na análise deste estudo como restrições ambientais e outros usos presentes nas áreas ótimas ausentes de projetos. Além disso, há a possibilidade de outro critério econômico, técnico ou logístico ser considerado, cujo resultado deslocaria as áreas de alta prioridade para leste, porém, destaca-se o fato da maior parte da área dos projetos estarem dentro da área de profundidade até 50m.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A escolha da localização de um parque eólico offshore exige uma série de critérios, muitos deles adequados e selecionados para um determinado local, de acordo com as especificidades de cada região. Embora a maior parte da localização dos projetos de complexos eólicos offshore com processo de licenciamento aberto estejam na faixa de profundidade até 50m e sobre a área de alta prioridade gerada, novos estudos poderiam investigar outras localizações de alta prioridade para parques eólicos específicos, como os de estruturas flutuantes. O acompanhamento das áreas de alta prioridade nas costas dos outros estados brasileiros seria importante no intuito de averiguar se esta faixa se manterá em sua maior parte até a profundidade de 50m ou se afastará. Em resumo, o estudo exhibe uma grande faixa de prioridade média, entre 0,4 à 0,6, cobrindo grande parte da área de estudo enquanto apenas uma estreita faixa, em relação às demais, possui índices de prioridade acima de 0,6, alcançando um máximo de 0,7. Tal resultado evidencia não somente o fato de que apenas uma pequena parte da costa do estado do Rio de Janeiro possui uma alta prioridade para a instalação de um parque eólico offshore, mas também a sobreposição dos projetos de complexos eólicos com licenciamento em aberto pode representar uma competição pelas melhores localizações.

## REFERÊNCIAS

DÍAZ, H.; TEIXEIRA, A.P.; SOARES, C. G. Application of Monte Carlo and Fuzzy Analytic Hierarchy Processes for ranking floating wind farm locations. **Ocean Engineering**, v. 245, p. 1-10. 2022.

EPE. **Roadmap Eólica Offshore Brasil**: Perspectivas e caminhos para a energia eólica marítima. Empresa de Pesquisa Energética, Ministério de Minas e Energia, Brasil. 2020. Acesso em: Jun. 2024. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-456/Roadmap\\_Eolica\\_Offshore\\_EPE\\_versao\\_R2.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-456/Roadmap_Eolica_Offshore_EPE_versao_R2.pdf)

GOMES, M. S. S.; PAIVA, J. M. F.; MORIS, V. A. S.; NUNES, A. O. Proposal of a methodology to use offshore wind energy on the southeast coast of Brazil. **Energy**, v. 185, p. 327-336. 2019.

IBAMA. **Mapas de projetos em licenciamento - Complexos Eólicos Offshore**. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, Brasil. 2024. Acesso em: Jun. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/laf/consultas/mapas-de-projetos-em-licenciamento-complexos-eolicos-offshore>

KIM, G.; JEONG, M.-H.; JEON, S.-B.; LEE, T.-Y.; OH, H.-Y.; PARK, C.-S. Determination of optimal locations for offshore wind farms using the analytical hierarchy process. In: Lee, J.L.; Suh, K.-S.; Lee, B.; Shin, S., and Lee, J. (eds.), *Crisis and Integrated Management for Coastal and Marine Safety. Journal of Coastal Research*, Special Issue n. 114, p. 439-443, Coconut Creek (Florida). 2021

MALCZEWSKI, J. GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 20, n.7, p. 703-726. 2006

MARTINS, F. G.; COELHO, L. S. Aplicação do método de análise hierárquica do processo para o planejamento de ordens de manutenção em dutovias. **GEPROS: Gestão da Produção, Operações e Sistemas**, v. 7, n. 1, jan-mar/2012, p. 65-80.

NASCIMENTO, M. M. S.; SHADMAN, M.; SILVA, C.; ASSAD, L. P. F.; ESTEFEN, S. F.; LANDAU, L. Offshore wind and solar complementarity in Brazil: A theoretical and technical potential assessment. **Energy Conversion and Management**, v. 270, n. 116194, p. 1-19. 2022.

NOSSACK, F.A.; SARTORI, A. A. C.; SILVA, R. F. B.; MORAES, D. C. A.; ZIMBACK, C. R. L. Definição de áreas prioritárias para a recuperação florestal visando conectividade entre fragmentos: Análise Multicriterial. In: XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, 2011, Curitiba. **Anais eletrônicos...** Curitiba: INPE, 2011.

OSPINO-CASTRO, A.; ROBLES-ALGARÍN, C.; MANGONES-CORDERO, A.; ROMERO-NAVAS, S. An Analytic Hierarchy Process Based Approach for Evaluating Feasibility of Offshore Wind Farm on the Colombian Caribbean Coast. **International Journal of Energy Economics and Policy**, v. 13, n. 6, p. 64-73. 2023

OZATO, J. Y.; AQUILA, G.; PAMPLONA, E. O.; ROCHA, L. C. S.; JUNIOR, P. R. Offshore wind power generation: An economic analysis on the Brazilian coast from the stochastic LCOE. **Ocean and Coastal Management**, v. 244. n. 106835, p. 2-13. 2023.

RIBEIRO, M.C.C.R; ALVES, A. S. Aplicação do método Analytic Hierarchy Process (AHP) com a mensuração absoluta num problema de seleção qualitativa. **Sistemas & Gestão**, v. 11, n. 3, p. 270-281, 2016.

SAATY, T.L. How to make a decision: The analytic hierarchy process. **Interfaces**, v. 24, p. 19-43. 1994

TAIRA, D. T.; LOPES, P. S.; PINTO, N. C. C.; GALLARDO, A. L. C. F. Análise multicritério para seleção de alternativas renováveis para geração de energia elétrica em Roraima (Brasil). **Sustentabilidade**, v. 3, São Paulo. 2022

VAGIONA, D. G.; KAMILAKIS, M. Sustainable Site Selection for Offshore Wind Farms in the South Aegean—Greece. **Sustainability**, v. 10, n. 748, p. 1-18. 2018.

VALENTE, R. O. A. **Definição de áreas prioritárias para conservação e preservação florestal por meio da abordagem multicriterial em ambiente SIG**. 2005. 121 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.