

Lógica *Fuzzy* e Geoprocessamento para Instalação de Usinas Eólicas *Offshore* nas Regiões Sul e Sudeste do Brasil^{*}

Karen F. Paula^{*} Renata Sander^{**} André T. S. Melo^{***}
Djalma M. Falcão^{****} Patricia T. L. Asano[†] Joel D. Melo[‡]

^{*} Universidade Federal do ABC, Santo André - SP, Brasil, (e-mail: karen.paula@ufabc.edu.br).

^{**} Universidade Federal do ABC, Santo André - SP, Brasil, (e-mail: r.sander@ufabc.edu.br)

^{***} Associação Brasileira de Energia Eólica, ABEEólica, São Paulo, Brasil, (e-mail: andre@abeeolica.org.br)

^{****} Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, (e-mail: falcao@nacad.ufrj.br)

[†] Universidade Federal do ABC, Santo André, SP, Brasil, (e-mail: patricia.leite@ufabc.edu.br)

[‡] Universidade Federal do ABC, Santo André, SP, Brasil, (e-mail: joel.melo@ufabc.edu.br)

Abstract: The search for renewable and efficient energy solutions has become a global trend due to the current climate change scenario and the increased demand for electricity. Thus, in several countries, the share of renewable sources in the electricity matrix has grown with the insertion of new energy sources, such as wind. This energy source has significantly contributed to the global energy transition and the trend is for the growth of wind energy to migrate to the sea. Brazil has good conditions for offshore wind farms as it has an extensive coastline and extensive experience in offshore operations in oil and gas. This paper presents a methodology that seeks better use of the wind resource available in the areas with the highest electricity consumption in Brazil to help planners and agents interested in new projects for the construction of offshore wind farms in Brazil's South and Southeast regions. First, the proposed method evaluates the available wind resource considering technical, environmental, and social constraints, to identify the best offshore wind farms on the Brazilian coast. Considering that these restrictions present a high spatial dispersion in the study area, the proposal performs the information processing within a geographic information system. Then, a fuzzy logic model makes the joint evaluation of the constraints. As a result of the study, there are the 25 most favorable locations for the deployment of offshore wind farms.

Resumo: A procura por soluções energéticas renováveis e eficientes tornou-se uma tendência global devido ao atual cenário de mudanças climáticas e ao aumento da demanda por energia elétrica. Assim, em diversos países a parcela de fontes renováveis na matriz elétrica vem aumentando com a inserção de novas fontes energéticas, como a eólica. Esta fonte de energia tem contribuído significativamente para a transição energética mundial e a tendência é que o crescimento da energia eólica migre para o mar. O Brasil possui boas condições para a construção de parques eólicos *offshore* por possuir uma extensa faixa costeira e grande experiência com operações *offshore* originados do setor de óleo e gás. Com a finalidade de auxiliar os planejadores e agentes interessados em novos projetos de construção de parques eólicos *offshore* nas regiões Sul e Sudeste do Brasil, este artigo apresenta uma metodologia que procura um melhor aproveitamento do recurso eólico disponível nas regiões de maior consumo de eletricidade do Brasil. A metodologia proposta avalia o recurso eólico disponível considerando as restrições técnicas, ambientais e sociais, a fim de identificar os melhores locais para instalação de parques eólicos *offshore* na costa brasileira. Considerando que essas restrições apresentam uma elevada dispersão espacial na área de estudo, a proposta realiza o processamento da informação dentro de um sistema de informação geográfica e, então, um modelo de lógica *fuzzy* faz a avaliação conjunta das restrições. Como resultado do estudo, têm-se os 25 locais mais favoráveis para a implantação de parques eólicos *offshore*.

Keywords: Fuzzy Logic; Geographic Information System; Offshore Wind Energy.

Palavras-chaves: Lógica Fuzzy; Sistema de Informação Geográfica; Energia Eólica Offshore.

1. INTRODUÇÃO

No cenário atual, em que o mundo tem sido impactado com as mudanças climáticas e com o incremento da demanda global por energia elétrica, a busca por soluções energéticas renováveis e eficientes tem se tornado uma tendência global (IEA, 2018). Adicionalmente, uma matriz elétrica com uma alta parcela de fontes renováveis traz benefícios ambientais, econômicos e sociais, contribuindo para: a melhoria na qualidade do ar, a segurança energética, a redução de tarifas de energia e o desenvolvimento tecnológico e industrial. Sendo assim, os países tem buscado, sempre que possível, substituir os recursos não renováveis por renováveis, com a finalidade de aumentar a qualidade do abastecimento energético (Silva and Cataldi, 2016; Gomes et al., 2019).

O Brasil possui uma matriz elétrica predominantemente renovável, com grande contribuição da fonte hidráulica. A parcela de renováveis vem aumentando com a inserção de outras fontes, como a eólica. Os estados nordestinos concentram o maior número de parques eólicos *onshore* - instalados em terra - do país, por apresentarem um bom potencial eólico (Zaparolli, 2019). De acordo com Silva and Cataldi (2016), alguns estudos têm analisado que o crescimento da energia eólica migrará para o mar, com a construção de parques eólicos *offshore*, principalmente por razões como:

- falta de espaço e crescentes conflitos em terra, com o aumento da dificuldade logística para implantação e manutenção dos parques eólicos;
- ventos mais fortes e constantes no mar;
- proximidade aos principais centros populacionais e de maiores demandas de energia elétrica, localizados nos litorais.

A maior vantagem da geração eólica *offshore* em relação à *onshore* é o aproveitamento da alta capacidade e eficiência das turbinas. Adicionalmente, o oceano permite a instalação de equipamentos de maior dimensão e ventos de maior intensidade, o que garante uma maior produção de energia por turbina instalada (Calado and Castro, 2021).

De acordo com Silva (2019); ABEEólica (2018), o Brasil apresenta boas condições para construção de parques eólicos *offshore* por possuir extensa faixa costeira e grande experiência em operações *offshore*. Além disso, a geração de energia eólica *offshore* vai de conformidade com a política energética nacional, que tem como princípios promover o desenvolvimento e valorizar os recursos energéticos

que mitiguem as emissões de gases de efeito estufa e de poluentes no setor de energia (Brasil, 1997).

Para que ocorra a migração da energia eólica para o mar, é necessário fazer uma avaliação do potencial eólico *offshore* do país. Com a finalidade de ter uma avaliação mais próxima da realidade, torna-se interessante a adição de fatores técnicos, ambientais e sociais e de restrições de zonas de conservação que podem inviabilizar a instalação deste tipo de parques eólicos em alguns locais (Silva, 2019). Tais restrições tem relação com outras atividades que se realizam no mar.

O ambiente marítimo apresenta usos múltiplos de atividades de extração, como: a pesca, plataformas petrolíferas, oleodutos, cabos de comunicação, entre outros. Além disso, áreas protegidas que possuem espécies marinhas ameaçadas, devem ser consideradas na análise dos locais para aprovação de projetos de usinas eólicas *offshore*.

Pelo exposto, o objetivo deste trabalho é propor uma metodologia de avaliação dos locais favoráveis para implantação de usinas eólicas *offshore* nas regiões brasileiras de maior consumo de energia elétrica, Sul e Sudeste. Em tal avaliação, procura-se um melhor aproveitamento do recurso eólico disponível, considerando as restrições técnicas, ambientais e sociais. Considerando que essas restrições apresentam uma alta dispersão espacial na zona de estudo, a proposta realiza o processamento de informações dentro de um sistema de informação geográfica. As informações processadas são inseridas a um modelo de lógica *fuzzy* para realizar a avaliação conjunta das restrições.

Na aplicação da proposta, o tratamento de informações espaciais foi realizado no *software* QGIS Desktop, versão 3.4.5. Já o modelo de lógica *fuzzy* foi desenvolvido no *software* Matlab, versão 2016a. A proposta encontrou 25 locais mais favoráveis para a implantação das usinas eólicas *offshore* dentro dos estados do Rio de Janeiro e Espírito Santo.

2. MÉTODOS PARA IDENTIFICAÇÃO DO LOCAL DE INSTALAÇÃO DE USINAS EÓLICAS

Em de Lima et al. (2018) e Lopes (2019) são apresentadas metodologias para avaliação de locais, no estado de São Paulo, com potencial para a implantação de geradores eólicos, sob o enfoque do desenvolvimento sustentável. Ambas autoras consideraram fatores sociais e ambientais que podem influenciar no desenvolvimento de projetos de usinas eólicas *onshore*. No trabalho de Lima et al. (2018) se utilizou técnicas multicritério: Combinação Linear Ponderada e Médida Ponderada Ordenada. Enquanto que Lopes (2019) utilizou Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e *Fuzzy-AHP* para a seleção dos municípios mais aptos para a instalação de usinas eólicas *onshore*.

Com o passar dos anos, o desenvolvimento de tecnologia e o início do esgotamento de locais para instalação de usinas eólicas *onshore*, os estudos começaram a focar em avaliação de locais propícios para a instalação de usinas

* Os autores agradecem a Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica) pelo apoio na estruturação do artigo e discussões de resultados do estudo de caso. Este trabalho contou com os seguintes auxílios financeiros: da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001; Projeto Universal nº 422044/2018 0, nº 408898/2021-6, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq); processo nº 2021/08832-1, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP); e INCT-INERGE.

eólicas *offshore*. Neste cenário, Silva (2019) desenvolveu um estudo para avaliar o potencial eólico *offshore* do Brasil, com a finalidade de mapear as melhores áreas para o desenvolvimento da fonte e estimar a capacidade que poderia ser instalada no litoral brasileiro. Na análise foi considerado o potencial eólico *offshore* teórico e consideradas limitações técnicas, ambientais e sociais, que viabilizassem economicamente a implantação de parques eólicos *offshore*. A escolha final das melhores áreas foi feita por análise espacial multicritério que considera fatores econômicos comparativos. Ainda no cenário *offshore* brasileiro, Gomes et al. (2019) elaborou uma metodologia, utilizando o *software* Excel e dados coletados de boias oceânicas e estações meteorológicas automáticas, com a finalidade contribuir com o desenvolvimento da tecnologia eólica *offshore* e futuras pesquisas.

No cenário eólico *offshore* mundial, Vasileioua et al. (2017) fazem um estudo para identificar zonas marinhas, na Grécia, mais adequadas para implantação de fontes de energia renováveis *offshore* – energia eólica e energia das ondas. Os autores desse trabalho utilizaram SIG e Processo de Hierarquia analítica para a análise, considerando critérios de exclusão relacionados às limitações econômicas, técnicas e sociais. Cavazzi and Dutton (2016) também utilizaram SIG, aliado com parâmetros financeiros e critérios econômicos, técnicos e sociais para avaliar o recurso de energia eólica *offshore* que seja economicamente acessível para o Reino Unido.

Como resumo dos estudos na área de usinas eólicas *offshore* e SIG, Peters et al. (2020) fizeram uma revisão bibliográfica que destacou como resultado algumas tendências: (1) menos de 40% dos estudos analisados consideraram aspectos de planejamento do espaço marinho e menos de 20% mencionaram requisitos para avaliação de impacto ambiental; (2) a profundidade máxima viável de água aumenta constantemente ao longo do tempo, impulsionada pelo avanço da tecnologia; (3) as resoluções espaciais dos dados variam drasticamente entre os estudos; (4) as análises de seleção de locais são tipificadas pelos desvios mais frequentes e significativos das tendências globais, tanto em relação à profundidade da água como em relação às resoluções espaciais; (5) o número de parâmetros avaliados no SIG variam entre 2 e 14.

A revisão da literatura mostrou que a tendência é utilizar sistemas de informação geográfica em estudos sobre a avaliação do potencial eólico ou determinação de locais propícios para instalação de usinas eólicas. Alguns estudos utilizam também análise de decisão multicritério para a determinação dos locais. Atualmente, existem poucos estudos que identifiquem os locais para instalação de usinas eólicas *offshore* no Brasil. A maioria dos estudos encontrados na literatura são relacionados à Europa. Assim, este trabalho apresenta uma metodologia de avaliação dos locais favoráveis para implantação de usinas eólicas *offshore* no Sul e Sudeste brasileiro. Tal metodologia foi desenvolvida por meio de um sistema de informação geográfica em conjunto à lógica fuzzy, com a finalidade de obter uma melhor caracterização das avaliações subjetivas dos planejadores, em relação às dimensões: ambientais, técnicas e sociais.

3. INFORMAÇÕES MODELADAS NA LÓGICA FUZZY

Introduzida em 1965 pelo matemático Lotfi Asker Zadeh, a lógica *fuzzy* definiu um novo ferramental capaz de lidar com informações imprecisas. Um conceito chave para a compreensão dessa modelagem é a noção de um conjunto *fuzzy*. Diferentemente da teoria de conjuntos clássica, na teoria de conjuntos *fuzzy*, admite-se que um elemento x pertence a um conjunto A com um certo grau de pertinência no intervalo $[0,1]$. Assim, um conjunto *fuzzy* pode ser definido por uma função de pertinência $\mu_A(x)$, que indica o grau de pertinência do elemento x ao conjunto A (Prati, 2011). Isso permite definir conjuntos associados a apreciações subjetivas, como “grande”, ou “muito pequeno”, de maneira mais natural do que simplesmente definir um intervalo de valores que representem tais conceitos. A teoria fuzzy possibilita o modelamento de um sistema de forma mais realista e flexível ao admitir valores lógicos intermediários entre a afirmação e a negação de uma asserção (Melo, 2009).

O mapeamento entrada-saída implementado por tais sistemas é definido por um conjunto de regras, formadas por proposições condicionais “IF - THEN” ou “SE - ENTÃO”, relacionando as variáveis de entrada e saída do sistema. Entretanto, diferentemente de sistemas tradicionais, na definição do conjunto de regras assume-se que as entradas e saídas são especificadas em termos de variáveis linguísticas. Por exemplo, considere um sistema que possui uma entrada que corresponda à “área de uma unidade de conservação”. Assim, assume-se que essa variável de entrada pode assumir um valor linguístico igual a “grande”, “muito grande”, “pequena”, dentre outras possibilidades.

Note que cada um dos possíveis valores linguísticos é definido por uma apreciação subjetiva, o qual deve ser especificado por meio de um conjunto *fuzzy*. Além disso, o uso de variáveis linguísticas na expressão das regras utiliza um linguajar próximo à do nosso cotidiano. No entanto, mesmo que as regras sejam expressas para caracterizar tal apreciação, na prática as variáveis de entrada do sistema são apresentadas como valores numéricos, sendo necessário converter tais valores para os valores linguísticos correspondentes. Tal processo de conversão é denominado de *fuzzificação*. Após o processamento das regras, a saída também deve ser convertida para um valor numérico – processo esse denominado de *defuzzificação*. Sendo assim, os sistemas de inferência *fuzzy* podem ser descritos por meio de quatro módulos, os quais caracterizam suas avaliações subjetivas:

- (1) *Fuzzificadores*: mapeiam os dados de entrada, convertendo os intervalos reais de entrada em graus de pertinência em relação a cada valor linguístico;
- (2) Base de regras: formadas por proposições condicionais “IF - THEN” ou “SE - ENTÃO”;
- (3) Máquina de inferência: processa os dados de entrada e o conjunto de regras para geração do conjunto fuzzy de saída. Para isso, é necessário avaliar e combinar cada uma das regras da base, com o objetivo de formar um conjunto fuzzy único de saída;
- (4) *Defuzzificadores*: fazem a decodificação do conjunto fuzzy de saída. Neste trabalho foi adotado o método

de centroide, que calcula o centro de gravidade da área composta que representa o termo de saída fuzzy, composto pela união de todas as contribuições de regras.

4. METODOLOGIA PROPOSTA

A metodologia proposta considera duas bases de informações. A primeira é formada por dados com coordenadas geográficas, sendo estes: velocidade do vento, unidades de conservação de proteção integral e uso sustentável, áreas prioritárias para conservação classificadas com prioridade extremamente alta, linhas de transmissão e profundidade da água. As regras “SE - ENTÃO” e os parâmetros do sistema de inferência fuzzy são armazenados na segunda base de dados.

Na primeira etapa da metodologia, utiliza-se um SIG para selecionar os locais de maior interesse para o estudo, excluindo os locais que não atendam às restrições ambientais, técnicas e sociais. Nesta etapa são calculadas as distâncias dos pontos de estudos até à costa e às linhas de transmissão mais próxima. O resultado da primeira etapa é uma tabela que mostra os valores de velocidade do vento e profundidade da água nos locais que cumprem com todas as restrições técnicas, ambientais e sociais.

Na segunda etapa, a tabela resultante da primeira etapa e as informações na segunda base de dados de entrada são representados por meio de funções de pertinência. Tais funções podem ser funções triangulares, trapezoidais, gaussianas, entre outras. Essas funções são escolhidas de acordo com a expertise dos planejadores e com as recomendações fornecidas na literatura especializada. As funções de pertinência representam as variáveis linguísticas e seus respectivos intervalos, que podem ser definidos e modificados dentro do sistema de inferência fuzzy. Através dos *defuzzificadores* obteve-se o percentual de possibilidade de implantação de usinas eólicas *offshore* para cada ponto analisado. O resultado final da metodologia apresenta os locais mais bem classificados para a instalação dessas usinas. Na Figura 1 se mostra o fluxograma da metodologia proposta.

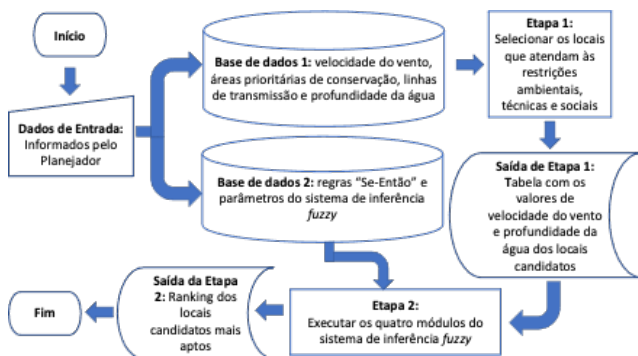


Figura 1. Etapas da metodologia proposta

5. ESTUDO DE CASO

5.1 Caracterização da área de estudo

O estudo de caso foi desenvolvido para as regiões de maior consumo de energia elétrica no Brasil. Os dados

relacionados às regiões Sul e Sudeste do território brasileiro utilizados foram:

- Velocidade do vento offshore, a 100 metros de altura, dados retirados da base de dados do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL, 2013);
- Linhas de transmissão de energia elétrica, dados retirados da base de dados do Operador Nacional do Sistema (ONS, 2019);
- Profundidade, dados de batimetria retirados da base de dados do Serviço Geológico do Brasil – Centro de Desenvolvimento Tecnológico (CPRM-CEDES, 2021);
- Localização das Unidades de Conservação (UCs) de Proteção Integral e Uso Sustentável, dados retirados da base de dados do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais (IBAMA-Ministério do Meio Ambiente, 2019);
- Áreas prioritárias, dados retirados da base de dados do Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2018).

Os dados da primeira base de dados foram analisados e manipulados no QGIS que é um SIG. Na Figura 2 se mostra as linhas de transmissão de energia elétrica da zona de estudo.

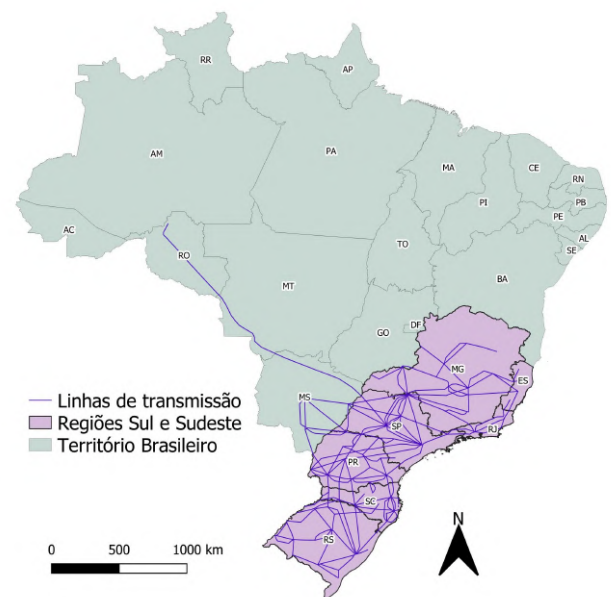


Figura 2. Linhas de transmissão localizadas nos estados da região Sul e Sudeste.

Os pontos de velocidade do vento foram selecionados considerando velocidade acima de 7m/s, conforme restrição técnica, sendo esta a velocidade mínima que viabiliza a geração, considerando as turbinas comerciais. Além disso, pontos que apresentam distância da costa menor que 8 km foram excluídos, com a finalidade de atender à restrição social, evitando que a energia eólica cause impacto visual ou atinja dutos (Silva, 2019).

Na Figura 3 se mostra os pontos de velocidade do vento acima de 7m/s e a linha da costa que foi utilizada como referência para calcular a distância dos pontos até a costa. Para esses pontos, analisou-se sua adesão com as restrições

técnicas sociais e ambientais, considerando os valores de profundidade da água em cada posição.

Com a finalidade de não causar impactos negativos nas atividades de pesca e grupos biológicos sensíveis, utilizou-se a restrição ambiental em áreas de unidades de conservação e áreas prioritárias apresentadas em Silva (2019). Essas áreas são mostradas na Figura 4.

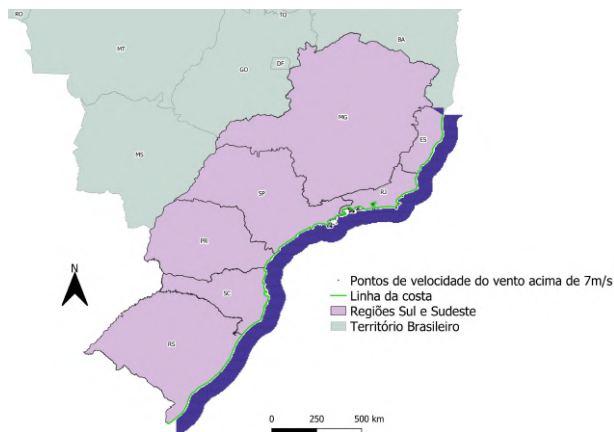


Figura 3. Pontos de velocidade do vento para a costa das regiões Sul e Sudeste.

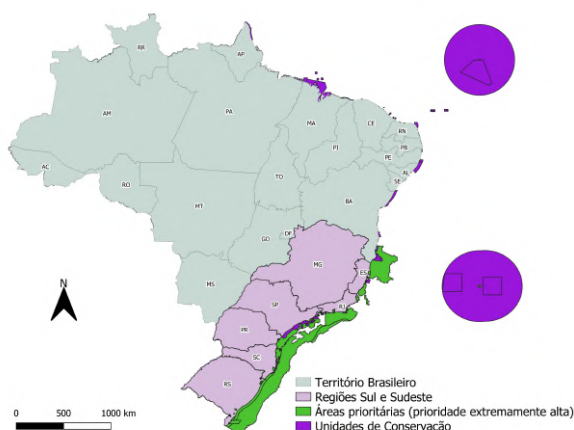


Figura 4. Unidades de Conservação e Áreas Prioritárias para Conservação.

Como resultado da manipulação dos dados no *software* QGIS foi gerada uma tabela com as coordenadas geográficas de cada ponto e seus respectivos valores de velocidade do vento, profundidade da água, distância da costa e distância da linha de transmissão mais próxima.

5.2 Modelagem da lógica fuzzy

A tabela gerada na etapa anterior foi utilizada como dado de entrada do sistema de inferência *fuzzy* para a determinação dos locais favoráveis para implantação de usinas eólicas *offshore*.

A Tabela 1 apresenta a classificação utilizada no sistema de inferência *fuzzy* para a distância dos pontos analisados até uma linha de transmissão ou até a costa. Quanto mais longe este ponto estiver da costa ou da linha de transmissão, a tendência é que esteja mais profundo e maior será

a extensão do cabeamento para conexão das usinas eólicas *offshore* à rede. A distância da costa também define se a transmissão será feita através de cabos de alta tensão por corrente alternada ou por corrente contínua. A transmissão por corrente alternada é mais usual em pequenas distâncias e a transmissão por corrente contínua é mais indicada para longas distâncias, normalmente parques eólicos localizados de 50 à 100 km da terra (Calado and Castro, 2021; Haddadi et al., 2022; Silva, 2019). Ainda de acordo com Calado and Castro (2021), a transmissão por linhas de corrente alternada apresenta maiores perdas de energia, levando à necessidade de compensadores de linha reativa mais potentes, em longas distâncias, para contabilizar as perdas capacitivas, o que por sua vez aumenta o custo de investimento. As linhas de corrente contínua não apresentam perdas capacitivas, apenas perdas ôhmicas, sendo assim, ainda que o investimento inicial para transmissão de energia seja alto, as perdas e custos de transmissão são significativamente mais baixos. Para este estudo foi considerado que quanto menor a distância da costa ou até uma linha de transmissão, mais atrativo será para a implantação de usinas eólicas *offshore*.

Tabela 1. Classificação dos dados de entrada de distância do local até a linha de transmissão ou até a costa

Classificação	Distância [km]
Perto	0-75
Médio	65-105
Longe	95-200

A Tabela 2 mostra a classificação utilizada no sistema de inferência *fuzzy* para a velocidade do vento. Este dado é considerado o mais relevante na avaliação financeira de projetos eólicos, uma vez que a geração elétrica e o fator de capacidade são dependentes da velocidade. Para este critério, quanto maior for a velocidade do vento no local analisado, mais atrativo será a implantação de usinas eólicas.

Tabela 2. Classificação dos dados de entrada de velocidade do vento.

Classificação	Velocidade do vento [m/s]
Baixa	7,0-8,5
Média	7,5-10,0
Alta	9,0-15,5

A Tabela 3 mostra a classificação empregada no sistema de inferência *fuzzy* para a profundidade da água. Este também é considerado um critério muito importante, pois os custos de instalação das usinas aumentam com o aumento da profundidade. Os tipos de fundação para profundidades maiores têm altos custos de implementação (Cavazzi and Dutton, 2016). Assim, quanto menor for a profundidade da água, mais economicamente atrativo será para a implantação de usinas eólicas *offshore*.

Tabela 3. Classificação dos dados de entrada: profundidade da água.

Classificação	Profundidade [m]
Raso	0-25
Médio	15-55
Fundo	45-1000

Neste trabalho foram definidas 81 regras para relacionar os dados de entrada (antecedentes) para a determinação dos dados de saída (consequentes). Na Figura 5 se mostra uma dessas regras: "Se o ponto analisado estiver próximo à costa e à linha de transmissão e apresentar baixa velocidade do vento e baixa profundidade (raso), a possibilidade de implantação de usina eólica neste local é Média". Percebe-se que a velocidade baixa do vento influenciou na possibilidade de implantação, diminuindo tal possibilidade. As regras utilizadas permitem modelar o caráter subjetivo associado à habilidade do raciocínio do planejador ou tomador de decisão para a instalação da usina. O sistema de inferência determina o percentual da possibilidade de implantação de usinas eólicas *offshore* em cada um dos pontos candidatos. Tal percentual é obtido pela técnica de Max-Min, que utiliza as operações de união e intersecção entre conjuntos, por meio dos operadores máximo e mínimo, respectivamente.

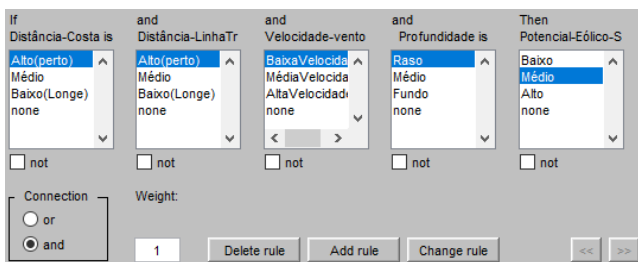


Figura 5. Exemplo de uma regra do sistema *fuzzy*.

A Figura 6 mostra o conjunto *fuzzy* de saída, representando a variável linguística do percentual de possibilidade de implantação de usinas eólicas *offshore* [%]. Os valores assumidos por esta variável linguística – Baixa, Média e Alta – são representados por conjuntos *fuzzy*. A representação gráfica destes conjuntos é feita por meio de funções de pertinência trapezoidais e triangulares. Tais funções podem ser modificadas em função da expertise e conhecimento do planejador.

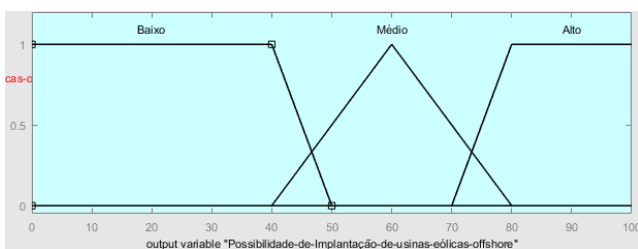


Figura 6. Funções de pertinência dos dados de saída.

A classificação mostrada na Tabela 4, refere-se à saída do sistema de inferência *fuzzy*, sendo os intervalos das funções de pertinência.

Tabela 4. Classificação dos dados de saída em percentual de possibilidade de implantação de usinas eólicas nos pontos analisados.

Classificação	Possibilidade de implantação de eólica [%]
Baixa	0-50
Média	40-80
Alta	A partir de 70

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A tabela gerada como resultado da primeira etapa tem 1.000 pontos. Tal tabela foi inserida no sistema de inferência *fuzzy* para realizar a avaliação dos locais mais favoráveis para implantação de usinas eólicas *offshore*.

Os 25 pontos mais bem classificados, que estão localizados na Região Sudeste, entre o litoral do Rio de Janeiro e Espírito Santo, são mostrados na Figura 7. Estes locais estão classificados com Média ou Alta possibilidade para implantação de usinas eólicas *offshore*. Igualmente, os locais encontrados pela proposta que estão próximos às linhas de transmissão e próximos à costa apresentam:

- profundidade da água variando entre 0 e 50 metros e
- velocidade do vento variando entre 7,9 e 9,0m/s.

Na Figura 7 é possível observar os 25 locais mais bem classificados para implantação de usinas eólicas *offshore*, que apresentaram percentual de implantação variando entre 60% e 87%. Como pode ser observado no mapa, não são mostrados pontos como coloração verde mais escura, a qual representa locais com percentual acima de 90% para a implantação de usinas eólicas *offshore*.

Na análise da primeira etapa, foi observado que: os pontos localizados na costa das regiões Sul e Sudeste foram excluídos pelas restrições referentes às áreas de unidades de conservação e áreas prioritárias para conservação com prioridade extremamente alta. Como foi mostrado na Figura 4, essas áreas cobrem grande parte da costa Sul e Sudeste brasileira, como consequência, muitos pontos foram excluídos da análise *fuzzy*. Já na segunda etapa, os pontos que apresentaram Baixa possibilidade de implantação de usinas eólicas *offshore* foram assim classificados por estarem longe da costa, apresentando baixa velocidade do vento ou por estarem localizados em águas mais profundas.

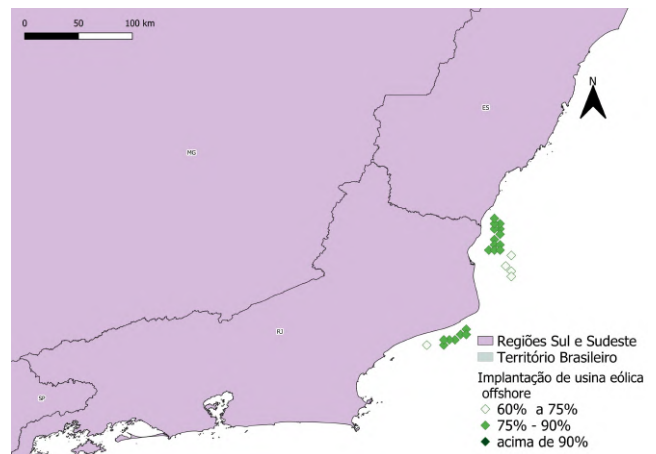


Figura 7. Locais favoráveis para implantação de usinas eólicas *offshore* localizados nos estados do Rio de Janeiro e Espírito Santo.

7. CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo propor uma metodologia para avaliar os locais mais favoráveis para implantação de usinas eólicas *offshore* nas regiões Sul e Sudeste do Brasil, regiões de maior consumo de energia elétrica do país. Para

esta análise foram utilizados um SIG em conjunto a um sistema de inferência *fuzzy* para a estimativa dos locais mais favoráveis. A lógica *fuzzy* permite flexibilidade na análise, de acordo com as ações a serem implementadas durante a tomada de decisão. Salienta-se que as premissas utilizadas no estudo agregam incertezas devido às percepções definidas na base de regras, que podem divergir de acordo com a ótica de diferentes especialistas.

Os 25 locais mais favoráveis para a implantação das usinas eólicas *offshore* ficaram entre os estados do Rio de Janeiro e Espírito Santo. Os outros locais que estavam presentes na análise inicial, apresentaram-se como menos favoráveis por um dos 3 fatores ou junção desses fatores: distância elevada da costa ou de linhas de transmissão, baixas velocidade do vento, elevada profundidade da água. Existem ainda, os locais que foram excluídos da análise, devido às restrições técnicas, sociais e, principalmente, ambientais.

Espera-se que os resultados da metodologia possam auxiliar nas análises e tomada de decisão dos planejadores e agentes interessados em novos projetos de construções de usinas eólicas *offshore*. Além disso, os resultados deste trabalho podem auxiliar estudos de avaliação do potencial eólico *offshore* nas regiões de maior consumo de energia elétrica do Brasil, podendo também ser expandido e aplicado em outras regiões do território brasileiro.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica) pelo apoio na estruturação do artigo e discussões de resultados do estudo de caso. Este trabalho contou com os seguintes auxílios financeiros: da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001; Projeto Universal nº 422044/2018 0, nº 408898/2021-6, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq); processo nº 2021/08832-1, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP); e INCT-INNERGE.

REFERÊNCIAS

ABEEólica (2018). Boletim anual de geração eólica 2017. Brasil (1997). Lei nº 9.478, de 6 de agosto de 1997. *Dispõe sobre a política energética nacional, as atividades relativas ao monopólio do petróleo, institui o Conselho Nacional de Política Energética e a Agência Nacional do Petróleo e dá outras providências.*

Calado, G. and Castro, R. (2021). Hydrogen production from offshore wind parks: Current situation and future perspectives. *Applied Science*, 11, 1–19.

Cavazzi, S. and Dutton, A.G. (2016). An Offshore Wind e Energy Geographic Information System (OWE-GIS) for assessment of the UK's offshore wind energy potential. *Elsevier - Renewable Energy*, 87, 212–228.

CEPEL (2013). Atlas eólico brasileiro - Mapas temáticos. url: <http://novoatlas.cepel.br/index.php/mapas-tematicos/>.

CPRM-CEDES (2021). Geologia marinha - Projeto Batimetria. url: <http://www.cprm.gov.br/publique/Geologia/Geologia-Marinha/Projeto-Batimetria-3224.html>.

de Lima, G.S.C., Lopes, E.C., Motta, J.G., Jr., R.A., Valverde, M., Suyama, R., and Leite, P.T. (2018). Sustainable development enhanced in the decision process of electricity generation expansion planning. *Elsevier - Renewable Energy*, 563–577.

Gomes, M.S.S., Paiva, J.M.F., Moris, V.A.S., and Nunes, A.O. (2019). Proposal of methodology to use offshore wind energy on the southeast coast of Brazil. *Elsevier*, 327–336.

Haddadi, M., Rabiee, A., and Nikkhah, S. (2022). Location-based uncertainty management of offshore wind farms: A multiple radius robust decision making. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 1–17.

IBAMA-Ministério do Meio Ambiente (2019). Cadastro Nacional de Unidades de Conservação. url: <http://mapas.mma.gov.br/i3geo/datadownload.htm>.

IEA (2018). Global energy and CO2 status report. url: <https://www.connaissancedesenergies.org/sites/default/files/pdf/actualites/geco2017.pdf>.

Lopes, E.C. (2019). *Fuzzy AHP no suporte à decisão para implantação de geradores eólicos sob a ótica do desenvolvimento sustentável*. Master's thesis, Programa de Pós-Graduação em Energia - Universidade Federal do ABC, Santo Anré/SP, Brasil.

Melo, M.N. (2009). *Mapeamento difuso no auxílio da redução dos impactos ambientais em uma usina hidrelétrica*. Master's thesis, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá/MG, Brasil.

MMA (2018). Download de dados geográficos - Ministério do Meio Ambiente. url: <http://mapas.mma.gov.br/i3geo/datadownload.htm>.

ONS (2019). Sistema de informações geográficas do setor elétrico - SIGEL. url: <https://sigel.aneel.gov.br/Down/>.

Peters, J.L., T.Remmers, Wheeler, A.J., Murphy, J., and Cummins, V. (2020). A systematic review and meta-analysis of gis use to reveal trends in offshore wind energy research and offer insights on best practices. *Elsevier - Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 128, 1–16.

Prati, R. (2011). *Sistemas Fuzzy* - Universidade Federal do ABC.

Silva, A.J.V.C. (2019). *Potencial eólico offshore no Brasil: localização de áreas nobres através de análise multicritério*. Master's thesis, UFRJ (COPPE) - Programa de Planejamento Energético, Rio de Janeiro, Brasil.

Silva, A.J.V.C. and Cataldi, M. (2016). Avaliação do potencial de geração eólica offshore na região costeira dos municípios de Cabo Frio e Arraial do Cabo, estado do Rio de Janeiro. *Simpósio Brasileiro de Engenharia Ambiental*, 8.

Vasileioua, M., Loukogeorgakia, E., and Vagionab, D.G. (2017). GIS-based multi-criteria decision analysis for site selection of hybrid offshore wind and wave energy systems in greece. *Elsevier - Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 745–757.

Zaparolli, D. (2019). Ventos promissores a caminho. *Tecnologia Energia - Pesquisa Fapesp* 275, 78–83.