

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ESTUDO SOBRE O POTENCIAL PARA IMPLANTAÇÃO DE PARQUE EÓLICO
OFFSHORE NA LAGOA DOS PATOS

por

Guilherme Gil Aguiar dos Santos

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, abril de 2023

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

CIP - Catalogação na Publicação

dos Santos, Guilherme Gil Aguiar
Estudo sobre o potencial para implantação de parque
eólico offshore na Lagoa dos Patos / Guilherme Gil
Aguiar dos Santos. -- 2023.
27 f.
Orientadora: Adriane Prisco Petry.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2023.

1. energia eólica. 2. offshore. 3. LCOE. 4. fontes
renováveis. I. Petry, Adriane Prisco, orient. II.
Titulo.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Guilherme Gil Aguiar dos Santos

ESTUDO SOBRE O POTENCIAL PARA IMPLANTAÇÃO DE PARQUE EÓLICO
OFFSHORE NA LAGOA DOS PATOS

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Cirilo Seppi Bresolin
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de concentração: Energia e Fenômenos de Transporte

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Adriane Prisco Petry

Comissão de Avaliação:

Prof^a. Adriane Prisco Petry (presidente)

Prof^a. Thamy Cristina Hayashi

Dr^a. Jussara Maria Leite Mattuella

Porto Alegre, abril de 2023

AGRADECIMENTOS

À minha família, principalmente minha mãe, Marlise Gil Aguiar dos Santos, e pai, Dalmo Oliveira dos Santos, pelo apoio e incentivo. À minha avó, Elsa Maria, que me recebeu em Porto Alegre. À professora Sinara Gomes que me apresentou ao tema de energia eólica durante o ensino médio. À professora Adriane Prisco Petry pela disponibilidade e atenção. À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pela estrutura disponibilizada.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – 2023

ESTUDO SOBRE O POTENCIAL PARA IMPLANTAÇÃO DE PARQUE
EÓLICO *OFFSHORE* NA LAGOA DOS PATOS

Santos, Guilherme Gil Aguiar dos

ggasantos@gmail.com

Resumo.

Considerando o atual cenário de investimentos em energia eólica no Brasil, torna-se necessário estudar o potencial eólico offshore. Estes projetos buscam aproveitar melhores condições de vento sobre superfícies alagadas, ainda que os custos de construção e manutenção sejam mais altos se comparados a projetos onshore. Assim, surge como alternativa para reduzir custos a construção de parques em águas internas, que possuem melhores condições de infraestrutura e menor profundidade média. Utilizando dados públicos de vento, este trabalho buscou estudar o potencial na Lagoa dos Patos. Cinco modelos de turbina foram analisados, calculando os fatores de capacidade, e energia anual gerada por um parque com 5 aerogeradores. Os resultados obtidos mostraram-se altos se comparados a projetos onshore no Brasil e offshore semelhantes. Entretanto, os custos ainda limitam a viabilidade do projeto. A partir da análise da taxa interna de retorno e do custo nivelado de energia, constatou-se que, financeiramente, o projeto tem viabilidade reduzida. Ainda assim, a integração com outros projetos energéticos e a tendência à queda nos custos com o desenvolvimento da tecnologia no Brasil tornam o projeto bastante promissor a longo prazo.

Palavras-chave: energia eólica; offshore; LCOE; fontes renováveis.

STUDY ON THE POTENTIAL FOR IMPLEMENTATION OF AN OFFSHORE WIND FARM IN LAGOA DOS PATOS

Abstract.

Considering the current scenario of investments in wind energy in Brazil, it is necessary to study the offshore wind potential. These projects seek to take advantage of better wind conditions over water surfaces, even though construction and O&M costs are higher compared to onshore projects. Thus, the construction of wind farms in internal waters, which have better infrastructure conditions and lower average depth, emerges as an alternative to reduce costs. Using public wind data, this research sought to study the potential in Lagoa dos Patos. Five turbine models were analyzed, calculating the capacity factors and annual energy generated by a wind farm with 5 turbines. Obtained results were high when compared to onshore projects in Brazil and similar offshore projects. However, costs still limit the viability of the project. From the analysis of the internal rate of return and the levelized cost of energy, it was found that, financially, the project has reduced viability. Still, the integration with other energy projects and the estimates of lower costs due to the development of technology in Brazil make this project promising in the long term.

Palavras-chave: wind power; offshore; LCOE; renewable resources.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	11
3	METODOLOGIA.....	14
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	14
4.1	Análise de diferentes Turbinas	18
5	CONCLUSÃO	21
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	22
	ANEXOS.....	25
	APÊNDICES	26

1 INTRODUÇÃO

Dados os impactos ambientais causados pela utilização de combustíveis fósseis, além das preocupações quanto ao esgotamento de suas reservas, a utilização de fontes renováveis para geração de energia tem recebido atenção de vários países. Na União Europeia, a meta é que 40% da matriz energética seja proveniente de fontes renováveis até 2030 (CONSELHO EUROPEU, 2022). Já no Brasil, conforme meta estabelecida na assinatura do Acordo de Paris em 2015, o objetivo é reduzir em 37% as emissões de gases de efeito estufa até 2025, alcançando redução de 50% até 2030 (BNDES¹, 2022).

Dentre as fontes de energia renováveis, uma das mais destacadas é a energia eólica, que representa cerca de 6% da matriz elétrica mundial (EPE², 2023), e recebe grandes investimentos em países como China, Estados Unidos e Brasil. Segundo o Boletim Anual de 2021 da Associação Brasileira de Energia Eólica e Novas Energias (ABEEólica), 44% dos investimentos em fontes renováveis no Brasil foram realizados no setor eólico. Ainda segundo o boletim, a energia eólica representa 11,8% da matriz elétrica brasileira, sendo a segunda fonte com maior participação. No Rio Grande do Sul, a participação é ainda maior, com 22,7% (Secretaria de Planejamento, Governança e Gestão, 2021). Atualmente, a potência total instalada no Brasil é de 21,57 GW, distribuídos em 795 parques, com destaque para as regiões Nordeste e Sul (ABEEÓLICA, 2022).

No mundo, a capacidade instalada em parques eólicos *offshore* é de 23,1 GW, sendo o Reino Unido o principal mercado, seguido por Alemanha e China (EPE, 2020). Construídos em superfícies alagadas, estes parques buscam aproveitar os ventos mais constantes e com maior velocidade dessas áreas. No Brasil ainda não existem parques *offshore*, embora exista um grande potencial eólico no litoral brasileiro (EPE, 2020). Em 25 de janeiro de 2022, foi editado o Decreto N° 10.946, regulamentando o uso de recursos naturais *offshore* para geração de energia elétrica. Em agosto de 2022, existiam 66 projetos de complexos *offshore* em processo de licenciamento ambiental pelo IBAMA, totalizando perto de 170 GW de potência instalada. No Rio Grande do Sul, são 21 projetos ao longo da costa (IBAMA, 2022).

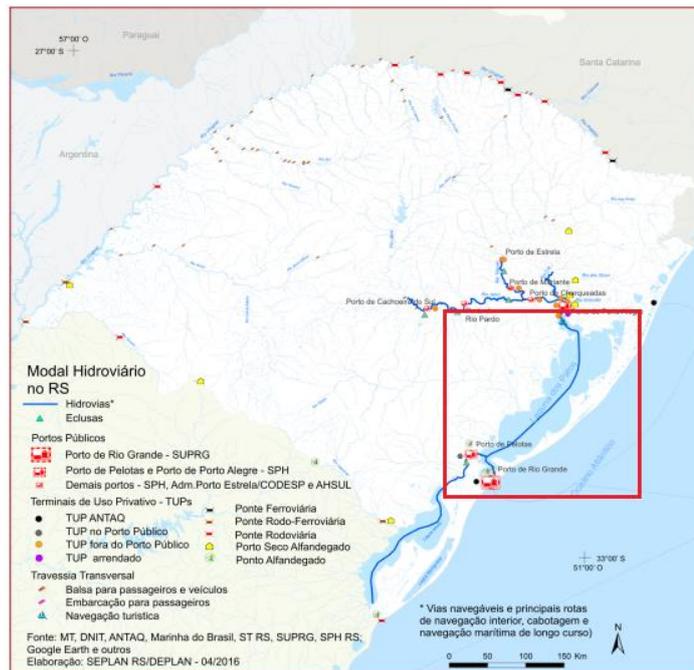
A Lagoa dos Patos é considerada uma das maiores lagunas do mundo com 9.427 km². Estendendo-se da Região Metropolitana de Porto Alegre (região mais populosa do estado) até a cidade de Rio Grande (principal porto do estado). Embora nenhum projeto em licenciamento considere a instalação de aerogeradores na lagoa, esta tem potencial para instalação de 24,5 GW (SDPI³, 2014). Além disso, a baixa profundidade da lagoa é um ponto positivo para a instalação de torres eólicas no local. Na Figura 1 é vista a localização da Lagoa dos Patos no Rio Grande do Sul.

¹ Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social

² Empresa de Pesquisa Energética

³ Secretaria de Desenvolvimento de Promoção do Investimento, Estado do Rio Grande do Sul

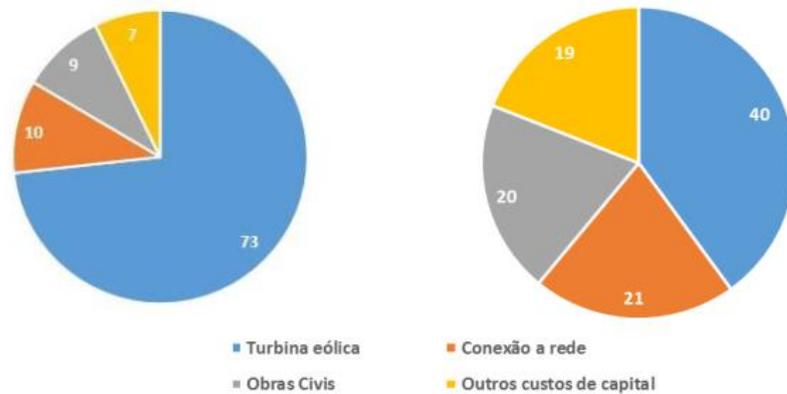
Figura 1 – Localização da Lagoa dos Patos (destacada em vermelho) no Rio Grande do Sul. Fonte: Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul



As turbinas eólicas geram energia elétrica a partir da conversão da energia cinética do vento. Entretanto, a potência de fato gerada está limitada, segundo a teoria de Betz, a um coeficiente de potência (CP) de 0,593 (CUSTÓDIO, 2013).

Com a instalação de parques eólicos offshore, localizados em lagos ou mar aberto, busca-se aproveitar melhores condições de vento nessas regiões quando comparadas a parques *onshore*. Devido à baixa rugosidade de superfícies alagadas, a velocidade do vento nestes locais é maior, enquanto a turbulência dos ventos tende a ser menor (TRAPP, 2009). Por outro lado, os custos de construção e manutenção são maiores, devido à maior complexidade das fundações necessárias, dificuldade de acesso ao local, ambiente mais corrosivo e a necessidade de uso de cabos de transmissão submarinos. Estima-se, para o Brasil, um custo entre US\$2.000/kW e US\$4.000/kW para a construção de um parque eólico *offshore*, aproximadamente o dobro do custo de um parque *onshore*, com custo anual de manutenção entre US\$80/kW e US\$140/kW (EPE, 2020). Na Figura 2, são comparados a distribuição de custos entre projetos *onshore* e *offshore*.

Figura 2 - Comparação entre a distribuição de custos entre projetos *onshore* (esquerda) e *offshore* (direita). Fonte: EPE, 2020

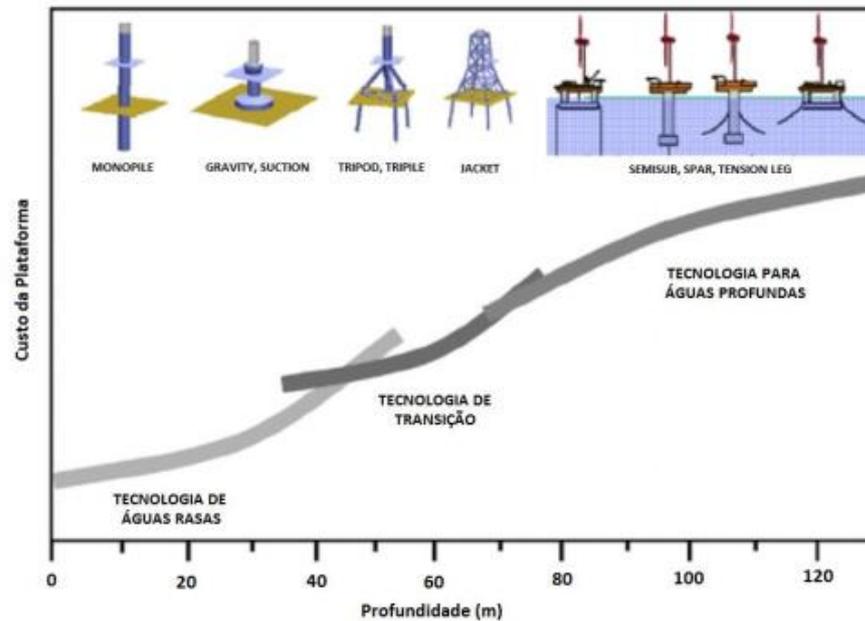


Os maiores custos com obras civis e conexão com a rede de transmissão fazem com que a energia eólica *offshore* tenha um LCOE ⁴ estimado em R\$332,76/MWh. O LCOE, ou custo nivelado de eletricidade, é definido como a razão entre os custos e a geração de energia estimados ao longo da vida útil do projeto, podendo ser entendido como um preço teórico de venda de energia. O valor estimado para energia eólica *offshore*, embora competitivo em relação à energia nuclear, é mais alto que o de outras fontes renováveis, em geral inferiores a R\$250,00/MWh. Em comparação, parques eólicos *onshore* costumam apresentar valores abaixo de R\$150,00/MWh. Ainda assim, fatores importantes que podem influenciar a viabilidade de um projeto eólico *offshore*, como redução de emissões, integração com a indústria de hidrogênio verde e complementariedade com outras fontes não são considerados no cálculo da LCOE (TOLMASQUIM, 2022).

Um dos principais custos adicionais no projeto eólico *offshore* se dá pelo tipo de fundação utilizada para a torre da turbina. A fundação pode ser definida como a estrutura de suporte da torre que fica abaixo da linha do mar (EPE, 2020). A escolha do tipo de fundação é definida pela profundidade do local e condições do solo. Para profundidades baixas, são utilizadas fundações fixas, enquanto em profundidades maiores são necessárias fundações flutuantes, conforme visto na Figura 3.

⁴ Levelized Cost of Energy

Figura 3 - Tipos de fundação para turbinas eólicas offshore. Fonte: EPE, 2020



Para parques eólicos em águas rasas, costuma-se usar o termo *nearshore* (LOPES, 2019). Gonçalves et al. (2022) estudaram locais aptos a um projeto eólico *offshore* no litoral do Rio Grande do Sul, encontrando grande potencial principalmente na região sul. Devido aos fortes ventos, com velocidade igual ou maior a 7 m/s em locais relativamente próximos à costa, reduzindo assim os custos de construção e operação. Ainda assim, destaca-se a necessidade de incentivos governamentais e empresariais para a viabilidade do projeto.

Buscando diminuir custos, alguns projetos estudam a viabilidade de projetos *nearshore* em águas internas. A maior proximidade com a costa e baixa profundidade de lagos torna esta alternativa mais interessante em termos de custo. Nos Estados Unidos, projetos propõem a instalação de aerogeradores na região dos Grande Lagos. O projeto Icebreaker estuda a instalação de 6 aerogeradores com potência total de 21 MW no Lago Erie, próximo à cidade de Cleveland, Ohio. As turbinas, construídas a cerca de 12 km da costa e com 18 m de profundidade, gerariam 75.000 MWh/ano, com fator de capacidade médio de 41,4% (DOE⁵, 2018).

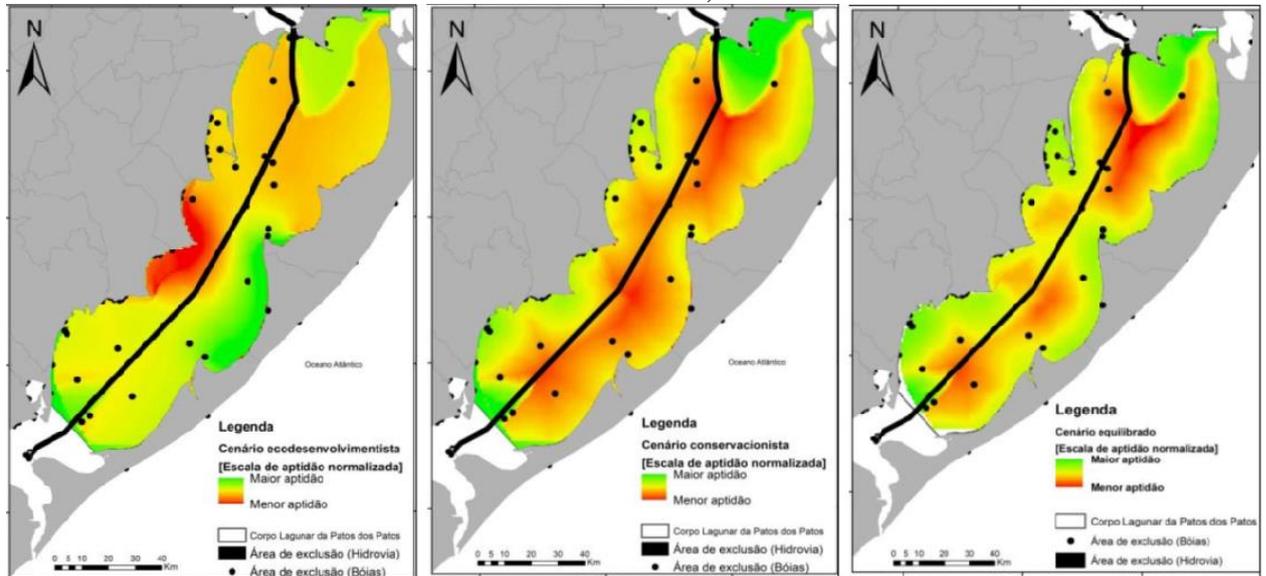
Outro estudo, conduzido pelo Centro de Energia Alternativa e Renovável da Grand Valley State University, utilizou uma estação WindSentinel da AXYS Technologies com tecnologia LWS/LIDAR (sensor laser) para estimar o potencial eólico no Lago Michigan. Ao longo de 3 anos, o sensor coletou dados de 3 locais em 6 altitudes diferentes, variando entre 75 e 175 m. Após um teste inicial a 100 m de uma torre de medição *onshore*, para teste e validação da tecnologia, o sensor foi colocado em outro local mais distante da costa para teste de coleta de dados e comunicação por 85 dias. No segundo ano, o sensor coletou dados por 225 dias e, no último ano do estudo, foram mais 239 dias de coleta de dados. Ao final do estudo, foi identificado um potencial de geração de 7684 kWh com uma turbina de 850 kW, com fator de capacidade de aproximadamente 40%. Notou-se, também, que houve uma importante redução de custos com o uso de torres mais baixas e mais próximas da costa que o esperado (EDMONSON, 2014).

No Brasil, Sena (2018) estudou o potencial para geração de energia eólica na Lagoa dos Patos. Considerando aspectos ambientais, técnicos e socioeconômicos, foram propostos 3

⁵ U.S. Department of Energy

cenários para aptidão do local à energia eólica offshore. Os cenários ecodesenvolvimentista, conservacionista e equilibrado são vistos na Figura 4.

Figura 4 - Cenários propostos para geração de energia eólica offshore na Lagoa dos Patos. Fonte: SENA, 2018



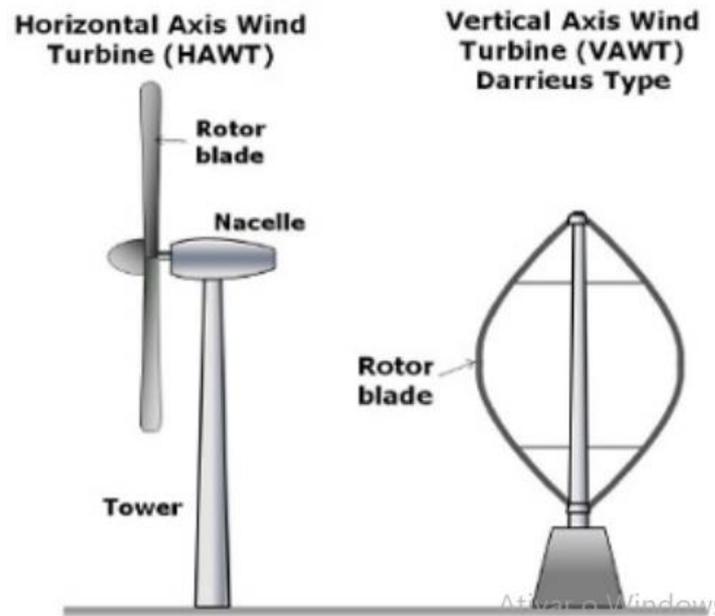
Nota-se que, apesar das áreas de exclusão, existe potencial para a geração de energia eólica offshore na lagoa. Esse potencial também é corroborado por dados públicos de vento, disponíveis no Atlas Eólico do Rio Grande do Sul e no Global Wind Atlas. Desta forma, considerando a infraestrutura já existente na região, junto de aspectos ambientais, sociais e econômicos, busca-se encontrar na lagoa um local adequado para a possível instalação de parque eólico offshore e estudar a viabilidade do projeto.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção, são apresentadas as equações necessárias para o cálculo do potencial eólico de uma região, assim como um breve descritivo das turbinas empregadas para sua conversão.

As turbinas podem ser classificadas em turbina de eixo horizontal e vertical, apresentadas na Figura 5. Embora a maioria das turbinas seja de eixo horizontal, estudos sugerem que a utilização de turbinas de eixo vertical pode aumentar a eficiência de um parque eólico. Segundo Hansen et al. (2021), observa-se uma queda na potência gerada entre 20 e 50% devido à esteira aerodinâmica quando turbinas de eixo horizontal são posicionadas a uma distância de $1,65D$, enquanto turbinas de eixo vertical apresentam aumento de entre 5 e 10% na mesma situação. Ainda assim, devido à menor eficiência individual da turbina de eixo vertical, sua utilização é limitada.

Figura 5 - Turbinas eólicas de eixo horizontal (esquerda) e vertical (direita). Fonte: Boston University, College of Engineering



Conforme visto na figura, as turbinas são compostas por torre (*Tower*), nacelle (*Nacelle*) e rotor (*Rotor blade*). Por conta do baixo impacto ambiental, a energia eólica pode ser utilizada para geração de eletricidade e, também, em conjunto com outros projetos de combustíveis sustentáveis. Tendo recebido um investimento de R\$ 5 milhões do estado do Rio Grande do Sul, o hidrogênio verde (H₂V) é visto como uma alternativa a combustíveis fósseis e pode ser obtido através da eletrólise da água, usando eletricidade de fonte renovável no processo (ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL, 2023). Outro projeto, uma parceria entre Siemens, Porsche e empresas de energia, inaugurou em 2022 uma usina para a produção de combustíveis sintéticos com impacto neutro no clima (*e-fuels*). Com capacidade inicial para produção de 130.000 litros de combustível, as empresas esperam produzir cerca de 550 milhões de litros até 2026, aproveitando o grande potencial eólico na província de Magallanes, no sul do Chile. Além da produção de hidrogênio verde, a planta também filtra o CO₂, formando metanol sintético a partir da combinação de ambos (SIEMENS, 2022).

A expressão da energia cinética contida na massa de ar em movimento é expressa pela equação 1.

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1)$$

em que m é a massa do fluido, em kg, e v é a velocidade do vento, em m/s. Assim, tem-se a potência disponível, conforme a equação 2.

$$P_{dis} = \frac{1}{2}\rho Av^3 \quad (2)$$

Na Eq (2), ρ é a massa específica do fluido, em kg/m³, e A é a área varrida pelas pás da turbina, em m².

Para a análise das turbinas eólicas, são consideradas a energia anual gerada, Eq (3), e o fator de capacidade, dado na Eq (4).

$$EAG = \sum P_i f_i T \quad (3)$$

$$F_C = \frac{EAG}{P_{NT}} \quad (4)$$

Nestas equações, P_i é a potência produzida por uma turbina (dada pela curva característica da máquina, dada pelo fabricante) submetida a velocidade i na altura do eixo da turbina, em kW, f_i é a frequência desta velocidade e T é o tempo em horas (8760h por ano). Ainda, P_N é a potência nominal da turbina, em kW. Para um projeto de parque eólico, utiliza-se a Eq (5) para avaliar a energia anual gerada em um estudo preliminar

$$EAG_{TOTAL} = n F_C P_N \eta_e \eta_d \quad (5)$$

com n sendo o número de turbinas, η_e a eficiência global do parque e η_d o fator de disponibilidade.

A velocidade do vento varia com a altura em relação à superfície, conforme o perfil de velocidades da camada limite atmosférica. Utilizando medições realizadas a uma altura de referência, é possível avaliar a velocidade do vento em qualquer altura empregando a Eq, (6), para uma superfície plana e sem efeitos térmicos relevantes.

$$v(h) = v_{ref} \frac{\ln\left(\frac{h}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_{ref}}{z_0}\right)} \quad (6)$$

Na Eq (6), h_{ref} é a altura onde foram realizadas as medições, em m, v_{ref} é a velocidade em h_{ref} , em m/s, h é a altura desejada, em m, e z_0 é a altura de rugosidade do solo, em m. A rugosidade varia de acordo com a cobertura do local da instalação e seus valores são vistos na Tabela 1.

Tabela 1 – Rugosidade do solo (z_0) para cada tipo de cobertura. Fonte: SDPI, 2014

Tipo de Cobertura	Rugosidade (z_0) [m]
Áreas urbanas	0,7 – 3
Florestas	0,4 – 1
Reflorestamento	0,4 – 0,95
Vegetação de áreas úmidas	0,1 – 0,4
Culturas agrícolas	0,02 – 0,15
Pastagens	0,02 – 0,20
Solo exposto	0,001 – 0,01
Corpos de água	0,0002 – 0,001

Para representar o regime de ventos no local, a função estatística mais adequada é a curva de distribuição de Weibull, dada pela equação (7).

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (7)$$

em que k é o fator de forma adimensional, neste trabalho encontrado no Atlas Eólico do Rio Grande do Sul (2014). Quanto maior o fator de forma, mais constantes são os ventos. C é o fator de escala, em m/s, o qual pode ser estimado pela equação (8), em uma análise preliminar do projeto.

$$\bar{V} \cong (0,9 \pm 0,01)C \quad (8)$$

Na Eq (8), \bar{V} é a velocidade média anual do vento, em m/s. Assim, determina-se o potencial eólico do local. A análise preliminar de viabilidade econômica se dá pela análise da taxa interna de retorno (TIR), dada pela Eq (9):

$$\sum_{t=0}^n \frac{FC_t}{(1+i)^t} = 0 \quad (9)$$

em que FC_t é o fluxo de caixa no ano t e i é a TIR.

3 METODOLOGIA

A análise de potencial do projeto foi realizada em 3 etapas: definição do local, análise da Energia Anual Gerada para diferentes turbinas e análise de viabilidade econômica.

O local foi definido a partir de análise de mapas públicos, disponibilizados no Atlas Eólico do Rio Grande do Sul (2014) e no Global Wind Atlas (2023). A partir da velocidade média dos ventos, foi determinado o local do projeto, com a direção dos ventos indicando a orientação das turbinas. Foram analisados, também, os mapas elaborados por Sena (2018) a partir de aspectos ambientais, técnicos e sociais. Com os cenários propostos, foi vista a aptidão do local escolhido ao projeto.

Com a Eq (7), é construída a curva de distribuição de Weibull para representar o regime de ventos no local. O fator de forma k foi obtido no Atlas Eólico do Rio Grande do Sul (2014), utilizando o valor informado para o local *onshore* mais próximo, uma vez que os dados de fator de forma de locais *nearshore* não estão disponíveis no Atlas. O fator de escala C foi determinado através da Eq (8), utilizando a velocidade média dos ventos.

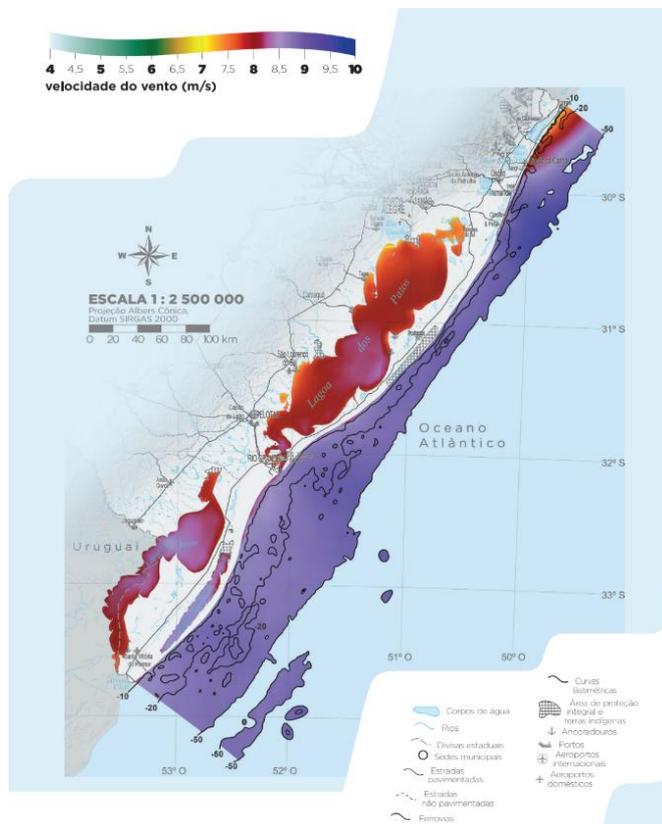
Uma vez que a velocidade dos ventos indicada nos mapas analisados foi avaliada a 100 m, foi necessário usar a Eq (6) para obter a velocidade a 80 m para a análise de 4 modelos de turbinas semelhantes a projetos *onshore* já instalados no Rio Grande do Sul. Com estes dados e a curva de Weibull, determina-se a frequência das velocidades de vento que, junto dos dados disponíveis nas curvas de potência das turbinas, foram utilizados para calcular a energia anual gerada e o fator de capacidade, utilizando Eq (3) e Eq (4), respectivamente. Adicionalmente, foi analisada uma turbina maior, mais comum em projetos *offshore*, considerando uma altura de 140 m e uma altura de referência de 150 m.

Para a análise preliminar de viabilidade econômica, considerou-se um parque constituído por 5 turbinas, com energia anual gerada calculada a partir da Eq (5). Foi encontrada, com a Eq (9), a taxa interna de retorno que determina a viabilidade do projeto. Calculou-se também a LCOE, definida como o preço teórico de venda de energia. Assim, determinou-se o valor de tarifa de energia correspondente a uma TIR nula.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

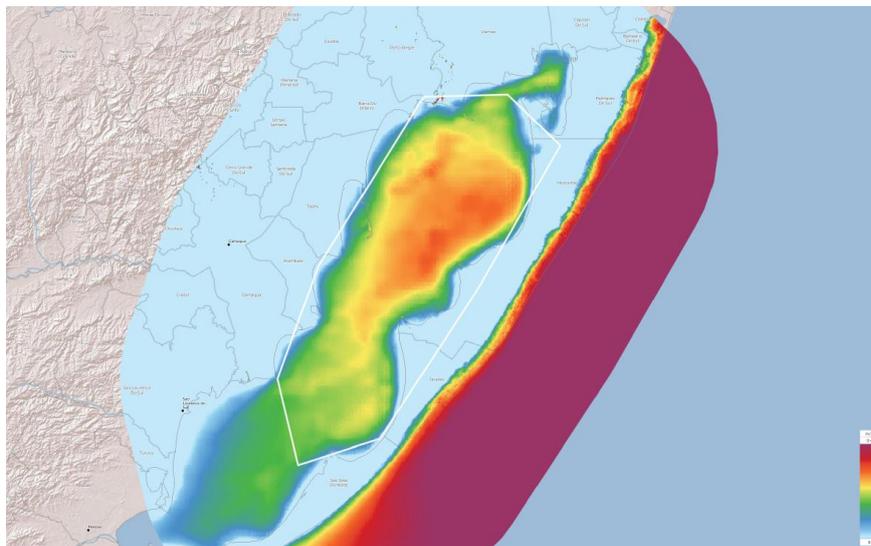
Partindo da análise dos mapas disponíveis no Atlas Eólico do Rio Grande do Sul (2014) e no Global Wind Atlas (2023), percebe-se que há duas regiões de interesse. Na Figura 6, é visto o mapa com velocidades de vento a 100 m na região da Lagoa dos Patos, segundo o Atlas do Rio Grande do Sul (2014).

Figura 6 – Mapa com velocidade média do vento (m/s) na Lagoa dos Patos. Fonte: SDPI, 2014



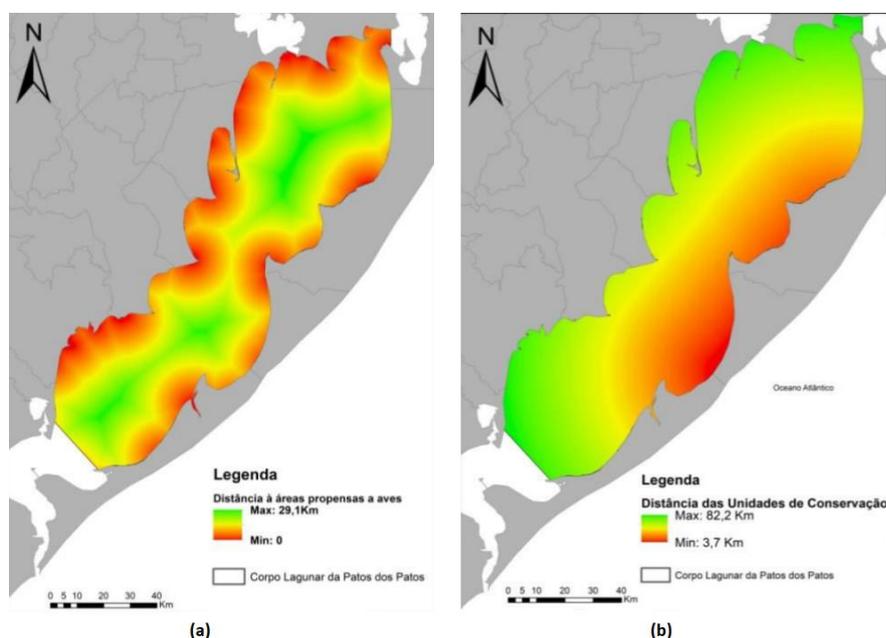
Segundo o mapa, a região central da costa leste da lagoa, entre os municípios de Tavares e São José do Norte, apresenta ventos com velocidade de cerca de 8,5 m/s, maior que outras regiões da lagoa. Entretanto, o Global Wind Atlas (2023) oferece um cenário diferente, conforme mostrado na Figura 7.

Figura 7 – Mapa com velocidade média do vento (m/s) na Lagoa dos Patos. Fonte: Global Wind Atlas, 2023



É visto que a região central segue tendo ventos de 8,5 m/s. Entretanto, uma região mais ao norte no município de Mostardas, apresenta ventos mais intensos, chegando a 8,7 m/s a 100 m de altitude. Para definição do local, foram analisados também fatores ambientais, considerados nos mapas da Figura 8.

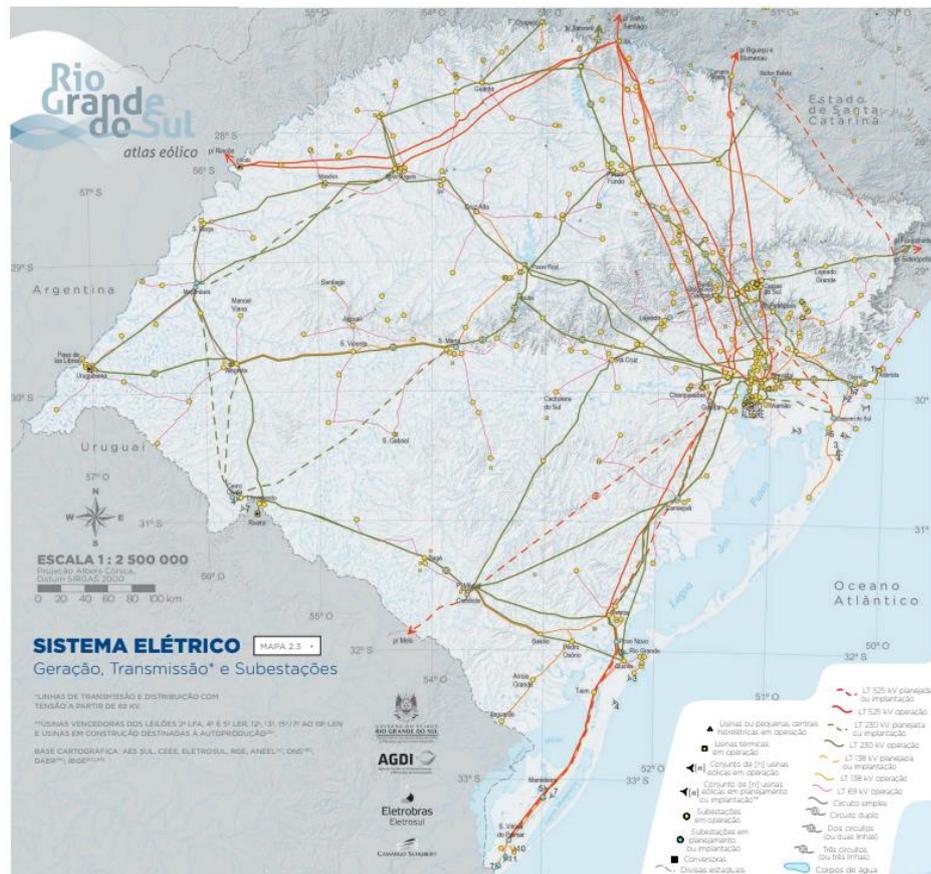
Figura 8 - Mapas com distâncias às áreas propensas a aves (a) e distâncias de Unidades de Conservação (b). Fonte: Sena, 2018.



Em relação às áreas propensas a aves, ambas as regiões de interesse estão a distâncias mínimas, assim como maior parte da costa da lagoa. Já quanto às Unidades de Conservação, percebe-se que, embora ambas regiões estejam próximas, a área central está a uma distância menor se comparada à área norte.

Quanto à infraestrutura, o principal fator analisado foi a distância de linhas de transmissão e subestações. No mapa da Figura 9, é possível ver o sistema elétrico do estado do Rio Grande do Sul.

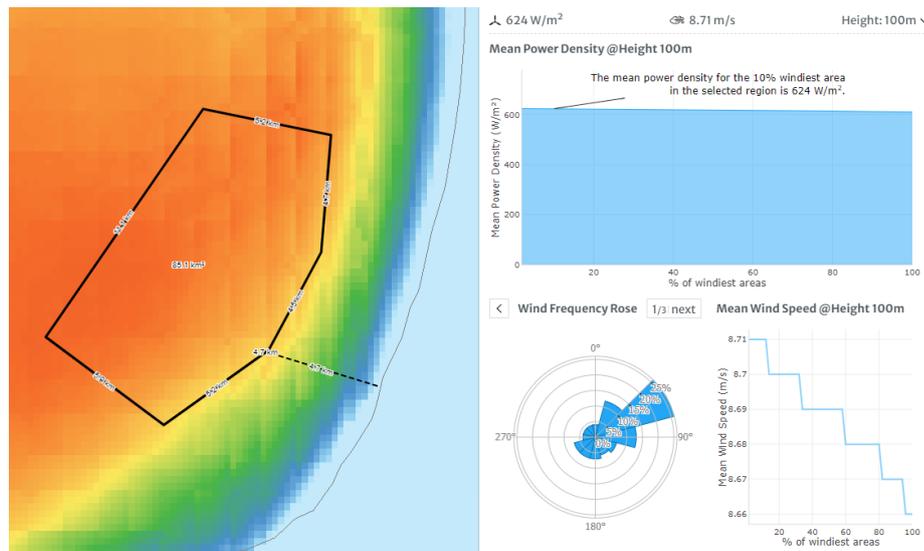
Figura 9 – Sistema elétrico do Rio Grande do Sul. Fonte: SDPI, 2014



Verifica-se que há uma linha de transmissão e uma subestação ativas na região de Mostardas, enquanto a área mais ao sul entre Tavares e São José do Norte não dispõe da infraestrutura necessária. Desta forma, segundo as informações analisadas, foi definida a costa de Mostardas como local mais indicado para a análise de um projeto eólico. Essa escolha é corroborada pelo cenário equilibrado proposto por Sena (2018), visto na Figura 4.

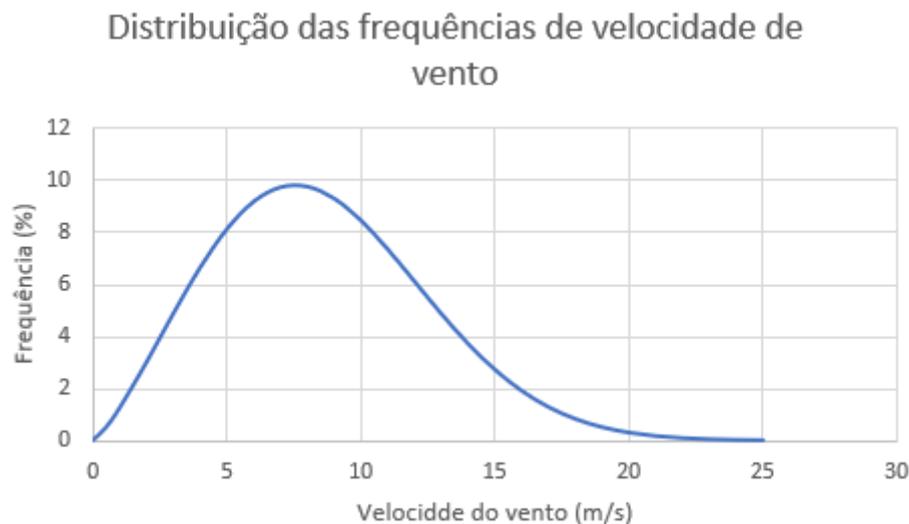
Para uma análise mais detalhada do local, foi utilizado o Global Wind Atlas (2023). A área selecionada, que fica a cerca de 5 km da costa, apresenta ventos de 8,71 m/s, predominantemente no sentido nordeste-sudoeste a uma altura de 100 m, conforme mostrado na Figura 10. Por fim, segundo dados da Marinha do Brasil (2013), a profundidade da lagoa neste local fica entre 5 e 7 metros, possibilitando a construção das torres na fundação do tipo *monopile*. Este tipo é mais simples e não requer preparação do solo, reduzindo os custos do projeto.

Figura 10 – Dados de vento na região escolhida. Fonte: Global Wind Atlas, 2023



O sentido dos ventos indica a orientação das turbinas no projeto. Com os dados apresentados, foi construída a curva de Weibull da região, para representar a distribuição dos ventos na região. Considerou-se um fator de forma k de 2,3 (SDPI, 2014) e um fator de escala C de 9,68 m/s. Utilizando o Microsoft Office Excel, foi obtida a curva de distribuição para estes fatores na Figura 11.

Figura 11 – Curva de distribuição das frequências de velocidade de vento.



4.1 Análise de diferentes Turbinas

Definindo a altura do rotor em 80 m, determinou-se a velocidade do vento nesta altura. Para a rugosidade da superfície, foi utilizado o valor de 10^{-4} (Trapp, 2009). Assim, foi encontrada uma velocidade média de 8,57 m/s. Para a definição da turbina, 4 modelos foram analisados: GE 3.2-130, Vestas V112-3.0, Vestas V112-3.45, WEG AGW 110/2.2. Na Tabela 2 são apresentados os principais dados das turbinas consideradas, conforme dados dos fabricantes.

Tabela 2 – Principais dados das turbinas analisadas

TURBINA	Potência nominal [kW]	Diâmetro do rotor [m]	Velocidade de início [m/s]	Velocidade de corte [m/s]
GE 3.2-130	3.200	130	3	25
Vestas V112-3.0	3.000	112	3	25
Vestas V112-3.45	3.450	112	3	25
WEG AGW 110/2.2	2.200	110	3	20

Foram selecionadas turbinas consideradas em projetos e estudos semelhantes, com diâmetro de rotor de aproximadamente 120 m. A partir dos modelos selecionados, calculou-se a energia anual gerada e o fator de capacidade. Resultados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Energia anual gerada e fator de capacidade das turbinas analisadas

TURBINA	POTÊNCIA NOMINAL [kW]	EAG [MWh]	FC [%]
GE 3.2-130	3.200	15.960	56,9
Vestas V112-3.0	3.000	13.724	52,2
Vestas V112-3.45	3.450	14.891	49,3
WEG AGW 110/2.2	2.200	11.054	57,4

Verifica-se que os fatores de capacidade das 4 turbinas analisadas apresentaram valores altos, com destaque para a turbina WEG. Como comparação, segundo Boletim da ABEEólica (2021), o fator de capacidade médio no Brasil em 2021 foi de 43,6%. No Rio Grande do Sul, o maior fator registrado no mesmo ano foi de 41,3%, no mês de setembro. Ainda, Trapp (2009) obteve um fator de capacidade de 51,8% para a turbina Vestas V112-3.0, em estudo de projeto *offshore* na praia do Cassino em Rio Grande/RS. Para a análise econômica de um parque com 5 turbinas, foram considerados um fator de disponibilidade de 98% e eficiência de 97%. Assim, foram obtidos os seguintes resultados, apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Energia anual gerada e potência instalada de parques com 5 turbinas

TURBINA	POTÊNCIA NOMINAL [kW]	POTÊNCIA INSTALADA [kW]	EAG _{TOTAL} [MWh]
GE 3.2-130	3.200	16.000	75.858
Vestas V112-3.0	3.000	15.000	65.231
Vestas V112-3.45	3.450	17.250	70.780
WEG AGW 110/2.2	2.200	11.000	52.544

Para a altura de 140 m, foi encontrada uma velocidade média de vento de 9,28 m/s. Foi analisada a turbina de referência IEA Wind 15 MW Offshore, com potência de 15 MW, diâmetro de rotor de 240 m e velocidades de início de 3 m/s e de corte de 25 m/s. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Resultados de análise da turbina de 15 MW (140 m)

Energia Anual Gerada [MWh]	72.804
Fator de capacidade [%]	55,407
Potência instalada [kW]	75.000
Energia Anual Gerada Total [MWh]	346.040

Nota-se que a turbina de 15 MW teve um fator de capacidade calculado semelhante às opções menores, embora a maior potência instalada resulte em maior energia anual gerada. Com estes valores de energia anual gerada pelo projeto, foi realizada a análise preliminar de viabilidade econômica. Foi considerado um custo médio de US\$2.000/kW para construção do complexo e US\$80/kW ano para manutenção (EPE, 2020), com cotação de US\$1=R\$5,06⁶, taxa de juros de 6,15% e tarifa de venda de energia de R\$237,48 (2022). O IPCA considerado foi o acumulado de 12 meses de fevereiro de 2023 (5,6%). Foi utilizada planilha de cálculo disponibilizada pelo NIEPIEE UFRGS. Assim, foram obtidos os valores apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Taxa interna de retorno para as turbinas analisadas

TURBINA	POTÊNCIA INSTALADA [kW]	EAG _{TOTAL} [MWh]	TIR [%]
GE 3.2-130	16.000	75.858	-3,56
Vestas V112-3.0	15.000	65.231	-7,42
Vestas V112-3.45	17.250	70.781	-9,94
WEG AGW 110/2.2	11.000	52.544	-3,21
IEA 15MW	75.000	310.620	-4,81

Percebe-se que a WEG AGW 110/2.2, além de apresentar o maior fator de capacidade, possui maior taxa de retorno. Ainda assim, a TIR não indica que o projeto seja viável.

Por outro lado, não se pode descartar o potencial do projeto. Segundo Tolmasquim et al. (2022), o custo médio de geração de energia elétrica, ou LCOE, é de R\$332,76/MWh para parques eólicos *offshore*. Entretanto, estima-se que este valor caia nos próximos anos, o que aumentaria a competitividade da energia eólica *offshore*. O estudo apresenta ainda 2 cenários para a evolução do LCOE de projetos eólicos *offshore*, com estimativas de que o valor seja de entre R\$216/MWh e R\$269/MWh até 2030, chegando a valores abaixo de R\$200/MWh até 2040. Outras estimativas propõem redução nos custos totais entre 11 e 30% até 2030, dependendo da velocidade de crescimento do mercado, com custos médios de investimento chegando a US\$3.000/kW em 2025 e US\$2.000/kW até 2040 (EPE, 2020).

Como comparação, foi calculado o LCOE do projeto com a turbina WEG AGW 110/2.2, que apresentou maior taxa interna de retorno, alcançando o valor de R\$253,60/MWh. Ainda que superior ao valor médio de plantas eólicas *onshore*, o projeto analisado tem valor bastante abaixo da média para eólica *offshore*, já próximo de outras fontes de energia. Considerando também outros fatores positivos não incluídos nos cálculos de TIR e LCOE, como a integração com a indústria de hidrogênio verde, nota-se que há um bom potencial para projeto eólico *nearshore* na Lagoa dos Patos.

⁶ Cotação em 31 de março de 2023

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi avaliado o potencial eólico *nearshore* na Lagoa dos Patos. A partir da análise de dados públicos de vento e aspectos técnicos e ambientais, foi definido um local na costa leste da lagoa, no município de Mostardas/RS. Foram calculados a energia anual gerada e o fator de capacidade de 5 modelos de turbinas. Por fim, foi realizada uma análise preliminar de viabilidade econômica, com o cálculo da taxa interna de retorno das turbinas consideradas.

Com a análise dos dados públicos de vento, verificou-se que a região da Lagoa dos Patos apresenta elevado potencial eólico. Considerando as velocidades médias de vento mais altas, a constância dos ventos e a baixa rugosidade da superfície, foi possível chegar a um projeto bastante eficiente. Comparado a parques *onshore* já instalados no Brasil e projetos *offshore* semelhantes, viu-se que as turbinas consideradas produziram altos valores de fator de capacidade, indicando grande aptidão à geração de energia. Para uma análise mais definitiva, porém, é aconselhável a busca por dados experimentais para validar o potencial eólico local, conforme realizado no estudo da Grand Valley State University (2014).

Em relação a aspectos ambientais e técnicos, notou-se que a região norte da lagoa é mais apta à instalação de um projeto eólico, visto a maior proximidade com linhas de transmissão já existentes e menor influência de Unidades de Conservação se comparado à costa sul da lagoa. Ainda, considerando a batimetria do local, percebeu-se que há a possibilidade de utilização da fundação do tipo *monopile*, reduzindo os custos de construção.

Os custos, entretanto, são os maiores desafios da tecnologia eólica *offshore*. Embora existam estimativas de redução, o investimento ainda é muito alto se comparado à energia eólica *onshore* e outras fontes de energia renováveis. Ainda assim, o alto potencial energético, a redução no impacto ambiental e a integração a outros projetos energéticos indicam que a instalação de parques eólicos *nearshore* no local pode ser viável a longo prazo. Com o objetivo de tornar a análise econômica mais definitiva, aconselha-se, em uma análise futura, considerar o impacto financeiro da integração do parque eólico a um projeto de produção de hidrogênio verde, por exemplo, e a queda no custo de investimento decorrente do desenvolvimento da indústria *offshore* no Brasil, uma vez que se trata de uma tecnologia ainda inexplorada no país.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEEólica, **“Boletim Anual”**, 2021. Disponível em: <https://abeeolica.org.br/energia-eolica/dados-abeeolica/>. Acessado em 07/02/2023.

Atlas eólico: Rio Grande do Sul/elaborado por Camargo Schubert Engenheiros Associados, Eletrosul Centrais Elétricas S.A.; dados do modelo mesoescala fornecidos por AWS TruePower. – Porto Alegre: SDPI: AGDI, 2014. 116p.: il., mapas; 32,6x31,4 cm. Disponível em: <https://sema.rs.gov.br/atlas-eolico-do-rs>.

Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul/Rio Grande do Sul. Secretaria de Planejamento, Governança e Gestão. Departamento de Planejamento Governamental. – 6. Ed. – Porto Alegre: Secretaria de Planejamento, Governança e Gestão. Departamento de Planejamento Governamental, 2021. 203 p.: il. Disponível em: <https://atlassocioeconomico.rs.gov.br/edicao>.

BNDES, **“Painel NDC - nossa contribuição para as metas de redução de emissões do Brasil”**, 2023. Disponível em: https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/desenvolvimento-sustentavel/resultados/emissoes-evitadas!/ut/p/z1/04_iUIDg4tKPAFJABpSA0fpReYllmemJJZn5eYk5-hH6kVFm8eaB7s4ejiaGPhY-_pYGgeaepuYmxv5GjkbG-l76UfgVFGQHKgIAyCzcpq!!/. Acessado em 10/02/2023.

Centro de Hidrografia da Marinha, **“LAGOA DOS PATOS”**, 2013. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-segnav-cartas-raster-347>. Acessado em 16/03/2023.

Conselho Europeu, **“Objetivo 55’: Conselho chega a acordo sobre metas mais ambiciosas para as energias renováveis e a eficiência energética”**, 2022. Disponível em: <https://www.consilium.europa.eu/pt/press/press-releases/2022/06/27/fit-for-55-council-agrees-on-higher-targets-for-renewables-and-energy-efficiency/>. Acessado em 10/02/2023.

CUSTÓDIO, R. **Energia eólica para a produção de energia elétrica**. 2. ed. Rio de Janeiro: Synergia, 2013. 340 p.

DTU, **Global Wind Atlas**, 2023. Disponível em: <https://globalwindatlas.info/en>.

EDMONSON, J. **Lake Michigan Wind Offshore Feasibility Assessment Final Report**. 2014. 322 p. Technical Report – Michigan Alternative and Renewable Energy Center, Grand Valley State University, Muskegon, Michigan, 2014. Disponível em: <https://tethys.pnnl.gov/sites/default/files/publications/Boezaart-et-al-2014.pdf>.

EPE, **“Matriz Energética e Elétrica”**, 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matrizenergetica-e-eletrica>. Acessado em 11/02/2023.

EPE. **Roadmap Eólica Offshore Brasil: Perspectivas e caminhos para a energia eólica marítima**. Brasília: 2020. 140 p. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/roadmap-eolica-offshore-brasil>.

GAERTNER, E., RINKER, J., SETHURAMAN, L., ZAHLE, F., ANDERSON, B., BARTER, G., ABBAS, N., MENG, F., BORTOLOTTI, P., SKRZYPINSKI, W., SCOTT, G., FEIL, R., BREDMOSE, H., DYKES, K., SHIELDS, M., ALLEN, C., VISELLI, A. 2020. **Definition of the IEA 15-Megawatt Offshore Reference Wind**. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-5000-75698. Disponível em: <https://www.nrel.gov/docs/fy20osti/75698.pdf>.

GONÇALVES, P.S., KRUSCHE, N., GOMES, C.S., PINHEIRO, H. Estudo preliminar da seleção de locais para instalação de parques eólicos offshore no litoral do Rio Grande do Sul. **Revista Interdisciplinar de Pesquisa em Engenharia**, Universidade de Brasília, v. 8, n. 1, p. 48-58, 2022. Disponível em: <https://periodicos.unb.br/index.php/ripe/article/view/35421>.

GOVERNO DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL. “**RS aposta no hidrogênio verde como combustível do futuro**”, 2023. Disponível em: <https://estado.rs.gov.br/rs-aposta-no-hidrogenio-verde-como-combustivel-do-futuro>. Acessado em 03/03/2023.

HANSEN, J.T., MAHAK, M., TZANAKIS, I. Numerical modelling and optimization of vertical axis wind turbine pairs: A scale up approach. **Renewable Energy**, v. 171, p. 1371-1381, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096014812100344X>.

IBAMA, “**Complexos Eólicos Offshore – Projetos com Licenciamento Ambiental Abertos no IBAMA**”, 2022. Disponível em: http://www.ibama.gov.br/phocadownload/licenciamento/2022-08-11_Usinas_Eolicas_Offshore_Ibama.pdf. Acessado em 08/02/2023.

LOPES, G. **Dimensionamento estático de estrutura nearshore para captura de energia ondomotriz e eólica**. 2019. 91p. Projeto de Graduação – UFRJ/Escola Politécnica/Curso de Engenharia Mecânica, Rio de Janeiro/RJ, 2019. Disponível em: <http://repositorio.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10031434.pdf>.

SENA, B. **Análise locacional do potencial da Lagoa dos Patos para o aproveitamento sustentável da energia eólica**. 2018. 97p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Programa de Pós-Graduação em Gerenciamento Costeiro, Rio Grande/RS, 2018. Disponível em: https://gerenciamentocosteiro.furg.br/images/dissertacoes/075_Beatriz_Oliveira_de_Sena.pdf

SIEMENS. “**Haru Oni: base camp of the future**”, 2022. Disponível em: <https://www.siemens-energy.com/global/en/news/magazine/2022/haru-oni.html>. Acessado em 03/03/2023.

TOLMASQUIM, M., GUIMARÃES, B., RICARTE, E., NOGUEIRA, E., MORAIS, R. **Estudo Cadeia de Valor: Eólica Offshore**. Sumário Executivo. 2022. 55 p. Disponível em: <https://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2023/01/Sumario-Executivo.pdf>.

TRAPP, B. **Análise de Viabilidade de Uma Fazenda Eólica Offshore no Rio Grande do Sul**. 2009. 20f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/24094>.

U.S. Department of Energy. *In: Final Environmental Assessment LEEDCo Project Icebreaker*. Cleveland, Ohio, setembro de 2018. Disponível em:

<https://www.energy.gov/sites/prod/files/2018/09/f55/EA-2045-LEEDCo-Final%20EA-2018.pdf>.

WEG. **“Aerogeradores AGW 110/2.1 e AGW 110/2.2”** Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/hee/hf1/WEG-aerogerador-agw-110-2.1-50030583-catalogo-portugues-br.pdf>. Acessado em 06/03/2023.

WIND TURBINE MODELS. **“Wind turbines database”**. Disponível em: <https://en.wind-turbine-models.com/turbines>. Acessado em 06/03/2023.

ANEXOS

ANEXO A – Batimetria da Lagoa dos Patos



Figura A.1 – Batimetria da Lagoa dos Patos (Fonte: Marinha do Brasil)

ANEXO B – Curvas de Potência

Curva de Potência

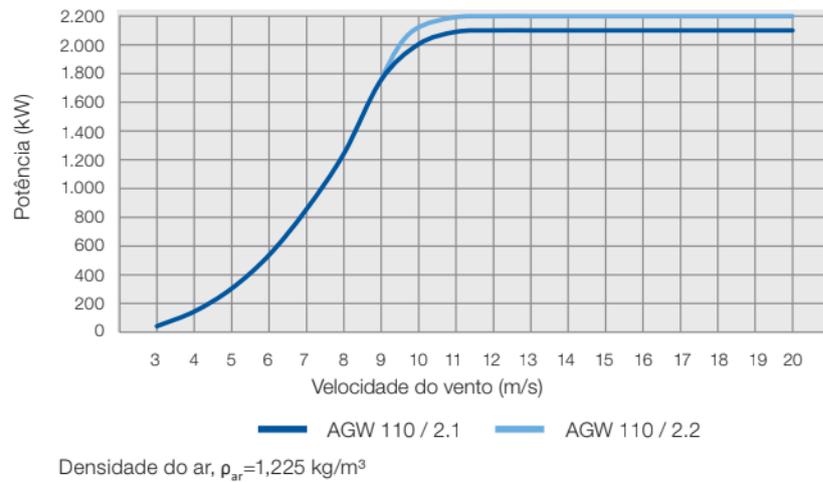


Figura B.1 – Curva de potência WEG AGW 110/2.2 (Fonte: WEG)

Power curve

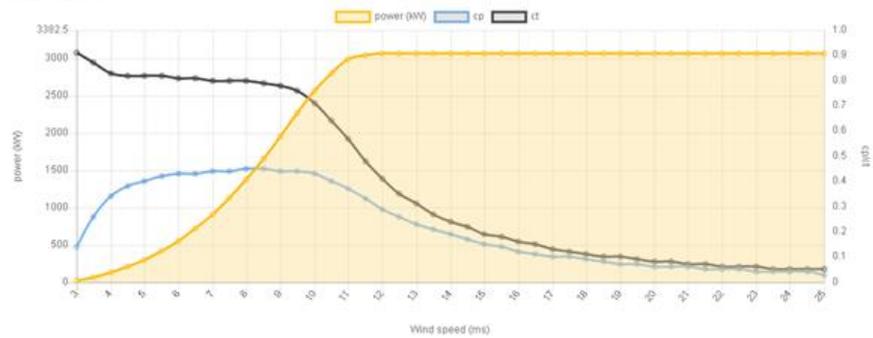


Figura B.2 – Curva de potência Vestas V112-3.0 (Fonte: wind-turbine-models.com)

Power curve

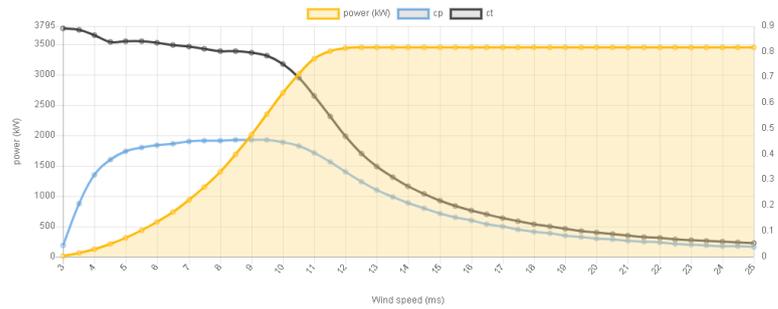


Figura B.3 – Curva de potência Vestas V112-3.45 (Fonte: wind-turbine-models.com)

Power curve

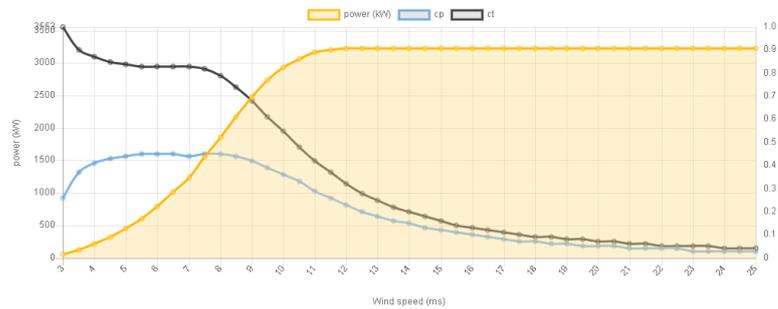


Figura B.4 – Curva de potência GE 3.2-130 (Fonte: wind-turbine-models.com)

APÊNDICES

APÊNDICE A – Tabelas de cálculo de energia gerada

h ref	100	m
v ref	8,71	m/s
k	2,3	
C ref	9,677777778	m/s
z0	0,0001	m

h	80	m
v	8,569318964	m/s
k	2,3	
C	9,521465516	m/s

h=80m	GE 3.2-130		Vestas V112-3.0		Vestas V112-3.45		WEG AGW 110/2.2		
Velocidade [m/s]	Frequência	Potência [kW]	P.f [kW]	Potência [kW]	P.f [kW]	Potência [kW]	P.f [kW]	Potência [kW]	P.f [kW]
0	0,000000%	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1,283136%	0	0	0	0	0	0	0	0
2	3,090647%	0	0	0	0	0	0	0	0
3	5,017387%	56,1	2,814754364	23	1,153999116	7	0,351217122	50	2,508693729
4	6,828079%	216	14,74864962	130	8,876502088	123	8,398536591	150	10,24211779
5	8,330135%	449	37,40230709	301	25,07370698	309	25,7401178	300	24,99040563
6	9,379071%	790,8	74,16969521	557	52,2414267	567	53,17933382	550	51,58489171
7	9,892327%	1235	122,1702376	912	90,21802165	927	91,70187069	850	84,08477895
8	9,856887%	1858	183,1409616	1377	135,7293349	1401	138,0949878	1250	123,2110883
9	9,326078%	2472,6	230,5966125	1954	182,2315703	2006	187,081131	1750	163,2063705
10	8,405516%	2932,7	246,508567	2572	216,1898709	2693	226,3605452	2150	180,7185935
11	7,231398%	3165	228,87375	2988	216,0741754	3252	235,1650664	2200	159,0907583
12	5,946201%	3200	190,2784479	3000	178,3860449	3436	204,3114834	2200	130,8164329
13	4,677045%	3200	149,6654316	3000	140,3113421	3450	161,3580434	2200	102,8949842
14	3,520695%	3200	112,6622267	3000	105,6208375	3450	121,4639631	2200	77,45528084
15	2,536992%	3200	81,18374847	3000	76,10976419	3450	87,52622882	2200	55,81382707
16	1,750171%	3200	56,00546643	3000	52,50512478	3450	60,38089349	2200	38,50375817
17	1,155836%	3200	36,98676507	3000	34,67509225	3450	39,87635609	2200	25,42840098
18	0,730655%	3200	23,38096079	3000	21,91965074	3450	25,20759835	2200	16,07441054
19	0,442023%	3200	14,14475019	3000	13,26070331	3450	15,2498088	2200	9,724515759
20	0,255853%	3200	8,187298852	3000	7,67592674	3450	8,826931575	2200	5,628767961
21	0,141654%	3200	4,532919267	3000	4,24961813	3450	4,887053585	0	0
22	0,074994%	3200	2,399799259	3000	2,249811806	3450	2,587283577	0	0
23	0,037952%	3200	1,214479413	3000	1,13857445	3450	1,309360618	0	0
24	0,018354%	3200	0,587321467	3000	0,550613876	3450	0,633205957	0	0
25	0,008479%	3200	0,271318538	3000	0,25436113	3450	0,292515299	0	0
SOMA P.f [MW]		1,821926469	SOMA P.f [MW]	1,56695733	SOMA P.f [MW]	1,699983533	SOMA P.f [MW]	1,261978077	
EAG [MWh]		15960,07587	EAG [MWh]	13724,25463	EAG [MWh]	14891,85574	EAG [MWh]	11054,92795	
FC		0,569352022	FC	0,522231911	FC	0,49274885	FC	0,573626399	
EAG Tot. [MWh]		75858,2406	EAG Tot. [MWh]	65231,38223	EAG Tot. [MWh]	70780,99035	EAG Tot. [MWh]	52544,07256	

Figura A.1 – Tabela de cálculo de energia gerada para turbinas a 80 m.

h ref	150	m	h	140	m
v ref	9,33	m/s	v	9,284735631	m/s
k	2,3		k	2,3	
C ref	10,36666667	m/s	C	10,31637292	m/s
z0	0,0001	m			

h=80m		IEA 15MW	
Velocidade [m/s]	Frequência	Potência [kW]	P.f [kW]
0	0,000000%	0	0
1	1,068045%	0	0
2	2,582122%	0	0
3	4,222008%	37,17337531	1,569462788
4	5,809737%	546,0706118	31,72526703
5	7,197542%	1350,839351	97,22723449
6	8,267101%	2522,359684	208,526021
7	8,938246%	4088,326548	365,4246667
8	9,175988%	6075,805439	557,5151918
9	8,992082%	8603,398048	773,6246204
10	8,440051%	11744,0618	991,2048306
11	7,604490%	15000	1140,673464
12	6,586781%	15000	988,0171262
13	5,490049%	15000	823,5074059
14	4,406081%	15000	660,9121001
15	3,406202%	15000	510,9302832
16	2,537017%	15000	380,5525203
17	1,820746%	15000	273,111956
18	1,259059%	15000	188,8587847
19	0,838840%	15000	125,8260456
20	0,538385%	15000	80,75772175
21	0,332822%	15000	49,92330214
22	0,198129%	15000	29,71942093
23	0,113555%	15000	17,03322522
24	0,062643%	15000	9,39651362
25	0,033254%	15000	4,988129419
SOMA P.f [MW]		8,311025294	
EAG [MWh]		72804,58158	
FC		0,554068353	
EAG Tot. [MWh]		346040,1762	

Figura A.1 – Tabela de cálculo de energia gerada para turbina a 140 m.

APÊNDICE B – Tabela de cálculo de retorno de investimento

Fluxo de Caixa /Análise Preliminar de Projetos Eólicos (preencher os campos em cinza)

Dados	Potência Nominal da Turbina	2,2 MW	Custo Unitário	R\$ 10.120.000,00	R\$/MWh	Cotação do dólar	R\$ 5,06	RS/US\$
	Número de turbinas (n)	5	Investimento total	R\$ 111.320.000,00		Custo Unitário em dólar	2000,00	US\$/MWh Nominal
	Potência total	11 MW	Financiamento	R\$ 89.056.000,00	80%			
	FC	57,36%	Capital próprio	R\$ 22.264.000,00	45%			
	Eficiência	97%	Investimentos Turbinas	R\$ 50.094.000,00				
	Disponibilidade	98%	Demais Investimentos	R\$ 61.226.000,00				
	eficiência de transmissão até subestação	97%	Taxa de Juros	6,15%	*IPCA (considerado na planilha)			
	Energia anual	50967,18 MWh	Período de pagamentos	14 anos				
	Tarifa de Energia (TE)	R\$ 253,60	Período de Carência	2 anos				
	TIR Nominal	0,00%	TIR Real	-5,31%				

IPCA	5,00%	1	1,06	1,12	1,18	1,24	1,31	1,39	1,46
Demonstrativo de resultados	ano 0	ano1	ano2	ano3	ano4	ano5	ano6	ano7	ano8
Receita Bruta	R\$ 12.925.277,32	R\$ 13.649.092,85	R\$ 14.413.442,05	R\$ 15.220.594,80	R\$ 16.072.948,11	R\$ 16.973.033,21	R\$ 17.923.523,07	R\$ 18.927.240,36	R\$ 19.979.240,36
Creditos de Carbono	R\$ -								
Pis cofins	R\$ 129.252,77								
Receita operacional	R\$ 12.796.024,55	R\$ 13.519.840,08	R\$ 14.284.189,28	R\$ 15.091.342,03	R\$ 15.943.695,34	R\$ 16.843.780,43	R\$ 17.794.270,29	R\$ 18.797.987,59	R\$ 19.849.987,59
Despesas									
O&M R\$/kW ano	R\$ 404,80	R\$ -	R\$ -	R\$ 4.965.477,58	R\$ 5.243.544,33	R\$ 5.537.182,81	R\$ 5.847.265,04	R\$ 6.174.711,89	R\$ 6.520.495,75
Taxa Aneel	R\$ 0,50%	R\$ 64.626,39	R\$ 72.067,21	R\$ 80.364,74	R\$ 89.617,62	R\$ 99.935,83	R\$ 111.442,04	R\$ 124.273,03	R\$ 138.581,33
Deorectação turbinas	R\$ 10%	R\$ 5.009.400,00	R\$ 5.289.936,40	R\$ 5.586.162,28	R\$ 5.898.987,37	R\$ 6.229.330,66	R\$ 6.578.173,18	R\$ 6.946.550,87	R\$ 7.335.557,72
Depreciação outros	R\$ 5%	R\$ 3.061.300,00	R\$ 3.232.732,80	R\$ 3.413.765,84	R\$ 3.604.936,72	R\$ 3.806.813,18	R\$ 4.019.994,72	R\$ 4.245.116,42	R\$ 4.482.940,83
Arrendamento	R\$ 1,50%	R\$ 191.940,37	R\$ 214.154,27	R\$ 238.932,21	R\$ 265.569,76	R\$ 293.596,55	R\$ 323.780,17	R\$ 356.180,57	R\$ 392.504,91
Recultivação R\$/kW anc	R\$ 4,00	R\$ 44.000,00	R\$ 46.464,00	R\$ 49.065,98	R\$ 51.813,68	R\$ 54.715,25	R\$ 57.779,30	R\$ 61.014,94	R\$ 64.431,78
Seguros	R\$ 1%	R\$ 500.940,00	R\$ 528.992,64	R\$ 558.616,23	R\$ 589.898,74	R\$ 622.933,07	R\$ 657.817,32	R\$ 694.655,09	R\$ 733.555,77
TUST R\$/kW mes	R\$ 4,50	R\$ 594.000,00	R\$ 627.264,00	R\$ 662.390,78	R\$ 699.484,67	R\$ 738.655,81	R\$ 780.020,53	R\$ 823.701,68	R\$ 869.828,98
Subtotal despesas	R\$ 9.466.206,75	R\$ 10.013.661,32	R\$ 10.556.775,64	R\$ 11.104.852,87	R\$ 11.664.852,87	R\$ 12.236.963,14	R\$ 12.824.272,30	R\$ 13.440.152,49	R\$ 14.085.197,07

Figura B.1 – Tabela de cálculo de retorno de investimento