

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Bruna de Moraes Suda

**ANÁLISE COMPARATIVA DA VIABILIDADE ECONÔMICA DE UMA
USINA EÓLICA EM RELAÇÃO A UMA USINA FOTOVOLTAICA NO
LITORAL SUL DO RIO GRANDE DO SUL**

Santa Maria, RS
2023

Bruna de Moraes Suda

**ANÁLISE COMPARATIVA DA VIABILIDADE ECONÔMICA DE UMA USINA
EÓLICA EM RELAÇÃO A UMA USINA FOTOVOLTAICA NO LITORAL SUL DO
RIO GRANDE DO SUL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Engenheira de Produção**.

Orientador: Prof. Dr. Cristiano Roos

Santa Maria, RS
2023

Bruna de Moraes Suda

**ANÁLISE COMPARATIVA DA VIABILIDADE ECONÔMICA DE UMA USINA
EÓLICA EM RELAÇÃO A UMA USINA FOTOVOLTAICA NO LITORAL SUL DO
RIO GRANDE DO SUL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Engenheira de Produção**.

Aprovado em 15 de março de 2023:

BANCA EXAMINADORA

Cristiano Roos, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Marlon Soliman, Dr. (UFSM)

Carmen Brum Rosa, Dra. (UFSM)

Santa Maria, RS
2023

RESUMO

ANÁLISE COMPARATIVA DA VIABILIDADE ECONÔMICA DE UMA USINA EÓLICA EM RELAÇÃO A UMA USINA FOTOVOLTAICA NO LITORAL SUL DO RIO GRANDE DO SUL

AUTORA: Bruna De Moraes Suda

ORIENTADOR: Cristiano Roos

A pauta das energias renováveis e de menor impacto ambiental tem se tornado cada vez mais recorrente por conta da crescente demanda de energia e aquecimento global. Nesse contexto, torna-se atrativo compará-las entre si para a tomada de decisão de investimento. Este trabalho objetiva dimensionar uma usina eólica de minigeração e compará-la economicamente com um sistema fotovoltaico de mesma capacidade de geração de energia elétrica. De caráter exploratório e abordagem quantitativa, foram simulados 12 cenários, variando o tipo de sistema, a Taxa Mínima de Atratividade (TMA) e o aproveitamento do recurso natural. A partir disso, foram aplicados os métodos de Valor Presente Líquido (VPL), *Payback* Descontado (PD), Taxa Interna de Retorno (TIR) e *Levelized Cost of Energy* (LCOE). Por fim, apresentam-se os resultados constatando a viabilidade de todos os cenários, sendo o de número 1, um sistema eólico, o mais atrativo.

Palavras-chave: Engenharia econômica. Energia eólica. Energia solar fotovoltaica.

ABSTRACT

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE ECONOMIC FEASIBILITY OF A WIND POWER PLANT IN RELATION TO A PHOTOVOLTAIC PLANT ON THE SOUTH COAST OF RIO GRANDE DO SUL

AUTHOR: Bruna De Morais Suda
ADVISOR: Cristiano Roos

The agenda of renewable energy and less environmental impact has become increasingly recurrent due to the growing demand for energy and global warming. In this context, it becomes attractive to compare them with each other for investment decision making. This work aims to scale a mini generation wind power plant and compare it economically with a photovoltaic system with the same capacity to generate electricity. With an exploratory character and a quantitative approach, 12 scenarios were simulated, varying the type of system, the Minimum Attractiveness Rate (TMA) and the use of the natural resource. From this, the Net Present Value (VPL), Discounted Payback (PD), Internal Rate of Return (TIR) and Levelized Cost of Energy (LCOE) methods were applied. Finally, the results are presented, confirming the viability of all scenarios, with number 1, a wind system, being the most attractive.

Keywords: Economic engineering. Wind energy. Photovoltaic solar energy.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Comparação de LCOE, TIR e TMA entre os cenários.....	31
FIGURA 2 - Mapa com valor do LCOE dos sistemas eólicos por país e autor	32
FIGURA 3 - Mapa com valor do LCOE dos sistemas fotovoltaicos por país e autor.....	33

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - Cenários.....	28
--------------------------	----

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Geração Eólica e Fator de Capacidade Mensal	25
TABELA 2 - Histórico do rendimento da taxa SELIC	26
TABELA 3 - Histórico da Inflação	27
TABELA 4 - Concepção técnica do sistema fotovoltaico.....	28
TABELA 5 - Resultados dos cálculos de Viabilidade Econômica	29
TABELA 6 - Resultados do LCOE	30

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	15
2.1 ENGENHARIA ECONÔMICA	15
2.2 ENERGIA EÓLICA	18
2.3 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	20
2.4 ESTUDOS COMPARATIVOS DE ENERGIA FOTOVOLTAICA E EÓLICA	21
3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	21
3.1 CENÁRIO.....	21
3.2 MÉTODO DE PESQUISA	22
3.3 ETAPAS DA PESQUISA.....	22
4 RESULTADOS	24
4.1 COLETA DE DADOS.....	24
4.1.1 Geração energética.....	24
4.1.2 Tarifa de energia elétrica	25
4.1.3 Taxa de juros do investimento e inflação.....	26
4.1.4 Dimensionamento do Sistema Eólico e Solar Fotovoltaico	27
4.2 ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA	28
5 CONCLUSÃO	34
REFERÊNCIAS.....	35

1 INTRODUÇÃO

O nível de chuvas vem diminuindo ano após ano, agravando o baixo nível dos reservatórios das hidrelétricas (BRASIL, 2021), e a escassez de chuvas no Brasil para a geração de energia é a pior em 91 anos (ONS, 2021). Ambos os eventos ressaltam a necessidade de explorar uma mentalidade de investimento em alternativas além das usinas hidrelétricas, modalidade em que 65,2% da matriz energética brasileira é concentrada. As fontes alternativas de energia, por exemplo, são baseadas em um menor impacto ambiental e são consideradas inesgotáveis, como o sol e o vento. Inclusive, essas fontes de energia, também ditas renováveis, devem responder por 95% do aumento líquido na capacidade de energia global até 2025 (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2020).

Em 2021, a geração de energia elétrica no Brasil atingiu 656,1 TWh (BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL, 2022), um resultado marcado pela queda de 8,5% da fonte hidráulica. Embora a capacidade de geração de energia tenha diminuído, a demanda se mantém ou cresce. Em contrapartida, segundo a mesma fonte, 2021 apresentou a expansão de 21,2% de potência eólica no território nacional. China e EUA também aumentaram sua participação neste mercado em 15% a 76%, resultando em 93 GW de novas instalações no ano e elevando a capacidade eólica global cumulativa para até 743 GW (GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL, 2021).

A indústria eólica teve seu segundo melhor ano de todos os tempos, com o crescimento em 2021 apenas 1,8% atrás do ano recorde de 2020. A Taxa de Crescimento Anual Composta (CAGR) para os próximos cinco anos está prevista em 6,6% (GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL, 2022). A Inteligência de Mercado do Global Wind Energy Council (2022) ainda estima que 110 GW de novas instalações sejam adicionados a cada ano, somando 557 GW até 2026.

A energia mecânica contida no vento vem se destacando e demonstra potencial para contribuir significativamente quanto aos custos de produção, segurança de fornecimento e sustentabilidade ambiental (MARTINS; GUARNIERI; PEREIRA, 2008). A formação dos ventos acontece por conta do aquecimento desigual da Terra pelo Sol e, segundo Silva (1999), cerca de 2% da energia irradiada por este é absorvida pelo planeta e convertida em energia cinética.

De acordo com a Associação Brasileira de Energia Eólica, em novembro de 2021, o número de usinas do setor instaladas chegou à 726, trazendo uma redução de 21.200.000 t/ano de CO₂. Antes de 2025, a indústria ultrapassará 1 TW em instalações cumulativas globais de

energia eólica *onshore* e *offshore* (GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL, 2021). Redução de custos de turbinas maiores, inovações na instalação e redução do risco do investidor impulsionarão ainda mais essa implantação: até 2030, o IRENA espera que o Custo Nivelado de Energia (LCOE) médio da energia eólica *onshore* continue diminuindo 25% em relação aos níveis de 2018, enquanto o LCOE da energia eólica *offshore* diminuirá 55% em comparação com o ano de 2018 (GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL, 2021).

Apresentada como uma tendência mundial, a energia solar fotovoltaica também aparece como uma alternativa no fornecimento de energia renovável. A radiação solar que incide na Terra anualmente é equivalente a dez mil vezes a energia consumida pela população mundial no mesmo período, representando uma alternativa energética promissora (PERAZA, 2013). Essa fonte de energia se destaca por ser autônoma, por não poluir o meio ambiente, por ser considerada uma fonte inesgotável, renovável, de grande confiabilidade e por reduzir custos de consumo no longo prazo (DUTRA et al., 2013). Pela localização geográfica do Brasil, o país recebe elevados índices de incidência da radiação solar e de forma relativamente uniforme se comparados aos índices de países onde a tecnologia fotovoltaica está mais avançada. Isso permite desenvolver projetos solares viáveis em diferentes regiões brasileiras.

O relatório de Custos de Geração Renovável aponta que a energia renovável, sobretudo no caso das tecnologias solar e eólica, já é a fonte de eletricidade mais barata em muitas partes do mundo (IRENA, 2019). Ainda, segundo a mesma referência, quando se fala em oferta e demanda por fonte mundialmente, a geração total de energia eólica aumentou em 21 vezes de 2011 a 2020, correspondendo a 9,8% da participação das fontes de energia na capacidade instalada. A energia solar, no entanto, corresponde a apenas 1,66% da oferta total. Já no Brasil, a Empresa de Pesquisa Energética (2022) aponta a oferta interna de energia eólica como 10,6% do total, e de energia fotovoltaica como 2,47%. Este trabalho de pesquisa envolve este contexto ao comparar as diferenças econômicas entre energia fotovoltaica e eólica no litoral sul do Rio Grande do Sul de acordo com o cenário atual.

Costas litorâneas de regiões como Norte e Nordeste, por exemplo, contam com ventos fortes e constantes durante praticamente o ano todo, e são consideradas áreas com grandes potenciais para aplicações em energia eólica no Brasil. Nesse sentido, este trabalho busca investigar a capacidade local e se justifica por avaliar o potencial eólico na Região Sul, mais especificamente no litoral sul gaúcho. Assim sendo, este trabalho também é relevante por comparar a alternativa eólica com o potencial fotovoltaico, uma das opções de energia mais ofertadas, e a qual espera-se que até 2040 seja a fonte renovável mais importante e significativa para o planeta (BRITO et al., 2011).

Busca-se, cada vez mais, a autossuficiência em energia, assim como a diversificação da matriz energética de um país para suprir a demanda interna (IGNATIUS, 2006). O interesse no potencial eólico e solar do Brasil é notado no setor econômico, à medida que atrai fabricantes e representantes de países importantes do cenário mundial, além de promover mais segurança ao setor de energia elétrica quando se fala de estabilidade de suprimento e do preço da conta de luz para o consumidor final. Assim, este estudo engloba duas fontes renováveis, porque considera cabível uma análise comparativa para fins de investimento e custo-benefício.

O objetivo geral deste trabalho é dimensionar tecnicamente e analisar economicamente a instalação de duas usinas de minigeração de energia elétrica, sendo estas uma fotovoltaica e uma eólica no litoral sul do Rio Grande do Sul. Para que isso fosse viável, foi necessário atender os seguintes objetivos específicos: 1. Dimensionar uma capacidade de geração de energia elétrica aplicável a duas usinas de minigeração de energia elétrica (uma fotovoltaica e uma eólica); 2. Coletar dados técnicos sobre os potenciais de geração de energia elétrica sob condições de movimentação das massas de ar e da irradiação solar; 3. Obter dados econômicos relacionados aos investimentos nas duas usinas de minigeração de energia elétrica; 4. Realizar análises técnicas e econômicas envolvendo as duas usinas de minigeração de energia elétrica.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O referencial teórico trata de definições de Engenharia Econômica, bem como as definições de energia eólica e energia solar fotovoltaica. Depois são apresentados, brevemente, estudos publicados nestas áreas. Em seguida, são abordadas pesquisas em que foi analisada a Engenharia Econômica aplicada em sistemas eólicos e fotovoltaicos, comparando-os ou não.

2.1 ENGENHARIA ECONÔMICA

A fim de analisar sistematicamente situações que apresentam cursos de ação alternativos, o campo da Engenharia Econômica usa de técnicas matemáticas e econômicas (NEWNAN; ESCHENBACH; LAVELLE, 2004). Thuesen e Fabrycky (2000) afirmam que as funções da Engenharia Econômica podem ser sintetizadas em: 1. Determinar o objetivo; 2. Determinar os fatores e meios estratégicos; 3. Avaliar as alternativas de engenharia; 4. Interpretar o significado econômico dos projetos de engenharia; e 5. Assistir no processo decisório.

A Engenharia Econômica compreende os princípios e técnicas necessárias para se tomar

decisões relativas à aquisição e à disposição de bens de capital, nas indústrias e nos órgãos governamentais (GRANT; IRESO, 1970). Conforme Blank e Tarquin (2008), a Engenharia Econômica envolve formular, estimar e avaliar os resultados econômicos para realizar um determinado propósito.

Ao fazer um novo investimento, é de suma importância que a pessoa jurídica, ou física, realize primeiramente uma análise de viabilidade econômica. Para isso, consideram-se os aspectos econômicos do investimento que apresentarão a rentabilidade do projeto e os aspectos financeiros, os quais mostrarão os efeitos do investimento na situação da empresa (CASAROTTO FILHO; KOPITTKKE, 2010). Segundo Hirschfeld (1998), o conhecimento dos valores de tempo e dinheiro são critérios essenciais para qualquer decisão neste tema. Puccini (2011) ressalta, ainda, que os métodos de análise de investimentos se baseiam nos retornos possibilitados pelos fluxos de caixa significativos associados aos projetos em estudo.

Como primeira etapa da análise de investimentos, é interessante estabelecer a taxa que norteará a viabilidade do projeto, a Taxa Mínima de Atratividade. Segundo Hirschfeld (1998), a TMA é uma taxa de juros comparativa e prefixada, com a qual se é comparada a taxa de juros que o dinheiro investido irá proporcionar. Para Casarotto Filho e Kopittke (2000), ao se analisar uma proposta de investimento, deve-se avaliar a sua atratividade de modo a render, no mínimo, a taxa de juros equivalente à rentabilidade das aplicações correntes e de pouco risco.

Em seguida, calcula-se o Valor Presente Líquido (VPL), definido por Casarotto Filho e Kopittke (2000) como o método que, a partir dos fluxos de caixa de um projeto, traz todos os valores futuros para a data presente e, assim, designa o VPL através do resultado da soma de todas as entradas e saídas. Nas palavras de Ehrlich e Moraes (2013), esse processo consiste em colapsar todos os valores para o ponto de tempo zero. Camloffski (2014) acrescenta que o cálculo do VPL descapitaliza todos os valores constantes no fluxo de caixa e os subtrai pelo investimento inicial, apurando, em valores atuais, o ganho financeiro esperado para um projeto. Para tal, a taxa de juros de desconto é o custo de oportunidade da empresa ou é a TMA adotada pela empresa (GOMES, 2013).

Ross et al. (2015) apontam que um projeto cujo VPL é maior ou igual a zero pode ser aceito, enquanto um projeto cujo VPL é menor do que zero deve ser recusado. Casarotto Filho e Kopittke (2000) apresentam o cálculo para encontrar o VPL conforme a Equação 1:

$$VPL = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+i)^t} - FC_0 \quad (1)$$

Onde: VPL é o fluxo de caixa do investimento [R\$]; FC_t é a entrada ou fluxo de caixa no período t [R\$]; n é o número de períodos na linha do tempo; t é o período genérico na linha do tempo; i é a taxa de custo de capital da empresa, TMA [% ao período]; FC_0 é o investimento inicial.

Após o cálculo do VPL, é possível extrair a Taxa Interna de Retorno (TIR). De acordo com Newnan e Lavelle (2000), o método da TIR é provavelmente a técnica exata de análise mais utilizada na indústria. Segundo Melo (2012), depois de ter seu valor definido, a TIR deve ser comparada à TMA no momento da decisão sobre o investimento. Caso seja maior, significa que o investimento é rentável (EHRlich; MORAES, 2013). Abaixo, na Equação 2, está apresentada a equação que define a TIR, conforme Camargos (2013):

$$0 = \sum_{t=1}^n \left(\frac{FC_t}{(1+k)^t} \right) - FC_0 \quad (2)$$

Onde: k é a Taxa Interna de Retorno.

O período de tempo em que ocorre o retorno do investimento é o período de recuperação de capital, segundo Brito (2011). Quanto menor for o tempo de recuperação do investimento, mais atrativo ele será (REBELATTO, 2004). Esse tempo é calculado pelo *Payback* Descontado (PD), que é a forma mais aprimorada de *Payback*, a qual elimina o problema de utilizar fluxos de caixa nominais, passando a considerar o valor do dinheiro no tempo ao utilizar fluxos de caixa descontados (CAMARGOS, 2013). Ross et al. (2015) definem que, no *Payback* Descontado, primeiro se descontam os fluxos de caixa e, então, pergunta-se quanto tempo leva para que os fluxos de caixa descontados se igualem ao investimento inicial.

Por último, o *Levelized Cost of Energy* (LCOE) é a métrica mais frequentemente usada para analisar a viabilidade econômica de um projeto de geração de energia e comparar tecnologias de geração de eletricidade, conforme Branker, Pathak e Pearce (2011). O LCOE, de acordo com Pawel (2014), é definido como o custo de vida útil de um investimento dividido pela energia acumulada gerada por este investimento. O resultado é dado como custo em dinheiro por unidade de energia gerada, e se torna mais atrativo à medida que o custo se apresenta mais baixo. Para calcular o LCOE, é necessário também calcular o fator de recuperação do capital (CRF) para o período analisado, obtido pela Equação 3 (RAMADHAN; NASEEB, 2011).

$$CRF = \frac{(i \times (1+i)^n)}{[(1+i)^n - 1]} \quad (3)$$

Onde: i é a taxa de juros aplicada [% ao período]; n é o período de análise [períodos]. Em seguida, obtém-se o LCOE, segundo a Equação 4:

$$LCOE = \frac{(CI \times CRF) + \sum_n CM}{\sum_n PT} \quad (4)$$

Onde: CI é o custo de instalação [R\$]; CRF é o fator de recuperação do capital; n é o número de períodos [períodos]; CM é o custo de manutenção ao longo do período [R\$]; e PT é a produtividade total [KWh].

2.2 ENERGIA EÓLICA

A fonte de energia eólica tem despontado como uma das mais interessantes em termos de produção, segurança de fornecimento e sustentabilidade ambiental (GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL, 2008; EWEA, 2010). A energia eólica é limpa, amigável ao meio ambiente em termos tecnológicos, é compatível com a geração elétrica em grande escala, tem reduzida poluição ambiental, reduzido consumo de água e não produz CO₂ (SAIDUR et al., 2011). A disponibilidade do potencial de energia eólica varia ao longo do tempo e conforme as características dos recursos naturais de cada local, assim como em relação ao uso e ocupação do solo, à tecnologia disponível e aos aspectos econômicos (VRIES; VUUREN; HOOGWIJK, 2007). De acordo com a Associação Brasileira de Energia Eólica (2021), historicamente o Brasil apresenta o segundo semestre do ano como o período em que mais se registram ventos favoráveis à produção de energia eólica. É durante essa chamada “safra dos ventos” que o setor costuma bater recordes de participação na matriz elétrica nacional, aproximando-se dos 20%.

Segundo Saidur et al. (2011), embora haja impacto negativo na vida selvagem, no campo visual, no ruído e interferência das forças magnéticas geradas pelas turbinas, os impactos causados por elas são pequenos se comparados a outros tipos de fontes de energia. A instalação do projeto é rápida quando comparada a outras fontes energéticas, já que as turbinas eólicas são produzidas em escala industrial e podem ser rapidamente instaladas e conectadas à rede elétrica (CEARÁ, 2001).

Foram realizados estudos sobre viabilidade econômica em sistemas eólicos. Dentre eles, Hulio e Jiang (2018) realizaram uma análise técnica e econômica do potencial de energia eólica

e geração de energia usando parâmetros de Weibull em Karachi, no Paquistão. Através de uma análise de viabilidade, considerando o tempo de operação, reparo e perda de energia, o resultado apontou que a turbina eólica com o melhor resultado apresentou o custo de 0,023 dólares por kWh gerado.

Hulio (2020) avaliou o potencial de energia e recursos eólicos de Sujawal, no Paquistão, através das características do vento do local, que mostraram condições de vento predominantemente adequadas, principalmente no verão. Os métodos utilizados neste estudo mostram o potencial do local correspondente à disponibilidade de geração de energia eólica ao menor custo por kWh. Concluiu-se que Sujawal é adequada para a instalação de turbinas eólicas cujo custo mínimo por kWh é de 0,0298 dólares. Já Kumar e Nair (2011) pesquisaram as características do vento e potenciais de energia em Wainiyaku Taveuni, Fiji. Estimando a produção anual de energia, o cálculo de viabilidade econômica mostrou que o LCOE é de 0,017 dólares por kWh e que o parque seria pago em 20 anos, o que é aproximadamente igual à vida útil de uma turbina.

Hulio e Jiang (2020), através da distribuição de Weibull, fizeram um estudo de caso em uma usina eólica com a finalidade de identificar os efeitos da velocidade do vento no desempenho e custo da energia. Foi encontrada uma forte correlação entre a disponibilidade do sistema de turbina eólica e as condições de vento estáveis que levam a operações estáveis do parque eólico. A análise econômica realizada pelos autores mostrou como melhor resultado o custo de 0,0230 dólares por kWh.

Albadi e El-Saadany (2007) analisaram economicamente projetos de energia eólica em Ontário. Para o estudo, obteve-se o VPL, a TIR e o *Payback* Simples para diferentes turbinas eólicas e diferentes cenários de velocidade de vento. Na mesma linha, Aquila et al. (2017) realizaram a análise de viabilidade através do VPL e *Payback* Simples para uma análise de investimentos capaz de abranger diferentes incertezas e possibilidades para os geradores de energia eólica.

Em outro ponto de vista, Ortiz e Kampel (2011) abordaram a energia eólica *offshore* em seu estudo. Nele, avaliou-se o potencial de energia eólica *offshore* para toda a margem do Brasil através de dados obtidos pelo satélite QuikSCAT entre agosto de 1999 e dezembro de 2009. Concluiu-se, então, que o Rio Grande do Sul está entre as regiões de alta magnitude que se destacaram.

2.3 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

A energia solar vem sendo a fonte que apresenta o maior incremento de capacidade instalada anualmente no mundo (IRENA, 2020). Diferentemente de outras fontes, a energia solar possui seu recurso disperso de maneira relativamente homogênea no território nacional, e a disponibilidade do recurso primário é virtualmente infinita (BRASIL, 2020). A energia solar é uma das alternativas energéticas mais promissoras para os desafios deste milênio (INPE, 2017), e Dutra et al. (2013) descrevem que, para um adequado aproveitamento desse tipo de energia, precisa-se conhecer a radiação solar e a insolação locais, nos horários em que ocorrem.

Abdullahi et al. (2020), na Nigéria, destacaram eventuais barreiras para a implementação de energia solar fotovoltaica. Tratam-se de barreiras tecnológicas no que tange à uma infraestrutura adequada e a falta de capacidade técnica que poderia implicar na rejeição dos potenciais consumidores e de um mercado imaturo. Ainda, foram destacadas a falta de pesquisa e desenvolvimento, além da capacidade de manter o controle da qualidade.

Peraza (2013), no Rio Grande do Sul, constatou que a utilização de conexão existente, linhas de transmissão e subestação são fatores determinantes para a viabilidade econômica. Em seu projeto, identificou que a radiação solar incidente no estado gaúcho é pouco variável, o que resulta na produtividade fotovoltaica variando de 1240 a 1560 kWh/kWp-ano, e obteve uma TIR de 7,5% ao ano. Já Dassi et al. (2017) realizaram um estudo de viabilidade econômico-financeira da implantação de painéis fotovoltaicos em uma Instituição de Ensino Superior de Santa Catarina. Os parâmetros utilizados foram os métodos *Payback* Descontado, Valor Presente Líquido, Taxa Interna de Retorno e Valor Anual Uniforme Equivalente.

Mostafaeipour et al. (2021) realizaram um estudo de caso com uma nova abordagem para classificar os locais mais adequados para a implementação de energia solar. O objetivo foi avaliar a viabilidade técnica e econômica de locais de geração de energia solar nas capitais dos estados do Canadá. Dentre as opções avaliadas, observou-se o LCOE variando entre 0,155 a 0,356 \$/kWh, e um *Payback* Descontado de três a quatro anos. O resultado apresenta que a utilização da energia solar em Winnipeg, Victoria e Edmonton foi econômica, técnica e ambientalmente justificada.

Em uma análise qualitativa, Wang e Qiu (2009) avaliaram a situação e perspectivas da utilização da energia solar no Tibete, China. Embora a intensidade média de radiação anual seja a segunda maior em todo o mundo depois do Saara, a distribuição do potencial de energia solar é desigual devido às diferenças na localização geográfica e condições climáticas. Para cada kW de potência instalada, o custo de investimento foi de 35 mil dólares.

2.4 ESTUDOS COMPARATIVOS DE ENERGIA FOTOVOLTAICA E EÓLICA

Kozlovski e Bawah (2015) fizeram um estudo sobre uma estrutura de decisão financeira para avaliação de estruturas para fontes de energia renováveis em economias em desenvolvimento. O local escolhido foi o país de Gana, na África Subsaariana que, assim como o Brasil, depende largamente da energia proveniente de hidrelétricas. Calculando o VPL, o LCOE, o custo total do ciclo de vida e a depreciação, chegaram à conclusão de que, apesar de um regime de ventos fracos pela maior parte do país, exceto pelas cidades costeiras, o potencial de geração de energia eólica foi superior ao de energia fotovoltaica.

Ali (2006) estudou critérios qualitativos para avaliar a tecnologia de energia sustentável para a área rural de Bangladesh. Foram consideradas, respectivamente, a disponibilidade dos recursos, a complexidade da tecnologia e a eficácia dos custos. Apesar de ter as mesmas considerações de custo de peças e manutenção, o custo de instalação da energia eólica chegou a ser o triplo da energia solar.

Ainda, Alayi et al. (2020) analisaram a otimização e avaliação de um sistema híbrido, eólico, solar e de célula de combustível no fornecimento de eletricidade no noroeste do Irã. É difícil fornecer eletricidade para regiões remotas da rede nacional, portanto, usar sistemas híbridos e fornecer energia sustentável pode ser muito eficaz. Com auxílio do software HOMER, foram calculados o investimento inicial, o custo de operação e o LCOE. O resultado do estudo indicou que o maior custo de investimento para a execução do projeto será alocado nas células fotovoltaicas. Por fim, Rezaei et al. (2020) investigaram a utilização de energia eólica e solar para dessalinização de água do mar e produção de hidrogênio nas áreas costeiras do sul do Irã. A cidade iraniana de Kish apresentou a melhor situação para energia eólica, e a de Jask, para energia solar.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Esta seção é dividida em três subseções nas quais serão abordados, primeiramente, o cenário e o método de pesquisa e, por último, as etapas de pesquisa.

3.1 CENÁRIO

Este trabalho tem como cenário de estudo o litoral sul do Rio Grande do Sul, local escolhido para a coleta de dados relacionados às fontes de geração de energia solar e eólica. De

fato, o estado do Rio Grande do Sul possui vasto potencial para o desenvolvimento de projetos de geração de energia elétrica por meio destas fontes. A Empresa de Pesquisa Energética (2020) aponta que há um potencial eólico de grande magnitude, com capacidade instalável em solo estimada em 103 GW a 100 m de altura, em locais com velocidades médias superiores a 7,0 m/s, correspondendo a uma produção energética estimada em 382 TWh/ano. Enquanto isso, de modo simplificado, o potencial fotovoltaico do Rio Grande do Sul, considerando unicamente as áreas aptas do estado, é da ordem de 1700 TWh/ano, equivalente a 2,7 vezes a produção de energia elétrica no Brasil, no ano de 2017 (RIO GRANDE DO SUL, 2018).

No litoral sul do Rio Grande do Sul, a cidade de Rio Grande, por exemplo, por si só, em se tratando de energia eólica, possui a quinta maior capacidade instalável (GW) do estado (ATLAS EÓLICO DO RIO GRANDE DO SUL, 2014). Dessa forma, demonstrou-se interessante realizar uma comparação com uma das fontes de energia mais populares pelo mundo, a energia solar fotovoltaica.

3.2 MÉTODO DE PESQUISA

A natureza desta pesquisa é classificada como aplicada, uma vez que tem como objetivo gerar conhecimentos para aplicação prática e dirigidos à solução de problemas específicos (PEREIRA, 2016). O método preocupa-se com a representatividade numérica, isto é, com a medição objetiva e a quantificação dos resultados (ZANELLA, 2006) e, portanto, utiliza-se neste trabalho uma abordagem quantitativa, pois emprega a quantificação, realiza a mensuração de variáveis desde a coleta das informações, que nortearam a pesquisa, até a sua análise final (MATIAS-PEREIRA, 2012).

O caráter é exploratório, uma vez que, de acordo com Gil (2010), a pesquisa com esse tipo de objetivo busca entender sobre um determinado tema, acerca do qual se terá um maior conhecimento e aprofundamento no momento de sua conclusão, podendo ocorrer a sugestão de hipóteses. Quanto aos procedimentos técnicos, trata-se de modelagem e simulação. Este método permite a inter-relação simultânea das variáveis pré-definidas a fim de obter um sistema que compreenda as necessidades para a solução do problema proposto (MIGUEL, 2012).

3.3 ETAPAS DA PESQUISA

Para melhor referenciar a escolha da autora sobre os equipamentos a serem utilizados nesta pesquisa, procurou-se primeiramente a existência de parques eólicos na região do local

de estudo escolhido. Foram encontrados dois conjuntos integrados à Rede de Operação do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), sendo eles: 1. o Conjunto Quinta 138 kV com capacidade total instalada de 108 MW, composto pelas usinas Vento Aragano I, UEE Corredor do Senandes II, UEE Corredor do Senandes III e UEE Corredor do Senandes IV; 2. o Conjunto Quinta 69 kV com capacidade total instalada de 64 MW, composto pelas usinas UEE REB Cassino I, UEE REB Cassino II e UEE REB Cassino III. Ambos os conjuntos estão localizados na praia de Cassino, na cidade de Rio Grande, no Rio Grande do Sul.

Em seguida, para obter dados sobre os custos dos equipamentos e da manutenção com a finalidade de aproximar este trabalho a uma avaliação já realizada por técnicos e engenheiros desses conjuntos, considerando a característica natural local, contactou-se os fornecedores dos aerogeradores dessas usinas. No entanto, não houve sucesso no retorno. Ao contatar outra empresa fabricante de geradores eólicos, obteve-se uma resposta generalista sobre o custo dos equipamentos e da manutenção, uma vez que essas informações foram dadas como confidenciais, mas que acabaram por orientar este estudo.

Como terceira etapa, para o cálculo da geração de energia pelo aerogerador, foi necessário diferenciar a capacidade instalada da geração efetiva de energia através do aproveitamento dos ventos nessas usinas. Os potenciais de geração de energia adotados foram estimados pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). O resultado desse cálculo apontou a quantidade de energia gerada anualmente pelo sistema eólico, e que seria objetivada como geração de energia fotovoltaica pelo mesmo período e orçada com uma empresa do setor.

A partir de então, foram estabelecidos os 12 cenários a serem simulados, compostos pela multiplicação de dois sistemas de geração por três Taxas Mínimas de Atratividade e duas Produtividades Totais no ano. Utilizou-se como TMA o rendimento médio da taxa SELIC, a taxa básica de juros da economia, nos últimos 10 anos, tendo como base de dados a Calculadora do Cidadão (BANCO CENTRAL DO BRASIL, 2023). Para a inflação, foi analisada a taxa média anual dos últimos 10 anos, tendo como correção o Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo (IPC-A), do IBGE. Para a coleta desses dados, também se utilizou a Calculadora do Cidadão (BANCO CENTRAL DO BRASIL, 2023). É importante mencionar que também seria interessante ter utilizado as projeções da taxa SELIC e do IPC-A para os próximos 10 anos, divulgadas pelo boletim Focus do Banco Central do Brasil, mas neste estudo optou-se pelo passado. Ainda, para a realização deste trabalho, baseando-se na bibliografia pesquisada, foram realizados os cálculos dos seguintes indicadores econômicos: Valor Presente Líquido, Taxa Interna de Retorno, *Payback* Descontado e LCOE calculados com o auxílio do software Microsoft Excel. Por fim, os dados foram simulados e os resultados econômicos

obtidos foram analisados isoladamente e comparados uns com os outros a fim de verificar a viabilidade econômica da implantação de uma usina de geração de energia eólica e outra solar fotovoltaica.

4 RESULTADOS

Esta seção foi dividida em duas subseções, a primeira traz os dados coletados e a segunda, a análise de viabilidade econômica.

4.1 COLETA DE DADOS

Esta subseção foi dividida em quatro partes. Trazem os dados coletados de cálculo da demanda energética, das tarifas de energia elétrica, das taxas de juros do investimento e da inflação e, por fim, do dimensionamento do sistema eólico e comparação com o solar fotovoltaico.

4.1.1 Geração energética

Para este trabalho não foi definido nenhum valor específico para a demanda energética, mas sim uma estimativa com base nas informações técnicas obtidas com uma fabricante de aerogeradores. Isto porque o projeto não visa o abastecimento em específico de uma máquina ou local, mas a geração de energia equivalente à de uma usina de microgeração ou minigeração distribuída, de acordo com a classificação da ANEEL na Resolução Normativa (REN) nº 1.000/2021, como explicitado nos objetivos deste trabalho.

Conforme a informação recebida pelo Chefe de Vendas da fabricante mencionada, o valor de investimento de um parque eólico é de 7 milhões de reais para cada MW de potência instalada. Assim, dentro da classificação de usina de minigeração de energia, optou-se por uma capacidade instalada de 100 kW, o que corresponde a um investimento de 700 mil reais.

Segundo Silva (2003), o vento pode ser mais intenso em algumas áreas que em outras, pode aumentar sua intensidade por alguns meses do ano, pode aumentar apenas durante algumas horas do dia e, pode, também, parar por longos períodos ininterruptos. Em função dessa variação, é necessário avaliar o aproveitamento do vento para a geração de energia, destacado no documento “Geração Eólica e Fator de Capacidade Mensal” do Boletim de Operação do ONS (2022), na Tabela 1.

Tabela 1- Geração Eólica e Fator de Capacidade Mensal

Mês (2021)	Conjunto Quinta 138 kV	Conjunto Quinta 69 kV
	Aproveitamento	Aproveitamento
Janeiro	43,47%	35,80%
Fevereiro	35,99%	29,38%
Março	36,75%	26,17%
Abril	45,89%	34,02%
Mai	40,20%	32,80%
Junho	47,97%	39,79%
Julho	34,73%	30,78%
Agosto	36,75%	31,37%
Setembro	43,71%	41,98%
Outubro	45,10%	38,59%
Novembro	46,77%	41,99%
Dezembro	45,88%	40,13%
Média Anual	43,59%	34,91%

Fonte: Operador Nacional do Sistema Elétrico (2022).

Nesta Tabela 1, foram coletadas as porcentagens de aproveitamento da capacidade instalada pela ocorrência dos ventos nos dois parques eólicos apresentados na subseção 3.1, sendo estes, o Conjunto Quinta 138 kV e Conjunto Quinta 69 kV. Devido à diferença considerável de quase 9%, que impacta diretamente na quantidade de energia gerada para um mesmo local, optou-se por utilizar ambas as médias anuais nos cenários deste estudo.

4.1.2 Tarifa de energia elétrica

Geralmente, trabalhos relacionados ao custo da energia elétrica levam em consideração os diferentes postos tarifários dispostos pela ANEEL, que indicam os horários de maior carga para o sistema elétrico das distribuidoras de energia, bem como as modalidades tarifárias de acordo com a tensão da unidade consumidora e, ainda, as bandeiras tarifárias que indicam se a energia custará mais ou menos em função das condições favoráveis ou não de geração de eletricidade.

Ainda que seja possível calcular a tarifa da energia solar fotovoltaica de acordo com os postos tarifários, o mesmo não acontece com a energia eólica, já que o vento pode acontecer em qualquer horário. Assim, como este trabalho leva em consideração o aproveitamento de

diferentes recursos naturais, será assumida apenas uma conjuntura: o custo do horário de ponta da modalidade tarifária verde para o subgrupo A4, em conformidade com a Resolução Normativa (REN) nº 1.000/2021 disposta pela ANEEL, sem adicionais de bandeira, a fim de simplificar os cálculos.

4.1.3 Taxa de juros do investimento e inflação

Para os cálculos econômicos, utilizou-se como base para a TMA o rendimento médio dos últimos dez anos da taxa SELIC. A Tabela 2 apresenta os valores referentes ao período e que, através do cálculo pela equação da Taxa de Juros Equivalente, resultaram em uma média anual de 7,5804% e uma média mensal de 0,6108%.

Tabela 2 – Histórico do rendimento da taxa SELIC

Ano	Rendimento anual acumulado em %
2013	8,181367
2014	10,855867
2015	13,208711
2016	13,960695
2017	9,910221
2018	6,402564
2019	5,941757
2020	2,750141
2021	4,387346
2022	12,333937

Fonte: Da Autora (2023).

A correção monetária também foi definida a partir da coleta de dados dos últimos dez anos, levando em consideração o período de 2013 a 2022, seguindo como modelo de correção o IPC-A do IBGE. Tais valores estão expostos na Tabela 3.

Tabela 3 – Histórico da Inflação

Ano	Reajuste anual em %
2013	5,910820
2014	6,407620
2015	10,673500
2016	6,288060
2017	2,947350
2018	3,745480
2019	4,306040
2020	4,517340
2021	10,061050
2022	5,784840

Fonte: Da Autora (2023).

O total da inflação obtido neste período é de 79,7134%. A partir do cálculo realizado pela equação da Taxa de Juros Equivalente, obteve-se uma média anual de 6,0371% e uma média mensal de 0,4897%.

4.1.4 Dimensionamento do Sistema Eólico e Solar Fotovoltaico

O sistema eólico foi orçado a partir da resposta do Chefe de Vendas de uma fabricante do setor, que indicou o custo de 7 milhões de reais investidos para cada MW instalado. Dessa forma, não foi necessário apontar um aerogerador e suas especificações técnicas. O custo de manutenção fornecido foi de 1% do custo do investimento por ano. A quantidade de energia efetivamente gerada foi calculada com base no aproveitamento da potência instalada de 100 kW pelos ventos, nas porcentagens anuais de 43,59% e 34,91%, registradas nos dois Parques Eólicos no litoral sul do Rio Grande do Sul, mencionados anteriormente neste trabalho, e resultaram respectivamente na geração de 376.617,6 kWh e 301.622,4 kWh anuais.

Para direcionar a tomada de decisão entre o investimento na energia eólica e o investimento na energia fotovoltaica, realizou-se um orçamento com a empresa Parceria Solar, sediada na cidade de Santa Maria, que também atende todo o estado do Rio Grande do Sul. O orçamento solicitado objetivou a geração anual resultante das duas porcentagens de aproveitamento dos ventos, as mesmas quantidades apresentadas no dimensionamento do sistema eólico. Na Tabela 4 constam as informações técnicas conforme a demanda de energia.

Tabela 4 – Concepção técnica do sistema fotovoltaico

Quantidade de energia gerada	Módulos fotovoltaicos	Inversores	Gerador Fotovoltaico
376.617,6 kWh	483 módulos 550 Wp	4 inversores 60 kW WEG	265,65 kWp
301.622,4 kWh	387 módulos 550 Wp	3 inversores 60 kW WEG	212,85 kWp

Fonte: Parceria Solar (2023).

Em ambos os casos, para a estimativa da depreciação foi utilizado o Método Linear que é o método mais utilizado no cálculo de depreciações (SANTOS, 2014). Para isso, foram considerados 25 anos de vida útil. Para o custo de manutenção do sistema fotovoltaico foi considerado 0,073% sobre o custo do investimento por ano, conforme sugestão da empresa que forneceu o orçamento.

4.2 ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA

Os cálculos para a análise de viabilidade econômica, dentro dos 12 cenários propostos e apresentados no Quadro 1, consideraram o valor do investimento em cada sistema, o aproveitamento sob a capacidade instalada e a TMA, que varia 20% para menos nos cenários de número 5 a 8, e 20% para mais nos cenários de número 9 a 12. Foram utilizados nos cálculos a correção monetária, a depreciação e o custo da manutenção em um horizonte de 300 meses, com base na vida útil dos equipamentos.

Quadro 1 - Cenários

Cenário	Energia	Aproveitamento	TMA (a.m.)	Valor do investimento
1	Eólica	43,59%	0,4897%	R\$ 700.000,00
2	Eólica	34,91%	0,4897%	R\$ 700.000,00
3	Solar Fotovoltaica	Não se aplica	0,4897%	R\$ 1.165.256,78
4	Solar Fotovoltaica	Não se aplica	0,4897%	R\$ 929.306,07
5	Eólica	43,59%	0,3938%	R\$ 700.000,00
6	Eólica	34,91%	0,3938%	R\$ 700.000,00
7	Solar Fotovoltaica	Não se aplica	0,3938%	R\$ 1.165.256,78
8	Solar Fotovoltaica	Não se aplica	0,3938%	R\$ 929.306,07
9	Eólica	43,59%	0,5846%	R\$ 700.000,00
10	Eólica	34,91%	0,5846%	R\$ 700.000,00
11	Solar Fotovoltaica	Não se aplica	0,5846%	R\$ 1.165.256,78
12	Solar Fotovoltaica	Não se aplica	0,5846%	R\$ 929.306,07

Fonte: Da Autora (2023).

Quanto ao cálculo da receita gerada por cada um dos sistemas, multiplicou-se a energia média gerada por mês pela tarifa de energia nas condições estipuladas na subseção 4.1.2. Diante disso, pôde-se obter o *Payback* Descontado, o Valor Presente Líquido e a Taxa Interna de Retorno para cada cenário. Tais resultados estão dispostos na Tabela 5.

Tabela 5 - Resultados dos cálculos de Viabilidade Econômica

Cenário	TMA (ao mês)	PD (meses)	VPL (R\$)	TIR (ao mês)
1	0,7025%	13,92	11.488.098,45	8,2805%
2	0,7025%	18,32	4.621.057,04	6,1063%
3	0,7025%	30,98	5.371.300,82	4,5018%
4	0,7025%	25,27	4.310.187,34	4,5247%
5	0,5663%	13,92	7.069.562,32	7,7275%
6	0,5663%	18,32	5.439.221,26	6,1063%
7	0,5663%	30,98	6.376.368,17	4,5018%
8	0,5663%	25,27	5.115.819,88	4,5247%
9	0,8367%	13,92	5.213.944,81	7,7275%
10	0,8367%	18,32	3.973.174,54	6,1063%
11	0,8367%	30,98	4.575.415,08	4,5018%
12	0,8367%	25,27	3.672.228,79	4,5247%

Fonte: Da Autora (2023).

A partir dos resultados da Tabela 5, percebe-se que, em todos os cenários, o VPL se apresentou maior que zero e a TIR ultrapassou a TMA, revelando que, no momento de realização deste trabalho, o investimento é rentável. Os cenários de número ímpar geram aproximadamente a mesma quantidade de energia. O mesmo acontece com os cenários de número par. Em ambos os casos se nota que, para uma mesma TMA, o sistema eólico sempre apresenta maior Valor Presente Líquido e maior Taxa Interna de Retorno. Isso mostra que, sob as mesmas condições de quantidade de energia gerada e Taxa Mínima de Atratividade, o sistema eólico é mais atrativo do que o fotovoltaico para o litoral sul gaúcho.

Quanto ao *Payback* Descontado, independente da TMA e do aproveitamento dos ventos, o investimento na energia eólica é o que traz retorno em um menor espaço de tempo, cerca de

12 meses a menos do que a energia fotovoltaica.

No que diz respeito à métrica do LCOE, leva-se em consideração o valor do fator de recuperação de capital (CRF) a partir da Equação 4, apresentada na subseção 2.1. É importante lembrar que esse fator considera a TMA como um elemento do cálculo. Na Tabela 6 estão dispostos os resultados conforme cada cenário.

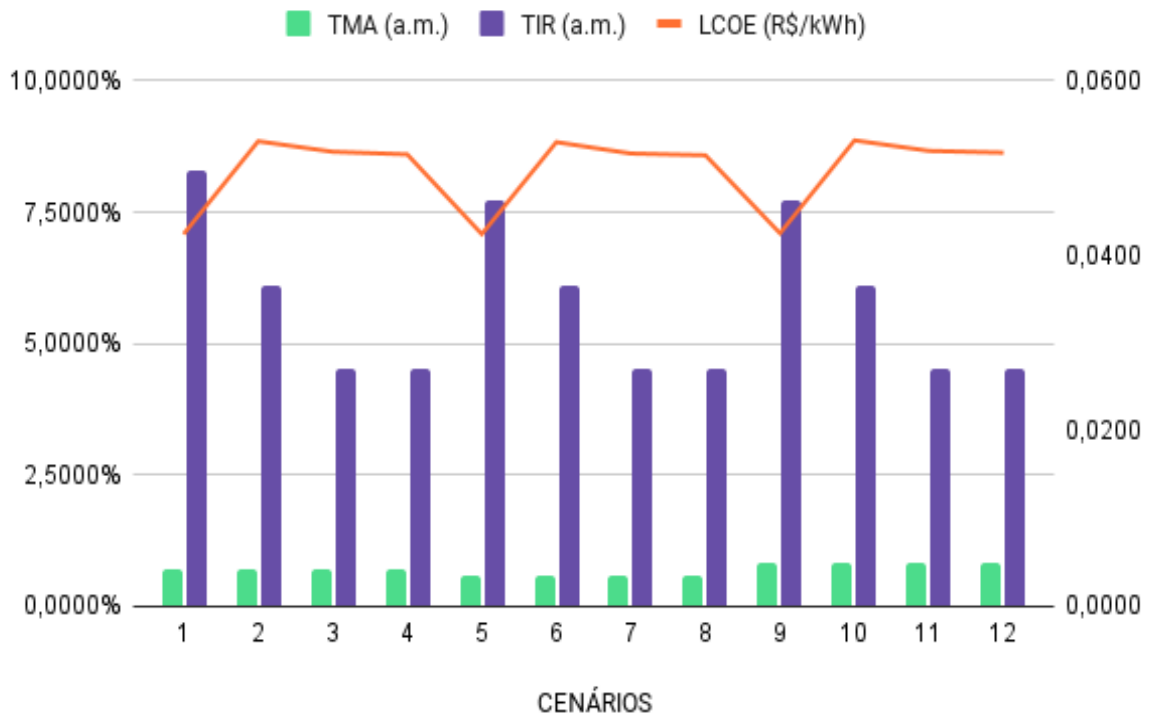
Tabela 6 - Resultados do LCOE

Cenário	Produtividade Total no ano (kWh)	CRF	Custo médio de manutenção (R\$/ano)	LCOE (R\$/kWh)
1	376.617,6	0,008005	15.794,45	0,0425
2	301.622,4	0,008005	15.794,45	0,0531
3	377.222,33	0,008005	19.194,75	0,0519
4	302.246,46	0,008005	15.308,04	0,0516
5	376.617,6	0,006938	15.794,45	0,0425
6	301.622,4	0,006938	15.794,45	0,0530
7	377.222,33	0,006938	19.193,36	0,0517
8	302.246,46	0,006938	15.306,93	0,0515
9	376.617,6	0,009116	15.794,45	0,0426
10	301.622,4	0,009116	15.794,45	0,0532
11	377.222,33	0,009116	19.193,36	0,0520
12	302.246,46	0,009116	15.306,93	0,0518

Fonte: Da Autora (2023).

Os valores apresentados do LCOE ratificam os resultados de viabilidade econômica encontrados na Tabela 5, uma vez que os cenários da energia eólica cujo aproveitamento dos ventos é maior, ou seja, os cenários 1, 5 e 9, também são os que apresentam o LCOE mais baixo, sendo os únicos na casa de 0,04 R\$/kWh. Inclusive, o cenário 1, que apresentou o maior VPL e a maior TIR e, portanto, maior rentabilidade, também apresentou o menor LCOE. É possível observar a relação entre esses resultados na Figura 1.

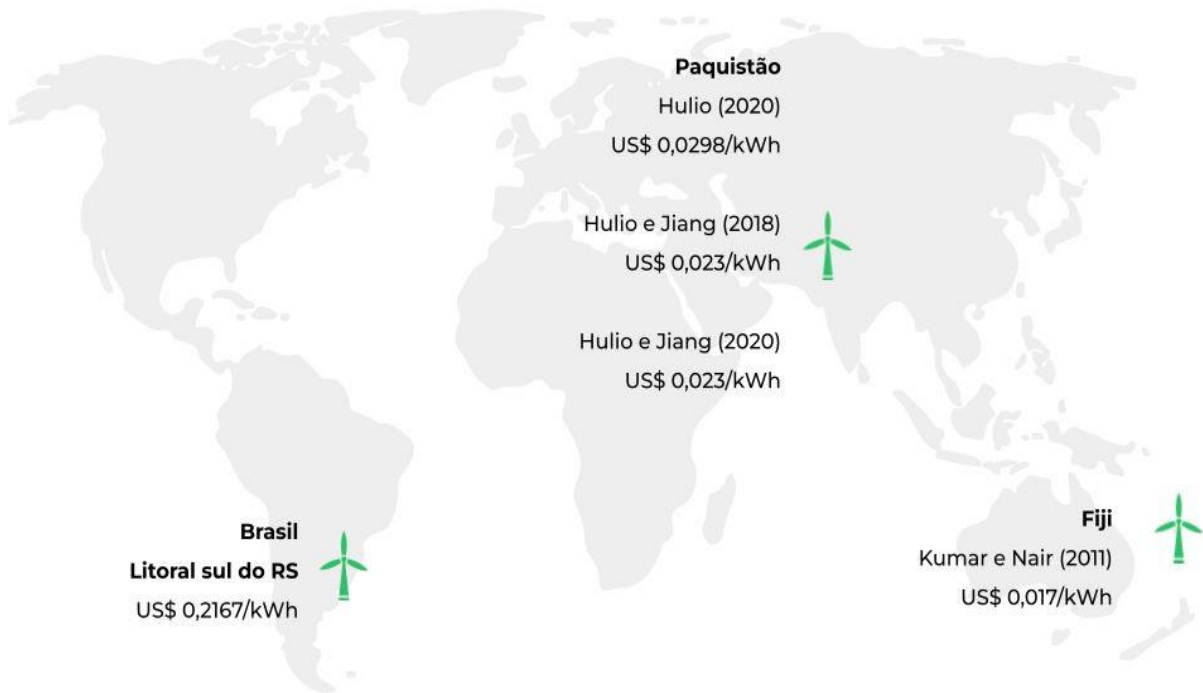
Figura 1 - Comparação de LCOE, TIR e TMA entre os cenários



Fonte: Da Autora (2023).

Quanto à energia eólica em si, Hulio e Jiang (2020) estimaram um investimento em aerogeradores e infraestrutura de 1.000 US\$/kW em Jhampir no Paquistão, com pouca diferença em relação aos 7.000 R\$/kW, ou 1.372 US\$/kW na cotação atual, providos a este trabalho. Em ambos os casos, a porcentagem de manutenção anual foi calculada como 1% do valor do investimento. Já o menor LCOE, obtido no cenário 1, ainda é cerca de nove vezes maior do que o encontrado por Hulio e Jiang (2018) em Karachi, Paquistão, e doze vezes o encontrado por Kumar e Nair (2011) em Wainiyaku Taveuni, Fiji. Tais dados estão explicitados na Figura 2.

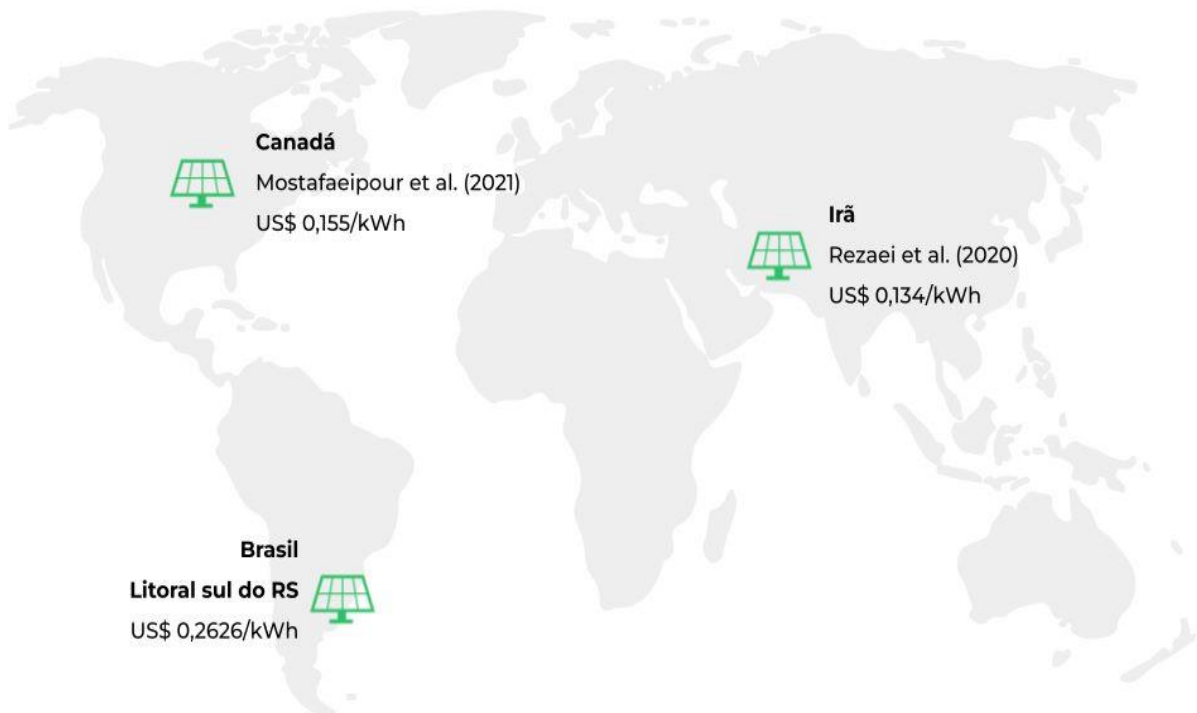
Figura 2 - Mapa com valor do LCOE dos sistemas eólicos por país e autor



Fonte: Da Autora (2023).

O investimento por kW instalado de energia solar fotovoltaica nessa pesquisa foi de cerca de 35 mil dólares na cotação atual, tal qual o registrado por Wang e Qiu (2009) no Tibete, na China. Enquanto o LCOE da energia fotovoltaica calculado por Mostafaeipour et al. (2021), no Canadá, variou entre 0,155 e 0,356 US\$/kWh, o deste trabalho ficou entre 0,2626 e 0,2652 US\$/kWh. Apesar do custo médio de produção de energia mais baixo, ilustrado na Figura 3, o *Payback* Descontado em solo canadense é de 4 anos, enquanto os cenários do sistema fotovoltaico no litoral sul do Rio Grande do Sul apresentaram uma média de aproximadamente 2,25 anos.

Figura 3 - Mapa com valor do LCOE dos sistemas fotovoltaicos por país e autor



Fonte: Da Autora (2023).

No tocante aos autores que compararam os dois tipos de energia entre si, Kozlovski e Bawah (2015) encontraram o LCOE do sistema eólico em torno de 0,080 US\$/kWh, e o do fotovoltaico de 0,250 US\$/kWh, optando pela energia proveniente dos ventos como Rezaei et al. (2020) em Kish, no Irã. Neste trabalho, quando se compara o LCOE dos cenários cuja geração de energia é semelhante, o sistema eólico sempre apresenta o menor custo. É interessante, ainda, notar como quase não há diferença de custo de geração de energia entre os cenários 1, 5 e 9, e entre os cenários 2, 6 e 10, mostrando que para uma mesma porcentagem de aproveitamento dos ventos, independentemente do valor da TMA, o custo de geração de energia é semelhante.

Enquanto os valores de LCOE das fontes de energia estudadas neste trabalho variam entre quatro e cinco centavos por kWh, o LCOE da fonte hidrelétrica no Brasil, apresentado pela Empresa de Pesquisa Energética (2021), é cerca de 4 vezes maior, em torno de 0,15 R\$/kWh.

5 CONCLUSÃO

Por conta da urgência da pauta energética, o mercado de energias renováveis, principalmente a eólica e a solar, vem crescendo e facilitando o acesso aos equipamentos. Um país como o Brasil apresenta recursos naturais que propiciam o desfrute desse tipo de energia, ora de uma, ora de outra e, em muitos casos, de ambas. Assim, com a intenção de fomentar a discussão econômica entre fontes de energia renováveis e menos nocivas, o presente trabalho de conclusão de curso teve como objetivo geral dimensionar tecnicamente e analisar economicamente a instalação de duas usinas de minigeração de energia elétrica, sendo estas uma fotovoltaica e uma eólica no litoral sul do Rio Grande do Sul.

O estudo foi realizado empregando os métodos de análise econômica VPL, TIR, *Payback* Descontado e LCOE. Foram simulados 12 cenários com variações na fonte da energia, na TMA e no aproveitamento do recurso natural. Através dos resultados obtidos, constatou-se a viabilidade econômica do investimento em todos os cenários, independente da fonte de energia. O resultado que se mostrou mais atrativo, no entanto, foi o sistema eólico no cenário de número 1, com os maiores valores de Valor Presente Líquido e Taxa Interna de Retorno, ao mesmo tempo que apresentou o menor custo de geração de energia por kWh.

Foram encontradas dificuldades durante a pesquisa, limitando a quantidade de cenários propostos. A principal delas foi o orçamento com fabricantes de aerogeradores. Isso porque é um mercado restrito e que necessita de contatos estratégicos para viabilizar a pesquisa por parte de estudantes da graduação. Um cenário em que as empresas do setor eólico fornecessem valores e orçamentos concretos, considerando a singularidade de cada projeto proposto pelos universitários, possibilitaria, também, realizar orçamentos com outras empresas de energia solar fotovoltaica, com outros modelos de equipamentos, provocando um consequente aprofundamento da discussão. Ainda assim, conclui-se que os objetivos deste trabalho foram alcançados.

Não obstante, ressalta-se que o presente trabalho deixa em aberto para estudos futuros, que objetivem complementar a pesquisa, o fornecimento de informações de outros fabricantes de equipamentos utilizados na geração de energias renováveis, principalmente da energia eólica, a fim de ampliar o conhecimento e os resultados relacionados ao tema. Pauta-se, ainda, análises que se estendam com o avanço tecnológico da área, trazendo equipamentos mais eficientes e novas maneiras de aproveitar os recursos naturais de menor impacto negativo para a geração de energia.

REFERÊNCIAS

- ABDULLAHI, D. et al. **Barriers for implementing solar energy initiatives in Nigeria: an empirical study.** Solar energy initiatives in Nigeria, 2020.
- ALAYI, R. et al. **Optimization and evaluation of a wind, solar and fuel cell hybrid system in supplying electricity to a remote district in national grid.** International Journal of Energy Sector Management, v. 14, n. 2, p. 408-418, 2020.
- ALBADI, M. H.; EL-SAADANY, E. F. **Wind power in Ontario: an economical valuation. In: IEEE Canada Electrical Power Conference, 2007, Canada. Anais...** Canada, 2007. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4520382/>. Acesso em: 15 nov. 2021.
- ALI, E. **Criteria for assessing sustainable energy technology for rural Bangladesh.** International Journal of Development Issues, v. 5, n. 1, p. 35-63, 2006.
- ANEEL. **Resolução Normativa ANEEL Nº 1.000, de 7 de dezembro de 2021.** Estabelece as Regras de Prestação do Serviço Público de Distribuição de Energia Elétrica; revoga as Resoluções Normativas ANEEL nº 414, de 9 de setembro de 2010; nº 470, de 13 de dezembro de 2011; nº 901, de 8 de dezembro de 2020 e dá outras providências. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20211000.pdf>. Acesso em: 24 jan. 2023.
- AQUILA, G. et al. **Wind power feasibility analysis under uncertainty in the Brazilian electricity market.** Energy Economics, v. 65, p. 127-136, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA. **O setor.** Disponível em: <https://abeeolica.org.br/energia-eolica/o-setor/>. Acesso em: 10 fev. 2023.
- ATLAS EÓLICO DO RIO GRANDE DO SUL. **Atlas eólico: Rio Grande do Sul.** Porto Alegre: SDPI: AGDI, 2014.
- BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Calculadora do cidadão.** Disponível em: <https://www3.bcb.gov.br/CALCIDADAOPublico/exibirFormCorrecaoValores.do?method=exibirFormCorrecaoValores&aba=4>. Acesso em: 01 jan. 2023.
- BLANK, L. T.; TARQUIN, A. **Engineering economy.** 6. ed. New York: McGraw-Hill, 2008.
- BRANKER, K.; PATHAK, M.J.M.; PEARCE, J.M. **A Review of Solar Photovoltaic Levelized Cost of Electricity.** Renewable and Sustainable Energy Review, p. 4470-4482, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.104>
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Nacional de Energia 2050.** Brasília: MME/EPE, 2020.
- BRASIL. **Situação atual e projeção hidrológica para o sistema Cantareira,** ano 7, n. 61.

Disponível em:

http://www2.cemaden.gov.br/wpcontent/uploads/2021/10/Relatorio_SistemaCantareira_Outubro_2021_final.pdf. Acesso em: 17 nov. 2021.

BRITO, P. **Análise e viabilidade de projetos de investimentos**. 2.ed. São Paulo: Atlas, 2011.

BRITO, M. A. G. de et al. **Research on photovoltaics: Review, trends and perspectives**. Xi Brazilian Power Electronics Conference, [s.l.], p.531-537, set. 2011. IEEE. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1109/cobep.2011.6085198>. Acesso em: 02 abr. 2021.

CAMARGOS, M. A. de. **Matemática Financeira: Aplicada a produtos financeiros e à análise de investimento**. 1 ed. São Paulo: Editora Saraiva, 2013.

CAMLOFFSKI, R. **Análise de investimento e viabilidade financeira das empresas**. São Paulo: Atlas, 2014.

CASAROTTO FILHO, N.; KOPITTKKE, B. H. **Análise de investimentos**. 9. ed. São Paulo: Atlas, 2000.

CASAROTTO FILHO, N.; KOPITTKKE, B. H. **Análise de investimentos: matemática financeira, engenharia econômica, tomada de decisão, estratégia empresarial**. 11. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

CEARÁ. **Atração de investimentos no estado do Ceará**: mapa territorial de parques eólicos. Fortaleza: CEDE/ADECE, 2001, 74p.

DASSI, J. A. et al. **Análise de viabilidade econômico-financeira da energia solar fotovoltaica em uma Instituição de Ensino Superior do Sul do Brasil**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CUSTOS, 24., 2017, Florianópolis. Anais eletrônicos... Florianópolis, 2017. Disponível em: <https://anaiscbc.emnuvens.com.br/anais/article/view/3924>. Acesso em: 15 nov. 2021.

DUTRA, J. C. D. N. et al. **Uma análise do panorama das regiões Missões e Noroeste do estado do Rio Grande do Sul sob o prisma da energia eólica e solar fotovoltaica como fontes alternativas de energia**. Revista Paranaense do Desenvolvimento, Curitiba, v. 34, n. 124, p.225-243, jan. 2013.

EHRlich, P. J; MORAES, E. A. **Engenharia econômica: avaliação e seleção de projetos de investimentos**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2013.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco energético nacional 2022**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-638/BEN2022.pdf>. Acesso em: 18 jan. 2023.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Caderno de Preços da Geração 2021**. Disponível em:

https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublishingImages/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/caderno-de-precos-da-geracao/CadernodePre%C3%A7osdeGera%C3%A7%C3%A3o_r0.pdf. Acesso em: 16 mar. 2023.

EWEA. **Powering Europe: wind energy and the electricity grid**. Brussels: EWEA, 2010.

GOMES, J. **Elaboração e análise de viabilidade econômica de projetos: tópicos práticos de finanças para gestores não financeiros**. São Paulo: Atlas, 2013.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2010. 176 p.

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. **Global wind energy outlook 2008**. Brussels: GWEC, 2008.

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. **Global Wind Report 2021**. Disponível em: <https://gwec.net/global-wind-report-2021/>. Acesso em: 18 nov. 2021.

GRANT, E. L.; IRESON, W. G. **Principles of Engineering Economy**. 5th ed. New York: Ronald Press Company, 1970.

HIRSCHFELD, H. **Engenharia Econômica e Análise de Custos**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 1998.

HULIO, Z. H. **Wind resource and energy potential assessment of the Sujawal site, Sindh Pakistan**. World Journal of Science, Technology and Sustainable Development, v. 18, n. 1, 2021.

HULIO, Z. H.; JIANG, W. J. **Site-specific technical and economic analysis of wind power potential and energy generation using Weibull parameters**. World Journal of Science, Technology and Sustainable Development, v. 15, n. 1, p. 35-53, 2018.

HULIO, Z. H. **Wind resource and energy potential assessment of the Sujawal site, Sindh Pakistan**. WJSTSD, v. 18, n. 1, 2020.

HULIO, Z. H.; JIANG, W. J. **Does wind speed effects performance and cost of energy? A case study of wind farm**. International Journal of Energy Sector Management, v. 14, n. 5, p. 953-974, 2020.

IGNATIOS, M. **Um governo auto-suficiente**. Gazeta Mercantil, 11 maio 2006, p. A-3.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Renewables 2020 – Analysis and forecast to 2025**. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/renewables-2020>. Acesso em: 18 nov. 2021.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**, 2017. Disponível em: <http://labren.ccst.inpe.br/>. Acesso em: 20 maio 2021.

IRENA - International Renewable Energy Agency. **Renewable Energy Statistics 2019**. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2019/Jul/Renewable-energy-statistics-2019>. Acesso em: 15 nov. 2021.

IRENA - International Renewable Energy Agency. **Renewable Capacity Highlights - 2020**. Disponível em: https://www.irena.org//media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Mar/IRENA_RE_Capacity_Highlights_2020.pdf?la=en&hash=B6BDF8C3306D271327729B9F9C9AF5F1274FE30B. Acesso em: 15 nov. 2021.

KOZLOVSKI, E.; BAWAH, U. **A financial decision support framework for the appraisal of renewable energy infrastructures in developing economies**. International Journal of Energy Sector Management, v. 9, n. 2, p. 176-203, 2015.

KUMAR, A.; NAIR, K. **Wind characteristics and energy potentials at Wainiyaku Taveuni, Fiji**. MEQ, v. 23, n. 3, 2011.

MARTINS, F.R.; GUARNIERI, R.A.; PEREIRA, E. B. **O aproveitamento da energia eólica**. Revista Brasileira do Ensino de Física, São José dos Campos, v. 30, n. 1, p. 1-13, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1806-11172008000100005>. Acesso em: 02 nov. 2021.

MATIAS-PEREIRA, J. **Manual da metodologia da pesquisa científica**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2012.

MELO, M. S. M. **Energia eólica: aspectos técnicos e econômicos**. 2012. 157 p. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2012.

MIGUEL, P. A. C. et al. **Metodologia de pesquisa em Engenharia de Produção e gestão de operações**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

MOSFAEIPOUR, A. et al. **A novel integrated approach for ranking solar energy location planning: a case study**. Journal of Engineering, Design and Technology, v. 19, n. 3, p. 698-720, 2021.

NEWMAN, D.; ESCHENBACH, T.; LAVELLE, J. **Engineering Economic Analysis**. 9th ed. New York: Oxford University Press, 2004.

NEWMAN, D.; LAVELLE, J. **Fundamentos de Engenharia Econômica**. 1 ed. Rio de Janeiro: JC, 2000.

ONS. NT-ONS DPL 0081/2021 - **Avaliação das condições de atendimento eletroenergético do sistema interligado nacional - estudo prospectivo julho a novembro de 2021**. Disponível Em:

<http://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/CTAONS%20DGL%2014962021%20%20Avalia%C3%A7%C3%A3o%20das%20Condi%C3%A7%C3%B5es%20de%20Atendimento%20Eletroenerg%C3%A9tico%20do%20Sistema%20Interligado%20Nacional%20-%20SIN.pdf>. Acesso em: 18 nov. 2021.

ONS. **Histórico de operação - Geração de energia**. 2022. Disponível em: https://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/geracao_energia.aspx. Acesso em: 14 dez. 2022.

ORTIZ, G. P.; KAMPE, M. **Potencial de energia eólica offshore na margem do Brasil**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE OCEANOGRAFIA, 5, 2011, Santos. Anais... Santos, SP, 2011.

PAWEL, I. The Cost of Storage – **How to Calculate the Levelized Cost of Stored Energy (LCOE) and Applications to Renewable Energy Generation**. *Energy Procedia*, v. 46, p. 68-77, 2014.

PERAZA, D. G. **Estudo de viabilidade da instalação de usinas solares fotovoltaicas no estado do Rio Grande do Sul**. 2013. 68 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia)–Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2013.

PEREIRA, J. M. **Manual de metodologia científica**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2016. 224 p.

PIANEZZOLA, G. **Mapas de complementaridade dos potenciais solar e eólico no estado do Rio Grande do Sul**. 2006. 82 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia)–Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2006.

PUCCINI, A. L. **Matemática financeira objetiva e aplicada**. 9ª edição. São Paulo: Saraiva, 2011.

RAMADHAM, M.; NASEEB, A. **The cost benefit analysis of implementing photovoltaic solar system in the state of Kuwait**. *Renewable Energy*, v. 36, n. 4, p. 1272 – 1276, 2011.

REBELATTO, D. A. N. **Projeto de Investimento**. 1. ed. São Paulo: Editora Manole, 2004.

REZAEI, M. et al. **Wind and solar energy utilization for seawater desalination and hydrogen production in the coastal areas of southern Iran**. *Journal of Engineering, Design and Technology*, v. 18, n. 6, p. 1951-1969, 2020.

RIO GRANDE DO SUL. Secretaria de Minas e Energia Governo do Estado do Rio Grande do Sul. **Atlas solar do Rio Grande do Sul – 2018**. Disponível em: <https://estado.rs.gov.br/upload/arquivos/atlas-solar7.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2021.

ROSS, S. et al. **Corporate Finance**. 10. ed. New York: The McGraw-Hill, 2015.

SAIDUR, R. et al. **Environmental impact of wind energy**. *Renewable and Sustainable*

Energy Reviews, v. 15, p. 2423–2430, 2011.

SANTOS, C. dos. **Depreciação de Bens do Ativo Imobilizado**. 6. ed. São Paulo: Saraiva, 2014. 260 p.

SECRETARIA DO DESENVOLVIMENTO E PROMOÇÃO DO INVESTIMENTO. **Atlas eólico do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, 2014. 124 p.

SILVA, Patrícia de Castro da. **Sistema para tratamento, armazenamento e disseminação de dados de vento**. 1999. 125 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999.

SILVA, G.R. **Panorama do potencial eólico no Brasil**. Ed. rev. Brasília: Dupligráfica, 2003.

THUESEN, G.J.; FABRYCKY W.J. **Engineering Economy**. Rio de Janeiro: Campus, 2000. 637 p.

VRIES, B. J. M.; VUUREN, D. P.; HOOGWIJK, M. M. **Renewable energy sources: their global potential for the first-half of the 21st century at a global level: an integrated approach**. Energy Policy, v. 35, p. 2590-2610, 2007.

WANG, Q.; QIU, H-N. **Situation and outlook of solar energy utilization in Tibet, China**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 13, p. 2181-2186, 2009.

ZANELA, L. C. H. **Metodologia da pesquisa**. Florianópolis: SEaD/UFSC, 2006. Disponível em:

http://arquivos.eadadm.ufsc.br/EaDADM/PP1_2007_1/Modulo_1/Metologia_da_pesquisa/Material_didatico/Metodologia_da_Pesquisa.pdf. Acesso em: 15 nov. 2021.

NUP: 23081.033643/2023-87

Prioridade: Normal

Homologação de ata de defesa de TCC e estágio de graduação

125.322 - Bancas examinadoras de TCC: indicação e atuação

COMPONENTE

Ordem	Descrição	Nome do arquivo
11	Trabalho de conclusão de curso (TCC) (125.32)	TCC Bruna de Moraes Suda - versão final.pdf

Assinaturas

22/03/2023 10:18:56

BRUNA DE MORAIS SUDA (Aluno de Graduação)
07.09.08.01.0.0 - Curso de Engenharia de Produção - 121626

22/03/2023 10:56:21

CRISTIANO ROOS (Coordenador(a) de Curso)
07.09.08.00.0.0 - CURSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO - EP

Código Verificador: 2513149

Código CRC: 3eb9f6f6

Consulte em: <https://portal.ufsm.br/documentos/publico/autenticacao/assinaturas.html>

