

# ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DA INSTALAÇÃO DE UMA MICROUSINA EÓLICA RESIDENCIAL NO MUNICÍPIO DE PESQUEIRA-PE

ANALYSIS OF THE TECHNICAL AND ECONOMIC FEASIBILITY OF THE INSTALLATION OF A RESIDENTIAL MICRO WIND PLANT IN THE MUNICIPALITY OF PESQUEIRA-PE

**Pedro Henrique Dules de Lima**

phdl@discente.ifpe.edu.br

**Herick Talles Queiros Lemos**

herick.lemos@pesqueira.ifpe.edu.br

---

## RESUMO

Crescente na demanda energética, altas taxas de poluentes na atmosfera, aquecimento global, esses fatores fazem com que haja um esforço global pela busca de formas de geração de energia renovável e limpa. Nesse sentido, a energia eólica vem se destacando e ganhando força ao longo dos anos. Este trabalho visou analisar a viabilidade técnica e econômica da instalação de um aerogerador de pequeno porte em uma residência no município de Pesqueira/PE. A metodologia deste trabalho foi baseada na distribuição de Weibull da localidade, análise mercadológica dos dispositivos e parâmetros de indicadores financeiros, como a taxa interna de retorno e Payback. Verificou-se que a microturbina de modelo TESUP ZEUS3.0 apresentou uma produção anual de 5,202 MWh de energia elétrica para a localidade de análise, produção mensal energética de 433,54 kWh, fator de capacidade de 20%, Payback de 4 anos, 5 meses e 15 dias, e taxa interna de retorno de 29,43%. Portanto, a região de análise é viável tanto tecnicamente, quanto economicamente.

Palavras-chave: Energia eólica. Microgeração. Pesqueira. Viabilidade técnica. Viabilidade econômica.

## ABSTRACT

Growing in energy demand. High rates of pollutants in the atmosphere. Global warming. These factors lead to a global effort to find ways to generate renewable and clean energy. In this sense, wind energy has been standing out and gaining strength over the years. This work aimed to analyze the technical and economic feasibility of installing a small wind turbine in a residence in the municipality of Pesqueira/PE. The methodology of this work was based on the Weibull distribution of the location, market analysis of the devices and parameters of financial indicators, such as the internal rate of return and Payback. It was found that the microturbine model TESUP ZEUS3.0 presented an annual production of 5,202 MWh of electrical energy for the location of

analysis, monthly energy production of 433,54 kWh, capacity factor of 20%, Payback of 4 years, 5 months and 15 days, and an internal rate of return of 29,43%. Therefore, the analysis region is both technically and economically viable.

Keywords: Wind energy. Microgeneration. Pesqueira. Technical viability. Economic viability.

---

## 1 INTRODUÇÃO

Segundo dados da plataforma *Worldometer*, a população do planeta é de aproximadamente 8 bilhões de pessoas. Com isso, acrescido da necessidade de desenvolvimento tecnológico dos países, a demanda energética do mundo tende a aumentar. Todavia, isso entra em confronto direto com meio ambiente, uma vez que, ainda, em plena atualidade, a maioria das matrizes energéticas do planeta são dependentes de combustíveis fósseis, fator esse diretamente relacionado com uma grande problemática que o mundo enfrenta, o aquecimento global.

Os líderes das principais potências estão pautando de maneira intensiva temas como meio ambiente, mudanças climáticas e aquecimento global. São exemplos desses temas o Protocolo de Montreal, Protocolo de Kyoto, Rio +20, assim como o Acordo de Paris. Na busca por uma melhor qualidade de vida para todos no planeta, sem diminuir o ritmo do desenvolvimento tecnológico e economia, muito vem se estudando acerca de fontes energéticas de baixo custo, sustentáveis e que não impactem significativamente o meio ambiente ou que contribuam para o aquecimento global, são as chamadas fontes de energia renováveis.

Nessa temática, a energia eólica vem ganhando cada vez mais força ao longo dos anos. A energia dos ventos se destaca por ser uma fonte inesgotável, não emitir gases poluentes, nem gerar resíduos, além de cumprir o papel tão desejado dos países do mundo inteiro: transição da matriz energética de fontes poluentes para fontes de energia limpa. Nesse sentido, tornou-se um dos grandes potenciais para produção de energia elétrica limpa.

No Brasil não seria diferente, já que ele possui um enorme potencial para geração de energia eólica e ocupa a terceira posição no que tange à capacidade instalada no país, no ano de 2020 (BEN, 2021). Entretanto, na microgeração e minigeração, apresenta apenas 0,7% na participação das fontes de geração de energia elétrica (BEN, 2021). Apesar de serem grandes os incentivos, programas governamentais, marcos regulatórios da geração distribuída no país – fatores esses essenciais para o crescimento das fontes renováveis – a viabilidade técnica e econômica da energia eólica, atrelada à microgeração em residências, é ainda pouco estudada e disseminada para a população.

Em Silva (2019), o estudo da viabilidade técnica e econômica na microgeração eólica residencial, em Mossoró/RN, possuiu caráter importante ao demonstrar grande potencial eólico daquela região e economia anual significativa. Além desse estudo, Parizotto et al. (2012) se propôs a estudar a implantação de aerogeradores de pequeno porte em residências, em Cascavel/PR. A região também demonstrou um excelente potencial eólico e um bom retorno econômico. Em Oliveira, Francescato e

Roos (2021), a microgeração eólica em residências unifamiliares, na cidade de Santa Vitória do Palmar/RS se mostrou técnica e economicamente viável. Percebe-se com esses estudos que, em regiões distintas, há viabilidade técnica e econômica acerca da microgeração eólica. Porém, o município de Pesqueira, agreste de Pernambuco, ainda não possui estudos nessa perspectiva, assim como é bastante desconhecida a possibilidade da microgeração eólica.

Dessa forma, o objetivo desse trabalho é analisar a viabilidade técnica e econômica da instalação de uma microusina eólica residencial no município de Pesqueira/PE.

## 2 GERAÇÃO EOLIOELÉTRICA

Esta seção apresenta os fundamentos teóricos necessários para compreensão do processo de conversão de energia nas turbinas eólicas, suas características de operação e métodos de modelagem e avaliação do potencial de geração.

### 2.1 Princípios de conversão da energia

O processo de conversão da energia cinética do vento para a energia elétrica não é um processo simples, há uma certa complexidade na execução de suas etapas. Todavia, de maneira simplificada, a turbina eólica captura a energia de movimento do vento (energia cinética) e transforma essa energia em torque no rotor (energia mecânica) e, posteriormente, o gerador elétrico transforma a energia mecânica em energia elétrica. Esse sistema de conversão aerodinâmico pode ser descrito por expressões matemáticas.

Segundo Sharkawi (2016, p.14), “a velocidade do vento diminui à medida que o atrito do ar é alto”. Portanto, é imprescindível possuir conhecimento do terreno, topologia e a meteorologia do local. Terrenos abertos, águas calmas, tendem a diminuir o coeficiente de fricção, apresentar menos resistência ao movimento do vento. Todavia, em florestas e edificações, o coeficiente de fricção é elevado. Sendo assim, “a elevação é um fator chave na determinação da velocidade do vento” (SHARKAWI, 2016, p.14). A equação (1), expõe um método que é frequentemente usado para análise desse parâmetro. De maneira que  $\alpha$  é o coeficiente de fricção (valores típicos são  $\alpha=0,143$  para ambientes abertos,  $\alpha=0,4$  para cidades grandes,  $\alpha=0,1$  para águas calmas), adimensional,  $v$  é a velocidade do vento (m/s) na altura  $h$  (m),  $v_0$  é a velocidade do vento (m/s) a uma altura conhecida,  $h_0$  (m).

$$\frac{v}{v_0} = \left(\frac{h}{h_0}\right)^\alpha \quad (1)$$

“A turbina eólica é classificada, normalmente, pela potência e não pela energia” (MARTINELLO, 2013, p.31). Portanto, a potência disponível pelo vento é definida pela equação (2), de maneira que  $P_w$  é a potência do vento (W),  $\rho$  é a densidade do ar ( $\text{kg/m}^3$ ),  $v$  é a velocidade do vento incidente na turbina (m/s) e  $A$  é a área de varredura das pás ( $\text{m}^2$ ).

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (2)$$

A turbina eólica não captura toda potência disponível pelo vento, captura apenas uma parcela dessa potência. A porcentagem de potência do vento capturada pelo rotor é definida por a equação (3).  $C_p$  é o coeficiente de *Betz* ou coeficiente de potência.

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A v^3 c_p \quad (3)$$

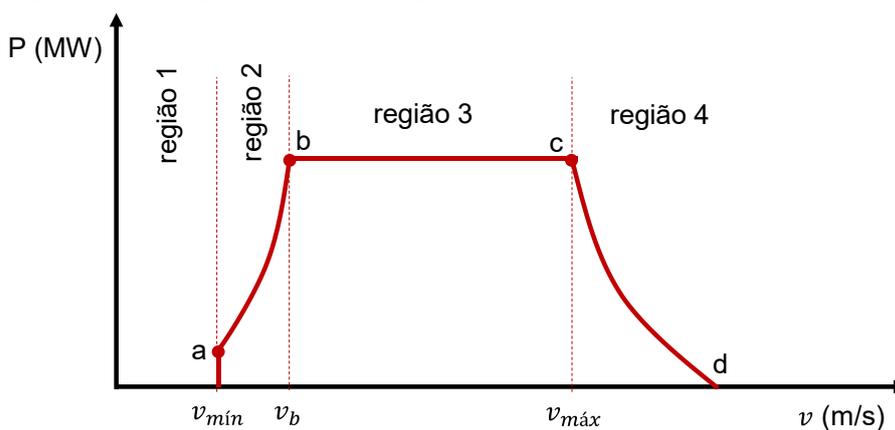
O coeficiente de *Betz* representa o rendimento do aerogerador e é dependente de duas variáveis,  $\lambda$  e  $\beta$ , respectivamente taxa de velocidade na ponta das pás da turbina e o ângulo de passo das pás. A equação (4) caracteriza a relação de  $\lambda$ , onde  $R$  é o raio da turbina (m),  $\omega$  é a velocidade angular mecânica no eixo da turbina e  $v$  é a velocidade do vento incidente na turbina (m/s).

$$\lambda = \frac{\omega R}{v} \quad (4)$$

O ângulo de passo das pás é utilizado como forma de regular a eficiência aerodinâmica da turbina, ou seja, quando tem muito vento se modifica o ângulo de passo das pás para reduzir eficiência e manter a turbina operando dentro da sua faixa de potência nominal.

O valor máximo do coeficiente de potência é conhecido como limite de *Betz*. “Até o momento, nenhuma turbina eólica sem dutos foi projetada para exceder o limite de *Betz*” (BURTON et al., 2021, p.44). O valor desse limite é de (0,593). A figura (1) exibe a curva de potência de saída de uma turbina eólica.

Figura 1 – Regiões de operação da turbina eólica.



Fonte: Adaptado de SHARKAWI (2016, p.33).

Na região 1, a velocidade do vento é inferior à velocidade mínima para produção de eletricidade. O ponto A exibe a velocidade do vento mínima para iniciar a geração de eletricidade. Na região 2, a velocidade é maior que a velocidade mínima, com produção de potência inferior à potência nominal da turbina. “Entre o ponto A e B, a

potência de saída da turbina é função do cubo da velocidade e do ângulo de passo das pás” (SHARKAWI, 2016, p.33). A região 3, representa a zona de atuação em que a produção de potência é limitada à potência nominal por meio dos sistemas de controle de potência. O ponto B é onde a potência de saída é igual a potência nominal da turbina. No ponto C a turbina continua operando em potência nominal, mas as pás sofrem estresse devido à força centrípeta imposta sobre o vento. Na região 4 e no ponto D, “a velocidade do vento atinge o limite da velocidade de projeto e a turbina é parada por meio de freios aerodinâmicos e mecânicos” (SHARKAWI, 2016, p.33).

## 2.2 Avaliação do potencial eólico

Nesta seção serão abordados conceitos imprescindíveis para a análise do potencial eólico de determinada localidade, são eles: a distribuição de *Weibull*, produção anual energética e fator de capacidade.

### 2.2.1 Distribuição de Weibull

Segundo Burton et al. (2021, p.11), “o vento é altamente variável, tanto geográfica quanto temporalmente”. Portanto, nem todas as regiões irão possuir as mesmas condições de produção eólica. A variação de ano para ano na velocidade média anual do vento é difícil de prever, pois são vários os fatores que aumentam significativamente a incerteza na previsão da produção de energia, alguns deles são os fenômenos climáticos, como aquecimento global, *El Niño*, além de erupções vulcânicas e atividades de manchas solares (BURTON et al, 2021, p.14). Todavia, “as variações de velocidade durante o ano podem ser bem caracterizadas em termos de distribuição de probabilidade” (BURTON et al, 2021, p.14).

São várias as funções matemáticas que possuem suas bases relacionadas à distribuição de frequências. Entretanto, “a distribuição de *Weibull* apresenta melhor aderência às estatísticas do vento” (COSERN, 2003, p.57), e “é comumente usada na análise do potencial eólico” (SOUZA; OLIVEIRA; OZONUR, 2019, p.2).

A função de distribuição de *Weibull* é usada para distribuição da velocidade ao longo de um intervalo de tempo. No âmbito em questão, representa a frequência de ocorrência de uma velocidade. A função é expressa pela equação (5), na qual  $k$  é o fator de forma, medida adimensional,  $c$  é o fator de escala,  $v$  é a velocidade média do vento.

$$F(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{(k-1)} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (5)$$

O parâmetro de forma desloca o pico da função e é expresso pela equação (6), de maneira que  $\sigma$  representa o desvio padrão da velocidade do vento (m/s).

$$k \approx \left(\frac{\sigma}{v}\right)^{-1,086} ; 1 \leq k \leq 10 \quad (6)$$

O parâmetro de escala ajusta a magnitude da função e é expresso pela equação (7), de maneira que  $\Gamma(1+1/k)$  representa função Gama. A tabela (1) exhibe a função gama para diferentes valores de  $k$ .

$$c \approx \frac{v}{\Gamma(1+\frac{1}{k})} \quad (7)$$

Tabela 1 – Função Gama para diferentes valores de  $k$ .

$k$	$\Gamma(1 + 1/k)$	$k$	$\Gamma(1 + 1/k)$
1,6	0,896574	2,5	0,887264
1,7	0,892245	2,6	0,888210
1,8	0,889287	2,7	0,889283
1,9	0,887363	2,8	0,890451
2,0	0,886227	2,9	0,891690
2,1	0,885694	3,0	0,892980
2,2	0,885625	3,5	0,899747
2,3	0,885915	4,0	0,906402
2,4	0,886482	5,0	0,918169

Fonte: Própria do autor (2022).

O estudo do potencial eólico é procedido com dados medidos de velocidade do vento durante uma grande variação de tempo, o que traz confiabilidade nos processos teóricos de estimativa de produção energética da localidade.

Existem plataformas que fornecem dados da estatística de *Weibull*, especificamente o fator de forma, fator de escala e velocidade média do vento. O Centro de Referências para as Energias Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB) desenvolve diversos trabalhos e fornece uma imensa variedade de dados, tanto acerca da energia eólica, quanto da energia solar, no que tange às localidades do solo brasileiro. O atlas eólico e solar de Pernambuco é outra importante fonte de dados de energia eólica.

### 2.2.2 Produção anual energética e fator de capacidade

A produção anual energética (PAE), equação (8), define o quanto uma turbina eólica é capaz de produzir de energia durante um intervalo de um ano. Seu cálculo é realizado através da “integração das curvas de potência ( $P(v)$ , em kW) e da frequência de ocorrência das velocidades do vento ( $F(v)$ )” (COSERN, 2003, p.58).

$$PAE [MWh] = 8,76 \int_{V_{IN}}^{V_{OUT}} F(v)P(v)dv \quad (8)$$

O fator de capacidade (FC), adimensional, expresso na equação (9), é “a razão entre a energia efetivamente gerada e a energia teórica que seria gerada considerando-se a potência nominal ( $P_n$ , em kW) do aerogerador” (COSERN, 2003, p.58). Ele expressa o rendimento durante determinado intervalo de tempo.

$$FC = \frac{PAE}{8,76P_n} \quad (9)$$

### **3 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA**

Nesta seção será apresentada a definição da temática geração distribuída, sua caracterização e os importantes marcos regulatórios que impulsionaram o avanço das fontes renováveis pelo território brasileiro.

#### **3.1 Definição**

As geradoras de eletricidade produzem a energia elétrica. As empresas transmissoras são responsáveis pela entrega da energia elétrica até as empresas de distribuição de energia elétrica e, posteriormente, essa energia elétrica chega aos pontos consumidores. Dessa forma, o processo do consumo de energia elétrica era apenas de forma cativa. Entretanto, em 2004, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) estabeleceu uma nova possibilidade no que tange ao comércio de distribuição de energia elétrica, a geração distribuída.

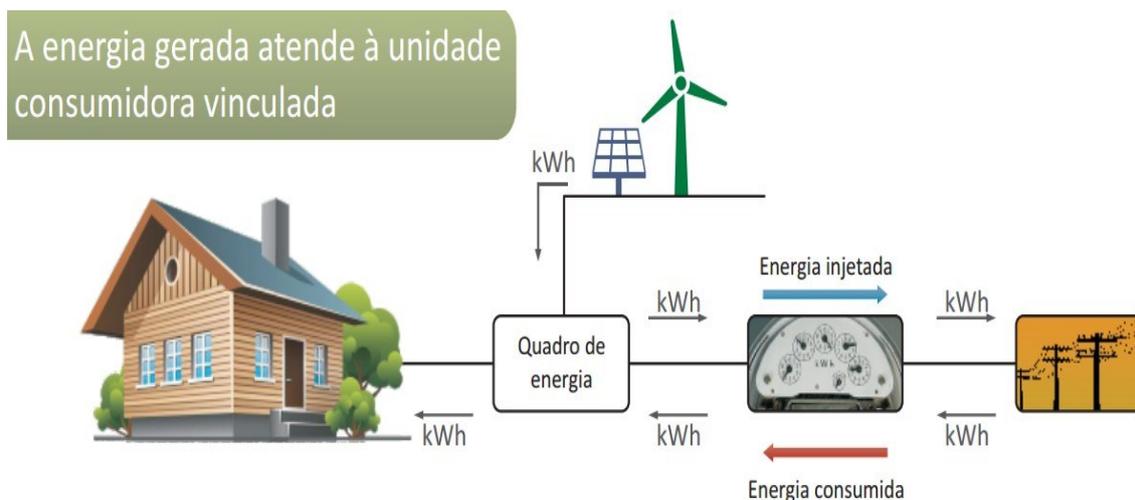
A geração descentralizada, como popularmente é conhecida a geração distribuída, é caracterizada pela “geração de energia elétrica realizada junta ou próxima do (s) consumidor (es) independente da potência, tecnologia e fonte de energia” (INEE, 2021). Segundo EPE (Empresa de Pesquisa Energética, 2014, p.61), “diversas fontes e tecnologias podem (e devem) ser consideradas no âmbito da geração distribuída, sejam estas renováveis ou não”. São alguns exemplos dessa geração distribuída a energia através da biomassa, energia eólica, energia solar, na temática renovável; enquanto motores a diesel, motogeradores a gás natural, cogeração, destacam-se no eixo das não-renováveis.

#### **3.2 Marcos regulatórios**

É notório, nos últimos anos, o aumento da geração distribuída, visto a necessidade maciça de diversificação da matriz energética com uso de fontes renováveis para assim reduzir os componentes dos gases do efeito estufa, que contribuem para o fenômeno do aquecimento global, e para reduzir a dependência dos combustíveis fósseis (EPE, 2014, p.62).

Por conseguinte, a Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012 possibilitou “condições gerais para o acesso de micro e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica e o sistema de compensação de energia elétrica” (ANEEL, 2012, p.1). O sistema de compensação de energia elétrica, conforme ilustrada na figura (2), permite ao “consumidor além de gerar energia elétrica a partir de fontes renováveis possa acumular créditos de energia proporcionais ao excedente injetado na rede de distribuição” (SILVA, 2019, p.28).

Figura 2 – Sistema de compensação de energia elétrica.



Fonte: SILVA (2019, p.28).

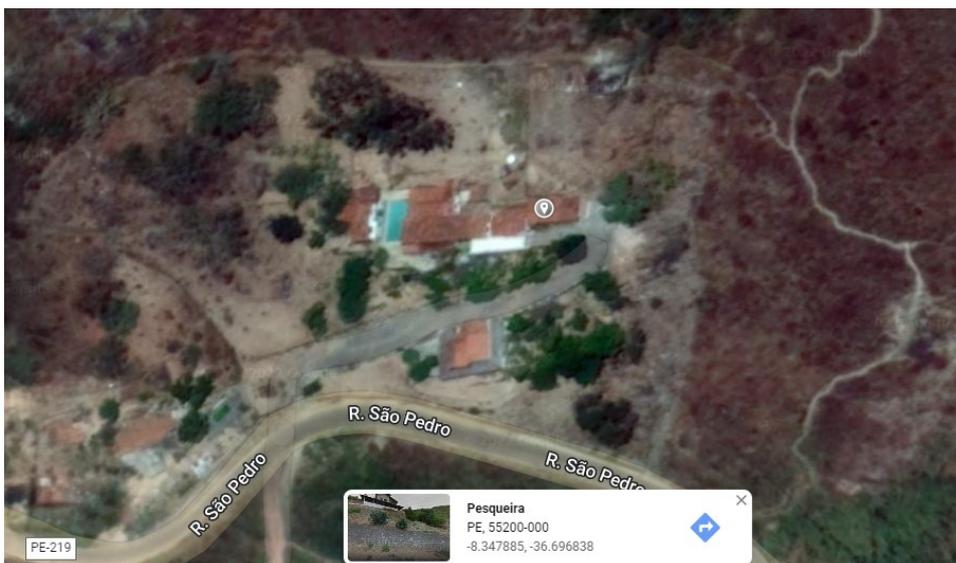
Em 2015, a Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012 foi revisada; a partir daí foi criada a Resolução Normativa ANEEL nº 487/2015, que impôs algumas definições importantes, uma vez que a RN 482/2012 deixava muitas questões em aberto. Segundo a ANEEL (2015, p.1), a microgeração distribuída refere-se a uma central geradora de energia elétrica por fontes renováveis, com potência instalada menor ou igual a 75 quilowatts (kW), enquanto que a minigeração distribuída diz respeito às centrais geradoras, também de fontes renováveis, com potência instalada superior a 75 kW e inferior a 3 megawatts (MW), para fonte hídrica, ou 5 MW para demais fontes. Ademais, possibilitou a implementação da geração distribuída em empreendimentos de múltiplas unidades consumidoras, além de permitir a geração compartilhada e o autoconsumo remoto (ANEEL, 2015, p.1).

Em dezembro de 2015, foi lançado o Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica (ProGD) pelo Ministério de Minas e Energia (MME), com a finalidade de aumentar e disseminar a geração distribuída com fontes renováveis (SILVA et al., 2018, p.2). Dessa forma, linhas de créditos, financiamento de projetos de sistemas de geração distribuída e capacitação são alguns dos itens concedidos pelo ProGD.

### 3 METODOLOGIA

Inicialmente, realizou-se a escolha do local de implantação da microturbina eólica. Foi escolhida uma residência, em ambiente aberto, baixo índice de rugosidade do solo, com frequências de velocidade de vento intensas, elevada altitude, localizada no município de Pesqueira, estado de Pernambuco. A residência possui instalação monofásica e está no grupo tarifário B1 residencial, com consumo médio de 400 kWh de energia elétrica mensais. A figura (3) apresenta uma vista aérea da localidade.

Figura 3 – Localidade escolhida.



Fonte: Google Maps (2022).

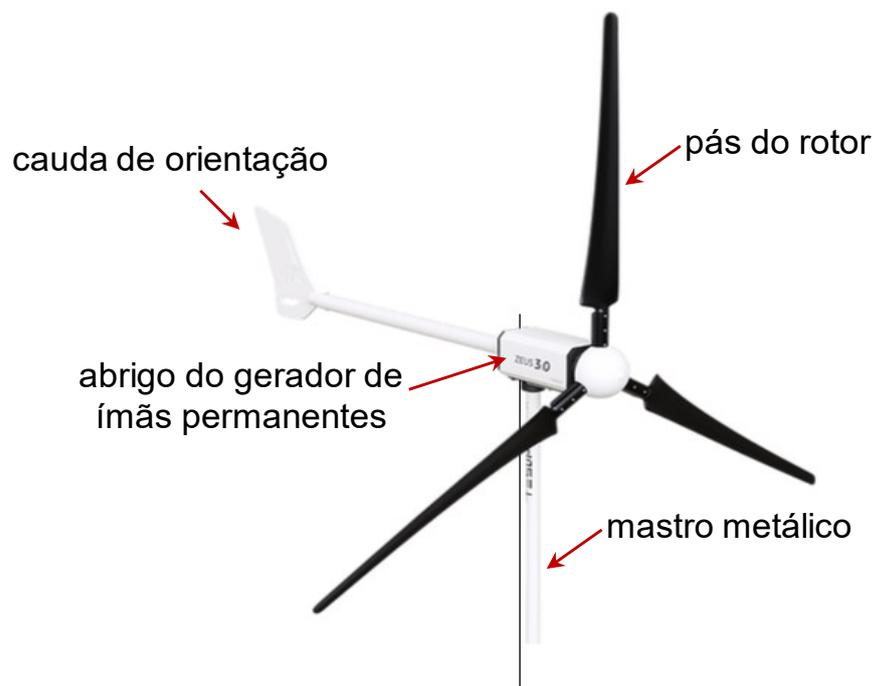
Posteriormente, procedeu-se a escolha do aerogerador de pequeno porte. Para a escolha, buscou-se um modelo que atendesse os seguintes critérios:

- a) Turbina com eixo horizontal com rotor tripá, por possuir maior disponibilidade de mercado e, normalmente, maior eficiência em relação aos modelos de eixo vertical.
- b) Disponibilidade no mercado nacional;
- c) Baixa velocidade de partida;
- d) Capacidade de operação na faixa de velocidades mais frequentes na localidade;
- e) Baixo custo;
- f) Dimensões reduzidas.

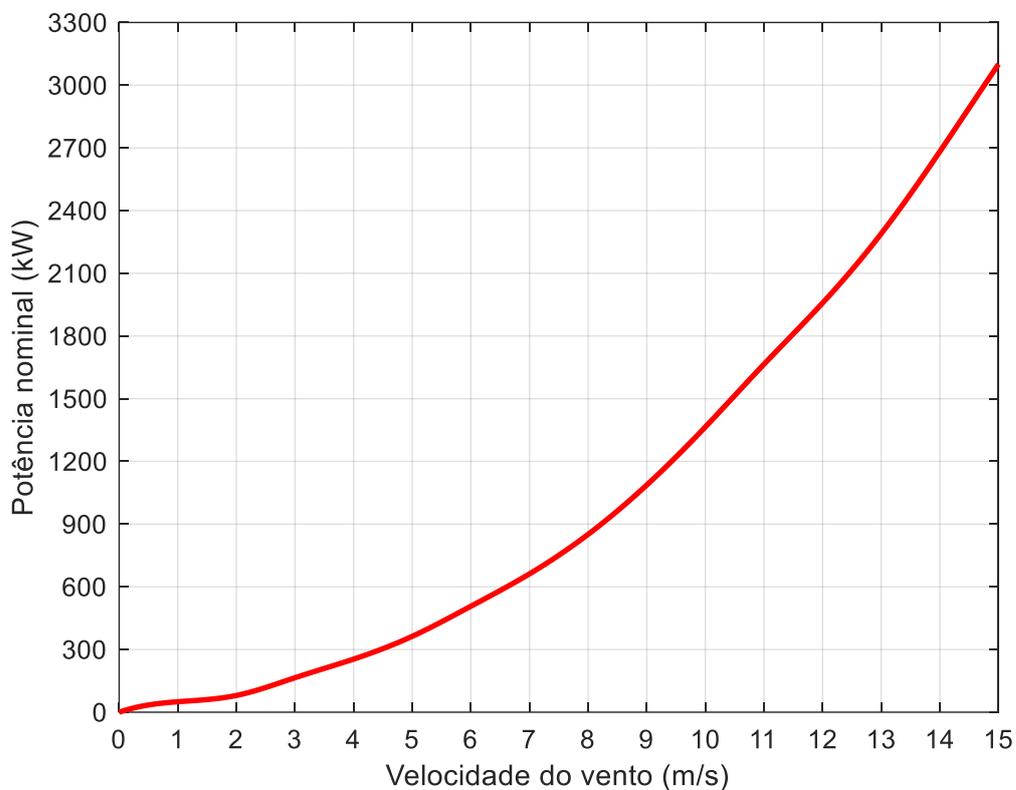
A partir dos critérios elencados, foram analisados cinco modelos de aerogeradores de pequeno porte comerciais, foram eles: MAGNUM 5, TESUP2400, I2000, TESUP ZEUS3.0, MASTER X. Dentre os modelos analisados, optou-se pelo modelo TESUP ZEUS3.0, por cumprir com os requisitos listados acima de maneira mais satisfatória, quando comparado com os outros modelos analisados.

A microturbina eólica selecionada possui 24 kg, potência máxima de 3,1 kW, todas as peças são ecológicas e biodegradáveis, as pás do rotor são estáveis, duráveis e leves, o corpo do gerador é equipado com aletas de resfriamento e é feito de alumínio. Para reduzir a interferência da casa e da vegetação de solo na velocidade de vento, optou-se pela montagem do rotor a uma altura de 15 m. A figura (4.a) ilustra o modelo selecionado e a figura (4.b) apresenta sua curva de potência.

Figura 4 – Características construtivas e curva de potência da microturbina ZEUS 3.0.



(a) Características construtivas do aerogerador TESUP modelo ZEUS 3.0.



(b) Curva de potência da turbina ZEUS 3.0.

Fonte: Adaptado de TESUP (2022).

A saída do aerogerador é em corrente alternada trifásica, necessitando de uma retificação para corrente contínua (CC), a fim de possibilitar sua conexão ao inversor. Essa função de retificação é desempenhada pelo retificador/controlador de carga que acompanha o kit da microturbina eólica escolhida. Esse controlador pode ainda ser usado em uma configuração com armazenamento de energia em bancos de baterias de 12 a 48V (para sistemas *off-grid*). O valor de mercado desse kit é de R\$ 7100,00 (TESUP, 2022).

À jusante do retificador será conectado o inversor de frequência. Como critério de seleção do inversor, buscou-se um modelo com potência superior ou igual à potência nominal da turbina eólica. Além disso, o modelo de inversor deve ser do tipo *on-grid* e compatível com turbinas eólicas. Até a conclusão do presente trabalho, não há disponível no mercado nacional um modelo de inversor *on-grid* específico para energia eólica homologado pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro), apenas modelos híbridos, isto é, aqueles capazes de operar com gerador eólica e solar.

A partir dos critérios de pesquisa estabelecidos, foi selecionado o inversor híbrido Deye, modelo SUN-3,6K-SG03LP1-EU-I, monofásico, com 3,6 kW de potência nominal e registro no Inmetro. A figura (5) apresenta o modelo selecionado.

Figura 5 – Inversor híbrido SUN-3,6K-SG03LP1-EU-I.



Fonte: TRX Solar (2022).

O modelo de inversor híbrido escolhido possui três modos de operação programáveis: *on-grid*, *off-grid* e fonte de alimentação ininterrupta. Além disso, os inversores deste modelo podem ser paralelizados para composição de um sistema maior. O valor de mercado desse modelo de inversor híbrido é de R\$ 12575,66 (TRX Solar, 2022) e vida útil de 20 anos (TRX Solar, 2022).

Após a seleção dos equipamentos, procedeu-se para a modelagem do recurso eólico. Essa etapa foi realizada com auxílio da fonte de dados CRESESB, no qual foi possível obter o fator de escala e de fator de forma para cada trimestre, no intervalo de dezembro de 2020 a novembro de 2021, para as coordenadas da usina a uma

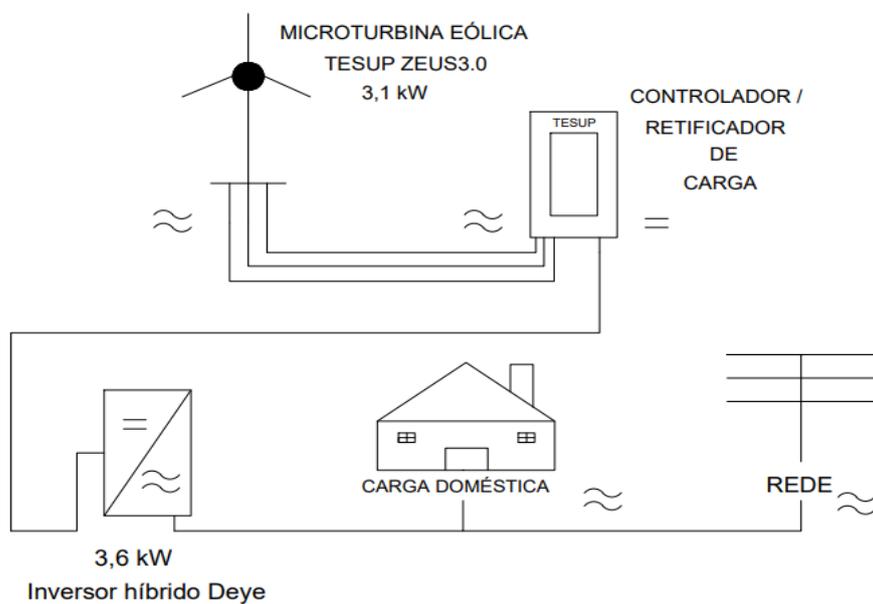
altura de 50 m. A partir desses parâmetros, pode-se obter as funções de densidade de probabilidades de Weibull para cada trimestre por meio da equação (5). Visto que a altura de montagem do rotor é 15 m, realizou-se uma correção dos valores de velocidade das funções de densidade de probabilidades trimestrais por meio da equação (1), considerando um ambiente aberto, para o qual o coeficiente de atrito é de 0,143. Na sequência, procedeu-se com o cálculo teórico da produção de energia anual do gerador e seu fator de capacidade por meio das equações (8) e (9) respectivamente.

Para avaliação da viabilidade econômica, foi realizado o levantamento dos custos de mercado dos equipamentos e acrescido um valor de R\$ 2.000,00 referentes aos custos estimados para homologação do projeto e instalação. Com essas informações, avaliou-se o *payback* do investimento e o fluxo de caixa considerando a economia mensal com a fatura de energia elétrica para o tempo de vida útil dos equipamentos de 20 anos e um aumento de 12,5% ao ano nos custos da energia elétrica. Posteriormente, realizou-se o cálculo da Taxa Interna de Retorno (TIR).

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A figura (6) apresenta o diagrama de ligação dos equipamentos que compõem o sistema de microgeração eólica proposto para a unidade consumidora.

Figura 6 – Esquemático do sistema de microgeração.



Fonte: Própria do autor (2022).

Para a localidade escolhida para implantação do sistema, foram obtidos os parâmetros de forma e de escala trimestrais apresentados na tabela (2).

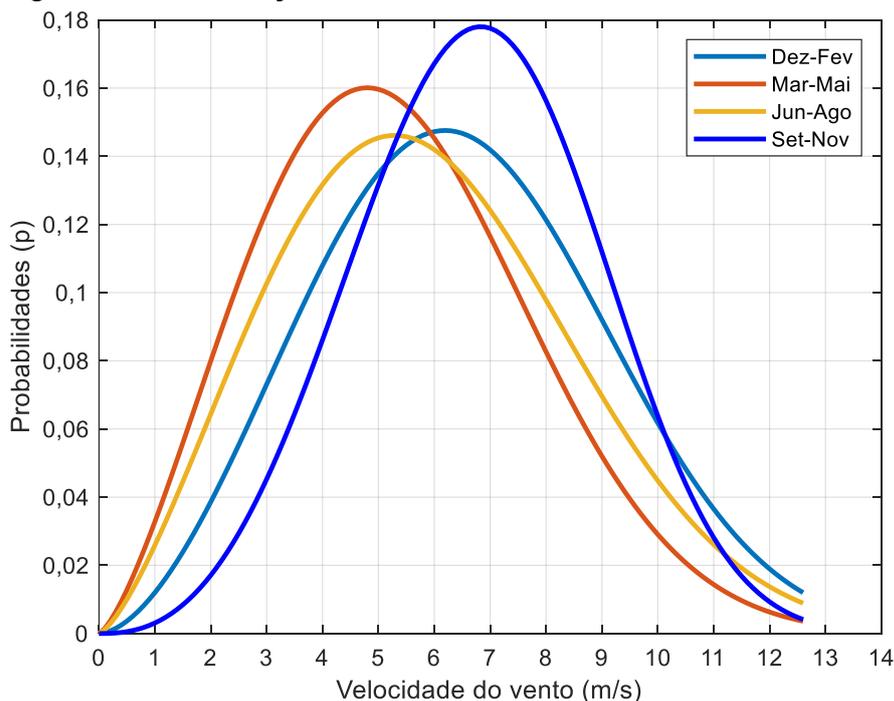
Tabela 2 – Fator de forma e de escala trimestrais da localidade.

Trimestres	$k$	$c$
Dez-Fev	2,72	7,33
Mar-Mai	2,37	6,05
Jun-Ago	2,38	6,65
Set-Nov	3,48	7,53

Fonte: CRESESB (2014).

A partir dos parâmetros da tabela (2), foram obtidas as funções de densidade de probabilidade de Weibull apresentadas na figura (7). Nesta figura, verifica-se que o trimestre de setembro a novembro, que coincide com o período seco na região, apresenta as condições mais favoráveis para geração dentre os quatros trimestres, em razão das maiores probabilidades de ocorrência de ventos de maior intensidade. A velocidade média nesse período é de cerca de 6,8 m/s. Já no trimestre de março a maio, o qual coincide com o período mais chuvoso na região, verifica-se as condições menos favorável para geração ano. A velocidade média do vento nesse período é de cerca de 4,7 m/s.

Figura 7 – Distribuições de Weibull trimestrais da localidade.



Fonte: Própria do autor (2022).

A produção energética obtida para cada trimestre é apresentada na tabela (3). Conforme esperado pela estatística do vento, a produção energética para o trimestre de setembro a novembro é a maior verificada no ano, correspondendo a 1.508,82 kWh, enquanto no trimestre de março a maio verifica-se a menor produção no ano, correspondendo a 1.051,04 kWh.

Tabela 3 – Produção energética trimestral da localidade.

Trimestres	Produção energética trimestral (kWh)
Dez-Fev	1422,99
Mar-Mai	1051,04
Jun-Ago	1219,59
Set-Nov	1508,82

Fonte: Própria do autor (2022).

A produção anual de energia verificada para a usina é de 5.202 kWh, a qual corresponde a uma produção mensal média de 433,54 kWh com um fator de capacidade de 20%. Comparando-se a geração média com o consumo mensal de projeto de 400 kWh, verifica-se que a produção energética atende às necessidades de consumo. Nos meses em que a produção mensal superar o consumo, o titular da unidade será faturado em um valor equivalente ao seu custo de disponibilidade e o excedente de energia será injetado na rede e integralizado ao saldo de créditos do titular. Nos meses em que a geração for inferior ao consumo, o déficit será compensado pelo saldo de créditos.

Para implantação da usina, o investimento total foi estimado em R\$ 21.675,66. Considerando a geração média prevista, obteve-se para o empreendimento os fluxos de caixas apresentados na tabela (4) e um *payback* de 4 anos e 5 meses. A taxa de retorno do investimento verificada foi de 29,43% ao ano.

Tabela 4 – Análise financeira.

Ano	Entrada (R\$)	Saída (R\$)	Fluxo de caixa (R\$)	VP acumulado (R\$)
0	0	-21675,66	-21675,66	-21675,66
1	4224,00	-316,80	3907,2	-17768,46
2	4752,00	-356,40	4395,6	-13372,86
3	5346,00	-400,95	4945,05	-8427,81
4	6014,25	-451,06	5563,18	-2864,62
5	6766,03	-507,45	6258,57	3393,95
6	7611,78	-570,88	7040,90	10434,85
7	8563,25	-642,24	7921,01	18355,86
8	9633,66	-722,52	8911,14	27267,00
9	10837,87	-812,84	10025,03	37292,03
10	12192,61	-914,44	11278,16	48570,20
11	13716,68	-1028,75	12687,93	61258,13
12	15431,26	-1157,34	14273,92	75532,05
13	17360,17	-1302,01	16058,16	91590,22
14	19530,20	-1464,76	18065,43	109655,65
15	21971,47	-1647,86	20323,61	129979,27
16	24717,91	-1853,84	22864,06	152843,34
17	27807,64	-2085,57	25722,07	178565,41
18	31283,60	-2346,27	28937,33	207502,75
19	35194,05	-2639,55	32554,50	240057,25
20	39593,31	-2969,49	36623,81	276681,06

Fonte: Própria do autor (2022).

Tais resultados são considerados como satisfatórios, pois o *payback* ocorre no médio prazo com uma TIR superior a 10% ao ano, demonstram a viabilidade financeira do empreendimento para a localidade do estudo. Além disso, os resultados obtidos são comparáveis aos valores tipicamente obtidos em sistemas de geração solar fotovoltaica de mesmo porte.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, buscou-se avaliar a viabilidade técnica e econômica da instalação de um aerogerador de pequeno porte numa residência localizada no município de Pesqueira/PE. Para a avaliação da viabilidade do empreendimento, realizou-se análise técnica do potencial eólico da localidade a partir da função de distribuição de Weibull e cálculo da PAE e análise financeira a partir dos indicadores financeiros *payback* e TIR.

Para suprir o consumo de 400 kWh mensal da residência, foi proposto o uso de um aerogerador de 3,1 kW de capacidade instalada a um custo total de implantação de R\$ 21.675,66. No estudo técnico, verificou-se que o gerador possui PAE estimada em 5.202 kWh, com média mensal de 433,54 kWh e fator de capacidade de 20%. A partir da análise financeira, verificou-se que o empreendimento apresenta um *payback* de 4 anos e 5 meses com uma TIR de 29,43% ao ano. Tais resultados são considerados como satisfatórios e demonstram a viabilidade financeira do empreendimento para a localidade do estudo.

Como proposta de trabalhos futuros, sugere-se um estudo comparativo entre o desempenho do gerador eólico e um sistema fotovoltaico de mesma potência, incluindo modelagem do recurso eólico no período mensal e eventuais custos de manutenção.

## REFERÊNCIAS

Avaliação da Eficiência Energética e Geração Distribuída para os próximos 10 anos (2014-2023). **EPE**, 2014. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-251/topico-311/DEA%2026%20Efici%C3%Aancia%20Energ%C3%A9tica%20e%20Gera%C3%A7%C3%A3o%20Distribu%C3%ADa%20para%20os%20pr%C3%B3ximos%2010%20anos%5B1%5D.pdf>. Acesso em: 21 dez. 2021.

BURTON, T. et al. **Windy Energy Handbook**. 3. Ed. UK: Wiley, 2021. 933 p.

**COSERN** – Companhia Energética do Rio Grande do Norte. Potencial eólico do estado do Rio Grande do Norte. Brasília – DF: Cosern/Aneel, 2003.

**CRESESB** – Centro de Referências para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito. Potencial Eólico – Atlas do Potencial Eólico Brasileiro. Rio de Janeiro – RJ: CRESESB/CEPEL, 2014.

EPE. **BEN**, 2021. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico-588/BEN\\_S%C3%ADntese\\_2021\\_PT.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico-588/BEN_S%C3%ADntese_2021_PT.pdf). Acesso em 21 dez. 2021.

Inversor híbrido on grid 3,6 kW- Deye. **TRX Solar**. Disponível em: <https://loja.trxsolar.com/inversor-solar/inversor-hibrido-on-grid-3-6kw-deye>. Acesso em: 16 abr. 2022.

MARTINELLO, DIANA. **Sistema de emulação de aerogeradores para aplicação em geração distribuída de energia elétrica**. 2015. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2015.

O que é geração distribuída. **INEE**, 2021. Disponível em: [http://www.inee.org.br/forum\\_gen\\_distrib.asp](http://www.inee.org.br/forum_gen_distrib.asp). Acesso em: 21 dez. 2021.

OLIVEIRA, U. W.; FRANCESCETTO, M. B.; ROOS, C. Viabilidade econômica de microgeradores eólicos para residências unifamiliares. **BJB**, Curitiba, v. 3, n. 4, p. 2838-2850, ago. 2021.

PARIZOTTO, R. R.; NOGUEIRA, C. E. C.; SIQUEIRA, J. A. C.; PETRÓ, E. Análise e viabilidade técnica de implementação de aerogeradores eólicos de pequeno porte em residências. **Acta Iguazu**, Cascavel, v. 1, n. 4, p. 55-64, 2012.

População mundial. **WORLDMETER**, 2008. Disponível em: <https://www.worldometers.info/br/>. Acesso em: 18 abr. 2022.

Resolução Normativa nº 482. **ANEEL**, 2012. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/bren2012482.pdf>. Acesso em: 21 dez. 2021.

Resolução Normativa nº 687. **ANEEL**, 2015. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>. Acesso em: 21 dez. 2021.

Rua São Pedro. 2022. **Google Maps**. Google. Disponível em: <https://www.google.com.br/maps/place/R.+S%C3%A3o+Pedro+-+Xucurus,+Pesqueira+-+PE,+55200-000/@-8.3481458,-36.6976051,194m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x7a83160f6052e01:0x7f4b9e1428527c1f18m2!3d-8.3486562!4d-36.6982931>. Acesso em: 16 abr. 2022.

SHARKAWI, E. A. M. et al. **Windy Energy An Introduction**. 1. Ed. Seattle: CRC, 2016. 321 p.

SILVA, Elaine. **Análise da viabilidade técnico-econômica da implementação de um sistema de microgeração eólico residencial na cidade de Mossoró-RN**. 2019. Tese (Bacharelado em ciência e tecnologia) – Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró, 2019.

SILVA, J. L. S.; CAVALCANTE, M. M.; MACHADO, R.; SILVA, M. R.; DELGADO, D. B. M. Análise do avanço da geração distribuída no Brasil. *In*: Congresso Brasileiro de Energia Solar, 7, 2018, Gramado. **Anais**. Gramado: CBENS, 2018. p. 1-10.

SOUZA, A.; OLIVEIRA, S. S.; OZONUR, D. Análise da estimativa dos parâmetros da distribuição de Weibull para velocidade do vento em Campo Grande-MS. **JEAP**, v. 4, n. 3, p. 168-179, set. 2019.

SOUZA, M. K. A. **Uma contribuição a análise das decisões de investimento privado sob a ótica do ponto de equilíbrio do investimento- PEI- considerando o valor do dinheiro no tempo**. 2006. Dissertação (Mestrado em engenharia da produção) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

Zeus 3.0 *Wind Turbine*. **TESUP**. Disponível em: <https://loja.trxsolar.com/inversor-solar/inversor-hibrido-on-grid-3-6kw-deye>. Acesso em: 16 abr. 2022.