



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
Curso de Engenharia Mecânica

KARLA MILENNA DE JESUS MACHADO

**ANÁLISE DA GERAÇÃO DE ENERGIA DE
AEROGERADORES DE PEQUENO PORTE**

SÃO LUÍS

2021

KARLA MILENNA DE JESUS MACHADO

ANÁLISE DA GERAÇÃO DE ENERGIA DE AEROGERADORES DE PEQUENO PORTE

Monografia de graduação apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual do Maranhão como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título Bacharel em Engenharia Mecânica.
Orientador: Prof. Me. Simone Cristina Neves Corrêa

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA MONOGRAFIA DEFENDIDA PELA ALUNA KARLA MILENNA DE JESUS MACHADO E ORIENTADA PELA PROF(A). ME. SIMONE CRISTINA NEVES CORRÊA.



ASSINATURA DO(A) ORIENTADOR(A)

SÃO LUÍS

2021

Machado, Karla Milenna de Jesus.
Análise da geração de energia de aerogeradores de pequeno porte /
Karla Milenna de Jesus Machado. – São Luís, 2021.

... 60

Monografia (Graduação) – Engenharia Mecânica, Universidade Estadual
do Maranhão, 2021.

Orientadora: Profa. Ma. Simone Cristina Neves Corrêa.

1.Aerogerador. 2.Energia eólica. 3.Eficiência energética.

CDU: 621.548

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA E PRODUÇÃO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Análise da Geração de Energia de Aerogeradores de Pequeno Porte

Autor: Karla Milenna de Jesus Machado

Orientador: Prof(a). Me. Simone Cristina Neves Corrêa

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Monografia:



Prof (a). Me. Simone Cristina Neves Corrêa, Presidente
Universidade Estadual do Maranhão – UEMA



Prof (a) Me. Mayara Flora Marinho Aires



Prof. Dr. Lourival Matos de Sousa Filho
Universidade Estadual do Maranhão – UEMA

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no processo de vida acadêmica do aluno.

São Luís/MA, 08 de dezembro de 2021

Aos meus pais, Maria Nilce e Carlos Antonio, e às minhas irmãs, Karen e Karolina.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Estadual do Maranhão pela oportunidade de cursar minha graduação, pelo acolhimento.

À professora e orientadora Me. Simone Cristina Neves Corrêa pela contribuição para meus conhecimentos, assim como para este trabalho.

Aos professores da instituição que contribuíram com seus ensinamentos no decorrer da graduação, permitindo o meu desenvolvimento até aqui e daqui em diante.

Aos meus amigos Leandro Martins Carneiro e Luis Felipe Furtado Pontes pelo apoio e contribuição de conhecimentos.

Aos meus pais Maria Nilce e Carlos Antonio e às minhas irmãs Karen e Karolina por estarem sempre ao meu lado me fortalecendo.

“Não importa onde uma pessoa nasce, mas quem ela escolhe ser.”

J. K. Rowling

RESUMO

A turbina eólica é um equipamento desenvolvido para a transformação da energia cinética dos ventos em energia elétrica. O presente trabalho tem como objetivo realizar um estudo de caso com uma abordagem quantitativa a análise da geração de energia de aerogeradores de pequeno porte, com o intuito da obtenção de levantamentos de especificações para o desenvolvimento de melhorias para possíveis projetos a serem produzidos, conforme informações colhidas e explicadas. Devido avanços tecnológicos, parâmetros de evoluções são ideais para desenvolvimentos, portanto, analisou-se 04 (quatro) aerogeradores de pequeno porte, sendo produtores das seguintes potências nominais: 100W, 200W, 420W e 1200W; sendo a de 100W referência para construções de baixo custo, devido à escassez deste no mercado brasileiro, produzido pelo IMT (Instituto Mauá de Tecnologia), e os outros em questão, pela ENERSUD – Energia Limpa. Foi exposta a eficiência aerodinâmica dos supracitados – respectivamente: 68%, 38%, 52% e 47% –, devido a sua responsabilidade na consequência de uma melhor eficiência energética na extração de energia cinética do vento, ao diâmetro de sua turbina. Destacou-se a necessidade da utilização de controles de velocidade, sendo o *Pitch Control* descartado pelo mercado devido seu alto custo de investimento, mas possuidor de uma ótima operação de trabalho. No caso da turbina de 100W, a falta do controlador ocasionou extração acima do limite permitido.

Palavras-chave: Aerogerador, energia eólica, eficiência energética

ABSTRACT

The wind turbine is equipment developed for transforming the kinetic energy of winds into kinetic energy. This work aims to analyze the energy generation of small wind turbines, in order to obtain specification surveys for the development of improvements for possible projects to be produced, according to collected information. Due to technological advances, evolution parameters are ideal for developments, therefore, 04 (four) small wind turbines were analyzed, being producers of the following nominal powers: 100W, 200W, 480W and 1200W; 100W being a reference for low-cost constructions, due to its scarcity in the Brazilian market, produced by IMT, and the others in question, by ENERSUD. The aerodynamic efficiency of the aforementioned were exposed, due to their responsibility in the consequence of a better energy efficiency in the extraction of kinetic energy from the wind, to the diameter of its turbine. The need to use speed controls was highlighted, with Pitch Control being discarded by the market due to its high investment cost, but with an excellent working operation.

Key words: wind turbine, wind energy, energy efficiency.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Representação das zonas de pressão da terra (Adaptado de Vian <i>et al</i> , 2021). ...	17
Figura 2.2 – Velocidade do vento em diferentes regiões (Adaptado de Vian <i>et al</i> , 2021).....	18
Figura 2.3 – Processo de conversão da energia do vento (Adaptado de Pinto, 2014)	19
Figura 2.4 -Turbina eólica de eixo horizontal (Adaptado de Suehara, 2016)	20
Figura 2.5 – Incidência do vento em uma turbina (Adaptado de Pinto, 2014)	21
Figura 2.6 – Grupos de turbinas de eixo vertical (Adaptado de Pinto, 2014)	21
Figura 2.7 – Componentes de um aerogerador de pequeno porte (Adaptado de Ribeiro e Silva, 2018)	22
Figura 2.8 – Modelo ideal do processo de conversão de energia de um aerogerador (Adaptado de Pinto, 2014)	24
Figura 2.9 – Gráfico de curva do coeficiente de potência (Adaptado de Pinto, 2014)	25
Figura 2.10 – Processo de extração de potência do vento (Adaptado de Pinto, 2014)	26
Figura 2.11 – Controle aerodinâmico de potência em Estol passivo (Adaptado de Martinello, 2015)	27
Figura 2.12 – Controle aerodinâmico de potência em Pitch (Adaptado de Martinello, 2015)	28
Figura 2.13 – Comportamento da velocidade de corrente de ar (Adaptado de Fox, 2014).....	29
Figura 2.14 – Relação de C_p com a razão v_3/v_1 (Adaptado de Ribeiro; Silva, 2018)	31
Figura 2.15 - Relação entre C_p e λ (Adaptado de Búriço, 2016)	32
Figura 3.1 – Gráfico da relação entre C_p e λ (Adaptado de Manwell; Mcgowan; Rogers, 2009)	34
Figura 3.2 – Turbina eólica Notus Marine (Adaptado de ENERSUD, 2020)	35
Figura 3.3 – Turbina Eólica Notus 138 (Adaptado de ENERSUD, 2020)	37
Figura 3.4 – Turbina Eólica Gerar Extreme (Adaptado de ENERSUD, 2020).....	39
Figura 3.5 – Turbina eólica do IMT (Adaptado de IMT, 2018).....	41
Figura 4.1 – Gráfico da Energia Anual Gerada – EAG (Adaptação de autoria, 2021)	45
Figura 4.2 – Gráfico das rotações das turbinas – EAG (Adaptação de autoria, 2021)	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Tipos de perdas de uma turbina eólica	33
(Adaptado de Pinto, 2014)	33
Tabela 3.1 – Configuração do sistema eólico utilizado	35
(Adaptado de ENERSUD, 2020)	35
Tabela 3.2 – Desempenho do aerogerador selecionado – dados do fabricante	36
(Adaptado de ENERSUD, 2020)	36
Tabela 3.3 Configuração do sistema eólico utilizado	37
(Adaptado de ENERSUD, 2020)	37
Tabela 3.4 – Desempenho do aerogerador selecionado – dados do fabricante	37
(Adaptado de ENERSUD, 2020)	37
Tabela 3.5 – Configuração do sistema eólico utilizado	39
(Adaptado de ENERSUD, 2020)	39
Tabela 3.6 – Desempenho do aerogerador selecionado – dados do fabricante	40
(Adaptado de ENERSUD, 2020)	40
Tabela 3.7 – Configuração do sistema eólico utilizado	41
(Adaptado de IMT, 2018)	41
Tabela 3.8 – Desempenho do aerogerador selecionado – dados do fabricante	41
(Adaptado de IMT, 2018)	41
Tabela 4.1 – Especificações das turbinas utilizadas da ENERSUD e da IMT	43
(Adaptado de ENERSUD e IMT, 2018 e 2020)	43
Tabela 4.2 – Comparação das especificações das turbinas	46
(Adaptado de ENERSUD e IMT, 2020)	46
Tabela 4.3 – Comparação das especificações das turbinas	48
(Adaptado de ENERSUD e IMT, 2020)	48

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANELL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CBEE	Centro Brasileiro de Energia Eólica
IEC	Comissão Eletrotécnica Internacional
CELPE	Companhia Energética de Pernambuco
CERNE	Centro de Estratégias em Recurso Naturais e Energia
EAG	Energia Anual Gerada
IMT	Instituto Mauá de Tecnologia
IMET	Instituto Nacional de Meteorologia
ISO	Organização Nacional de Normalização (<i>International Organization for Standardization</i>)
<i>HAWT</i>	Turbina eólica de eixo horizontal (<i>Horizontal Axis Wind Turbine</i>)
<i>VAWT</i>	Turbina eólica de eixo vertical (<i>Vertical Axis Wind Turbine</i>)

Lista de Símbolos

A	Área de varredura da turbina	m^2
A_e	Área da seção transversal do tubo na entrada do rotor da turbina	m^2
A_s	área da seção transversal do tubo na saída do rotor da turbina	m^2
C_p	Coefficiente de potência	%
\dot{E}_{ex}	Energia cinética extraída do vento	J
E_c	Energia cinética do vento J	J
ρ_{ar}	Densidade do ar	kg/m^3
EAG	Energia Anual Gerada	kWh
η	Eficiência aerodinâmica	%
F_c	Frequência percentual de ocorrência da velocidade do vento	%
m	Massa do ar	kg
P_n	Potência nominal do vento	W
$P(v)$	Potência produzida pela turbina na velocidade do vento específica	W
TSR	Razão de velocidade na ponta da pá	
λ	Razão de velocidade na ponta da pá	
ΔE	Varição de saída e entrada de energia cinética do Ar	J
Q	Vazão do vento que varre a turbina	m^3/s
V	Velocidade média do vento	m/s
ω_r	Velocidade angular mecânica no eixo da turbina ou rotor	rad/s
V_e	Velocidade do vento na entrada do tubo	m/s
V_s	Velocidade do vento na saída do tubo	m/s
v_1	Velocidade da massa de ar que se encontra disponível	m/s
v_2	Velocidade instantânea do ar localizada na superfície do rotor	m/s
v_3	Velocidade resultante da interação com o gerador	m/s

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Objetivos	16
1.1.1 Objetivo geral.....	16
1.1.2 Objetivos específicos	16
2 REVISÃO DA LITERATURA	17
2.1 O vento	17
2.2 Conversão da energia do vento	18
2.3 Aeroogeradores	19
2.3.1 Turbinas eólicas de eixo horizontal	19
2.3.2 Turbinas eólicas de eixo vertical.....	21
2.3.3 Aeroogeradores horizontais de pequeno porte	22
2.3.4 Configuração das pás	23
2.4 O limite de Lanchester-Betz-Joukowsky	23
2.5 Curva de potência de uma turbina eólica	25
2.6 O controle de potência de uma turbina	26
2.6.1 Controle de Estol (<i>Stall</i>)	26
2.6.2 Controle de passo (<i>Pitch</i>)	27
2.7 Potencial energético	28
2.8 A eficiência aerodinâmica de uma turbina	30
2.9 Razão da Velocidade de Ponta da Pá (TSR)	32
2.10 Rendimento do gerador de uma turbina eólica	32
2.11 O Fator de Capacidade de uma Turbina	33
3 MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1 Turbina eólica Notus Marine (200W)	35
3.2 Turbina Eólica NOTUS 138 (420W)	36
3.3 Turbina Eólica Gerar Extreme (1200W)	38
3.4 Turbina eólica do IMT (100W)	40
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
4.1 Determinação do Fator de Capacidade de uma turbina através da Energia Anual Gerada	43
4.1.1 Turbina Eólica Notus Marine	43

4.1.2 Turbina Eólica Notus 138.....	44
4.2. Comparação entre as turbinas analisadas	46
4.2.1 IMT	47
4.2.2 Notus Marine.....	47
4.2.3 Notus 138	47
4.2.3 Gerar Extreme	48
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS	50
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	51
ANEXO A– Catálogo referente à turbina eólica Notus Marine da ENERSUD	53
ANEXO B– Catálogo referente à turbina eólica Notus 138 da ENERSUD	54
ANEXO C– Catálogo referente à turbina eólica Gerar Extreme da ENERSUD	55
ANEXO D – Gráfico de Fator de capacidade médio do Maranhão.....	56
ANEXO E– Gráficos referentes à produção de energia da turbina eólica Notus Marine da ENERSUD.....	57
ANEXO F– Catálogo referente à produção de energia da turbina eólica Notus 138 da ENERSUD	58
ANEXO G– Gráficos referentes à produção de energia da turbina eólica Gerar Extreme da ENERSUD.....	59
APÊNDICE A- Tabela de dados das velocidades de vento analisadas pelo INMET	60

1 INTRODUÇÃO

Em 1992, ocorreu a primeira implantação de um aerogerador no Brasil quando o Centro Brasileiro de Energia Eólica (CBEE) em conjunto com a Companhia Energética de Pernambuco (CELPE) firmaram parceria com um instituto de pesquisas dinamarquês para a instalação de uma turbina de 225kW em Fernando de Noronha – PE. No entanto, nessa década, a energia eólica não obteve grandes avanços, mesmo após tomadas iniciativas isoladas, como a operação da primeira central eólica no Ceará, em 1999, situada na praia de Taíba (GOUVÊA e SILVA, 2018).

Conforme o aumento no custo para a produção de energia, o interesse pela geração desta, proveniente das forças do vento, apresenta-se crescente. De acordo com pesquisa apontada pela CNN (2021), hoje, a produção eólica no Brasil tem o segundo lugar como fonte de geração de energia limpa, sendo a região que abrange o Nordeste detentora das condições mais favoráveis, devido a disposição de ventos estáveis: velocidade adequada e sem súbitas mudanças de direção.

Segundo o Greenpeace (2016), o Brasil tem a possibilidade de chegar a 2050 com 100% de contribuição de fontes renováveis, gradativamente abandonando as fontes fósseis de energia. A matriz energética limpa e renovável tem como vantagem a diminuição das emissões de gases de efeito estufa, assim como a conservação dos recursos naturais, diminuição do valor das contas de luz para a população, um fornecimento de eletricidade mais seguro.

A ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), em sua resolução normativa, nº482, de 17 de abril de 2012, estabelece a possibilidade da redução significativa da conta de energia quando o consumidor produz energia renovável. Dada resolução, aplica-se a microgeradores que geram até 100 kW e minigeradores que variam de 100 kW a 1MW, os quais usam fontes de origem renovável como a solar, a eólica, a hídrica ou a biomassa.

Tendo em vista o grande crescimento voltado para o segmento eólico, nota-se o efeito do aperfeiçoamento dos projetos de aerogeradores, com o intuito do aumento significativo de sua eficiência energética. Aliado aos desenvolvimentos, tem-se o aumento da demanda energética. Desta forma, a análise da geração de energia através da evolução de outros aerogeradores mostra-se pertinente quando se tratando do objetivo de produzir modelos que

apresentem eficiência semelhantes ou melhoradas através do estudo das características aerodinâmicas já existentes.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Analisar o comportamento e a estrutura de aerogeradores de eixo horizontal de pequeno porte de forma analítica, com o intuito da determinação do rendimento dos supracitados.

1.1.2 Objetivos específicos

- Levantamento bibliográfico acerca de aerogeradores de eixo horizontal de pequeno porte;
- Seleção de modelos de aerogeradores de eixo horizontal de pequeno porte;
- Determinação da eficiência aerodinâmica de saída dos modelos selecionados;
- Comparar os resultados obtidos com os dados da literatura.

2 REVISÃO DA LITERATURA

O referente capítulo tem como objetivo contextualizar a origem e o processo de geração de energia elétrica a partir dos ventos, assim como o desenvolvimento da ferramenta proposta, tendo o estudo tomado como base para o desenvolvimento e comportamento de um aerogerador, tanto nos conceitos mecânicos quanto elétricos. Abordar-se-á as etapas voltadas para a modelagem matemática de um sistema eólico-elétrico.

2.1 O vento

O vento é o fator energético das turbinas eólicas, não produz gases de efeito estufa e não tem custo. Todavia, dito recurso não é controlável e seu armazenamento é impossibilitado; contrário à disposição das usinas hidrelétricas, referente à vazão de água em represas (VIAN *et al*, 2021).

Conhece-se por energia eólica a energia cinética decorrente das massas de ar em movimento (ANEEL, 2002). A produção da energia elétrica que é proveniente da ação do ar que, quando em movimento, resulta na rotação das pás de turbinas eólicas conectadas a um aerogerador (SUEHARA, 2016).

De acordo com Oliveira (2019), o aquecimento na superfície terrestre é proveniente da radiação solar, a qual origina a formação do vento. Diferentes quantidades de energia térmica oferecidas às zonas que são originadas da rotação e formato da terra, como pode-se ver na Figura 2.1.

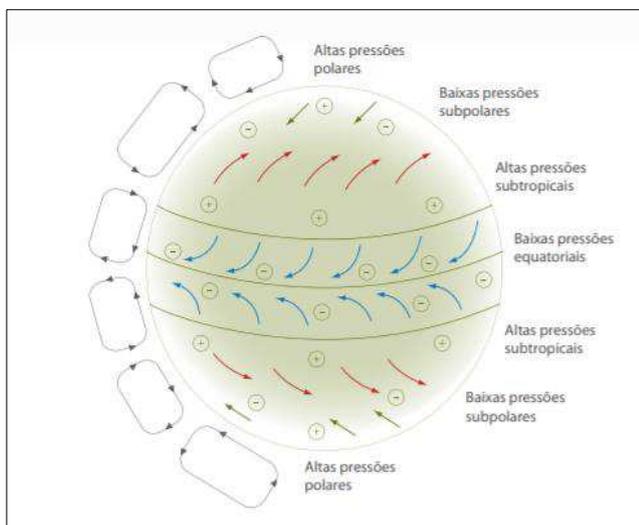


Figura 2.1 – Representação das zonas de pressão da terra (Adaptado de Vian *et al*, 2021).

A atmosfera é menos fria e possui uma pressão menor nas zonas onde essa energia térmica é mais incidente, o contrário acontece nas zonas onde a incidência da energia solar é maior. Portanto, a densidade do ar aquecido torna-se menor, resultando numa condição que se mostra favorável para a movimentação, sendo as forças de pressão responsáveis. Define-se então, o vento como o movimento de uma massa de ar entre as zonas de diferentes pressões.

Conforme o esquema na Figura 2.2, observa-se a diferença apresentada pela manifestação do vento em diferentes regiões (urbana, subúrbio ou nível do mar), podendo-se perceber que construções elevadas como prédios a velocidade do vento nesta é maior em elevadas alturas, no caso, entre 600 m e 450 m; nos subúrbios, atinge 100% nos 450 m; já no litoral, estima-se que a vento atinge sua maior eficiência abaixo de 450 m.

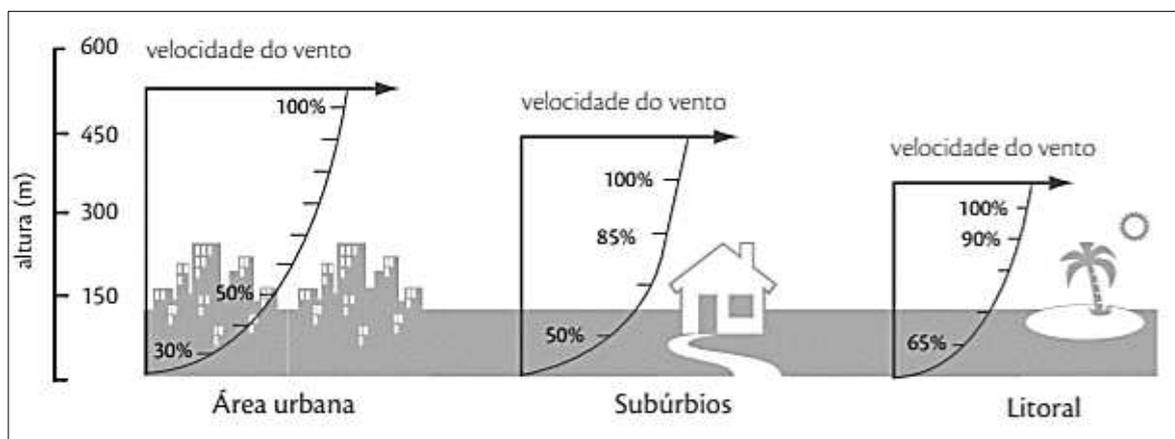


Figura 2.2 – Velocidade do vento em diferentes regiões (Adaptado de Vian *et al*, 2021).

2.2 Conversão da energia do vento

Os aerogeradores são os instrumentos que, através da absorção parcial da energia cinética do vento, têm como responsabilidade a produção de energia elétrica, Figura 2.3. Segundo Pinto (2014), a conversão da energia do vento em elétrica segue em duas etapas:

- I. Inicialmente, na turbina, ocorre a remoção da porção disponível da energia cinética para que seja convertida em energia mecânica;
- II. A energia mecânica é recebida pelo gerador e converte-a em energia elétrica, para então transmiti-la para a rede elétrica concessionária.

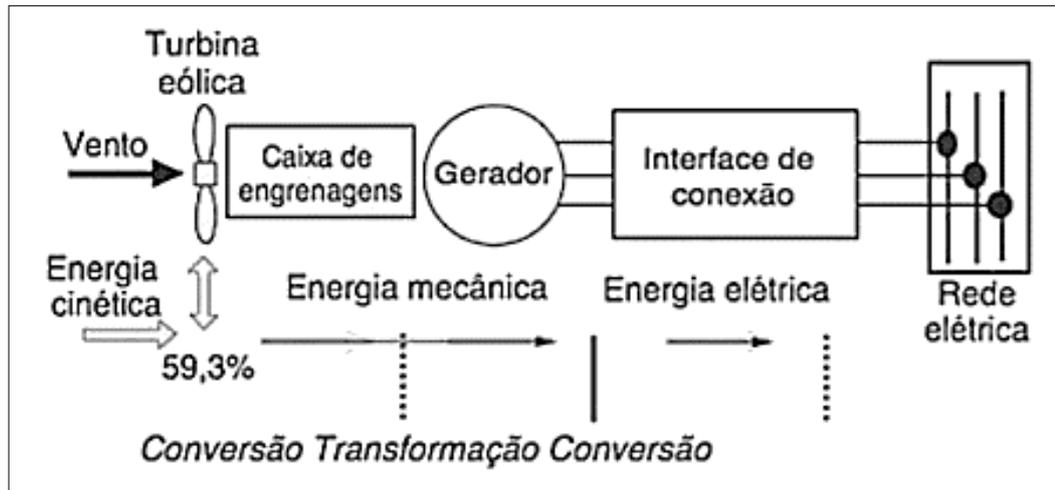


Figura 2.3 – Processo de conversão da energia do vento (Adaptado de Pinto, 2014)

2.3 Aerogeradores

São classificados de acordo com a posição do eixo que compõe seu rotor, sendo: horizontal (*Horizontal Axis Wind Turbine – HAWT*) ou vertical (*Vertical Axis Wind Turbine – VAWT*).

2.3.1 Turbinas eólicas de eixo horizontal

Como mostra a Figura 2.4, as turbinas eólicas de eixo horizontal têm sua configuração como representação mais comum e são dominantes no mercado eólico, devido a nenhum outro design atual apresentar-se de forma melhor sucedida, tratando-se de eficiência na operação e retorno de custo. Estrutura-se a partir do acoplamento de um rotor de pás, com perfis em forma de aerofólios, a um eixo horizontal (OLIVEIRA, 2019).

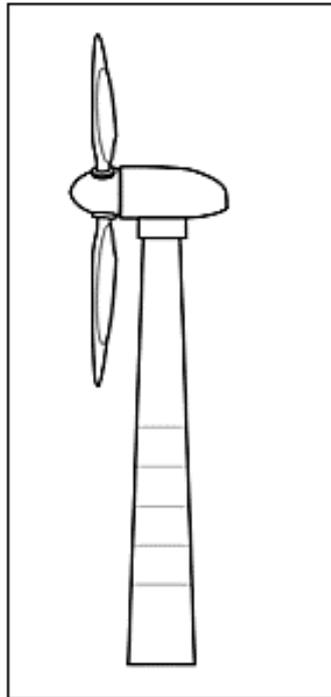


Figura 2.4 -Turbina eólica de eixo horizontal (Adaptado de Suehara, 2016)

De acordo com Santos (2017), contrário das turbinas eólicas de eixo vertical, a rotação gerada nas de eixo horizontal é realizada pela força de sustentação das pás. Geralmente, utiliza-se em sua configuração até três pás, podendo ser mais, nesse caso, chama-se “multipás”. É de forma usual a configuração tripá em virtude da melhor relação entre coeficientes de potência, custo e velocidade de rotação.

As turbinas de eixo horizontal podem ser categorizadas na divisão entre, conforme Figura 2.5, turbina *upwind* e turbina *downwind*, sendo a primeira instalada para a incidência do vento ocorrer na dianteira da varredura turbina e a segunda, na traseira (PINTO, 2014). Turbinas do tipo *upwind* não necessitam de mecanismos que influenciem no direcionamento do rotor para a direção do vento; no caso do tipo *downwind*, devido a torre ser atingida antes das pás, necessitam de um design que contribua para o vento seguir passivamente (TOLMASQUIM, 2016).

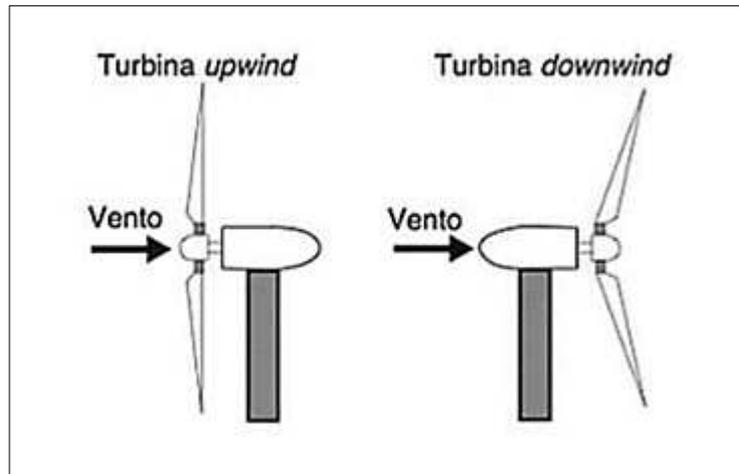


Figura 2.5 – Incidência do vento em uma turbina (Adaptado de Pinto, 2014)

2.3.2 Turbinas eólicas de eixo vertical

Congruente à Figura 2.6, as turbinas eólicas de eixo vertical são aquelas que apresentam seu eixo posicionado perpendicularmente ao solo. Diferentemente das turbinas eólicas de eixo horizontal, sua eficiência energética é menor ao ser convertida a energia do vento em eletricidade, devido à proximidade das pás com o solo, onde a velocidade do vento é menor. No entanto, tem como vantagem aceitar o vento independente de qual seja a direção, desta forma, não necessitando de um equipamento que o oriente. Os aerogeradores de eixo vertical podem ser divididos em dois grupos: Darrieus e Savonius (PINTO, 2014).

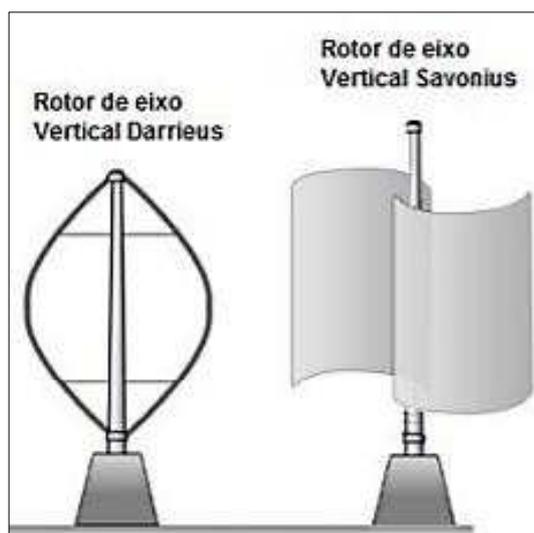


Figura 2.6 – Grupos de turbinas de eixo vertical (Adaptado de Pinto, 2014)

2.3.3 Aerogeradores horizontais de pequeno porte

A utilização das turbinas eólicas de pequeno porte ocorre principalmente em duas aplicações: na geração distribuída e na geração de energia em sistemas elétricos isolados. São regidas pela norma 61400 IEC 61400-2:2006 a qual refere-se às turbinas eólicas de pequeno porte, especificamente aerogeradores com área varrida até 200m² (IEC, 2013). A Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC) define que aerogeradores de horizontais de pequeno porte devem possuir seu rotor com diâmetro total menor que 16 m e capacidade menor que 100kW, com a instalação do seu rotor perpendicularmente posicionado em relação à torre.

A IEC através da norma 61400-2 pontua os componentes principais de um aerogerador, de acordo com os critérios estabelecidos internamente como também originado de outras normas (como a ISO). Tem-se, portanto, as partes constituintes de um aerogerador de pequeno porte representados pela Figura 2.7.

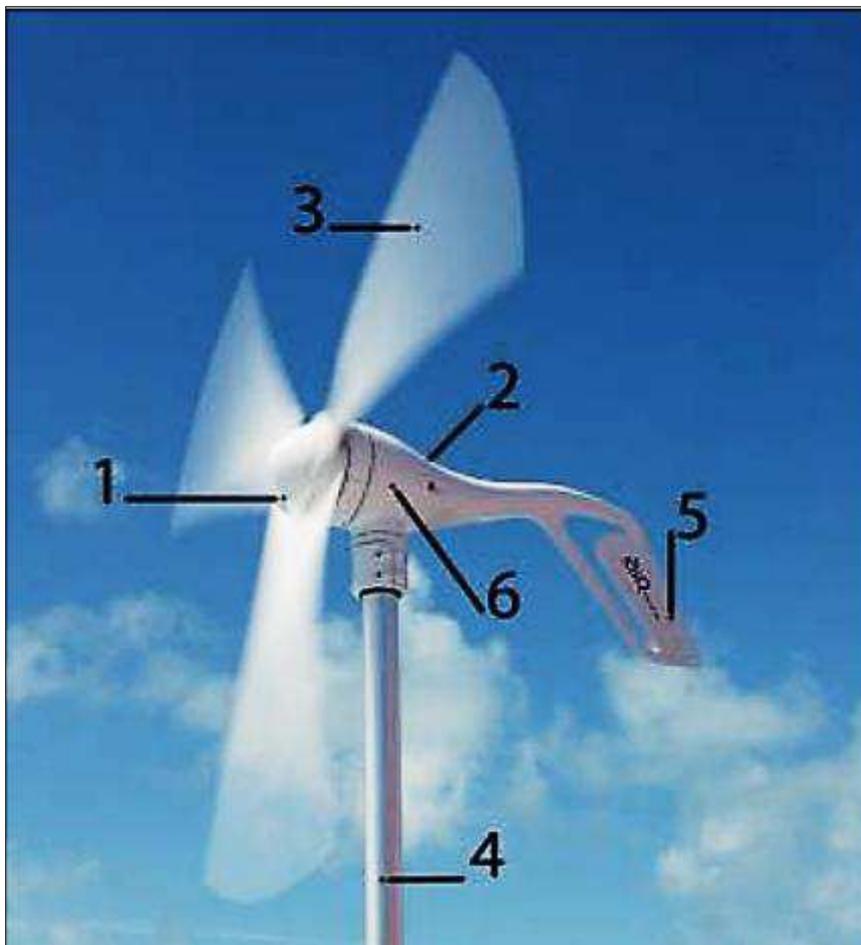


Figura 2.7 – Componentes de um aerogerador de pequeno porte (Adaptado de Ribeiro e Silva, 2018)

- 1- **Cubo** – Tem como responsabilidade a fixação das pás no rotor da turbina;
- 2- **Nacele** – Estrutura onde os equipamentos de frenagem, caixa de engrenagens, gerador elétricos estão abrigados
- 3- **Pás** – Estas têm como responsabilidade a captura de energia do vento e sua transferência para o eixo da turbina. Têm uma relação indireta entre a velocidade do eixo e a taxa de velocidade das turbinas;
- 4- **Torre** – É a sustentação do aerogerador na altura onde os ventos possuem melhores condições para o aproveitamento eólico.
- 5- **Leme** – Componente traseiro do rotor, responsável pelo alinhamento do rotor na direção desejada.
- 6- **Acoplamento e gerador** – Componentes protegidos pela carenagem que atuam juntos convertendo a energia cinética do vento em energia elétrica, acompanhados de sensores, freios mecânicos, controles.

2.3.4 Configuração das pás

Um rotor com três pás é a configuração mais comum encontrada nas indústrias. Teoricamente, estima-se que quanto maior for o número de pás, maior será o rendimento apresentado pelo aerogerador. Todavia, quanto maior for essa quantidade, a influência gerada pode tornar-se negativa, ou seja, a eficiência na aerodinâmica apresentar-se-á insignificante no rendimento da máquina. Desta forma, definiu-se pelas indústrias, no caso, economicamente falando, devido ao custo de produção dos componentes, tomou-se três como o número ideal de pás (MANWELL, 2009). Uma grande quantidade em número de pás de uma turbina apresenta também uma queda no coeficiente de potência (PINTO, 2014).

2.4 O limite de Lanchester-Betz-Joukowski

Segundo Pinto (2014), quanto a conversão de energia cinética em energia mecânica, há um limite máximo da energia disponível nos ventos que pode ser extraído por uma turbina eólica. Através da Figura 2.8 pode-se perceber que a turbina extrai a energia cinética do vento em parte.

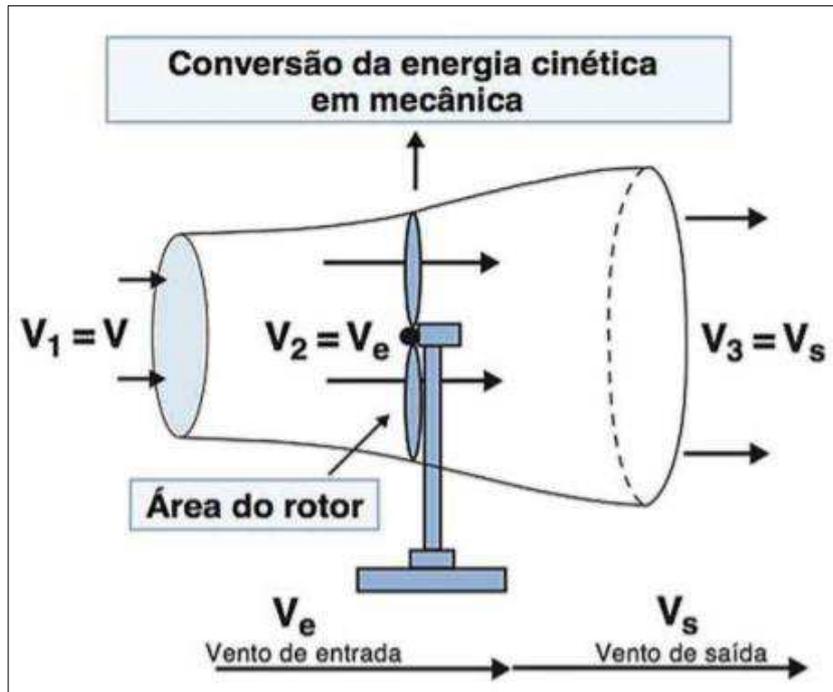


Figura 2.8 – Modelo ideal do processo de conversão de energia de um aerogerador (Adaptado de Pinto, 2014)

A equação da continuidade de Bernoulli é o princípio para demonstração da eficiência de uma turbina, a qual afirma que a vazão em um fluido é constante para diferentes pontos ao longo da vazão. Em outras palavras, Pinto (2014) menciona: “[...] o princípio de Bernoulli nos diz que, para um aumento na velocidade do fluido, acontece uma diminuição da pressão ou da energia potencial desse fluido, fato que é simultâneo para um fluido sem viscosidade.” Dita colocação pode ser analisada pela equação 2.1:

$$Q = A_e V_e = A_s V_s = \text{constante} \quad (2.1)$$

Onde Q é a vazão (m^3/s) do vento que varre (atravessa) a turbina, A_e é a área da seção transversal do tubo na entrada do rotor da turbina (m^2), V_e a velocidade do vento na entrada do tubo (m/s), A_s é a área da seção transversal do tubo na saída do rotor da turbina (m^2), V_s é a velocidade do vento na saída do tubo (m/s).

O físico alemão Albert Betz, em 1926, mostrou que a velocidade do vento na saída da turbina é limitada pela máxima potência extraída por ela. Tendo em vista que a velocidade de saída não pode ser abaixo de $1/3$ da velocidade de entrada. De forma sucinta, $2/3$ da energia do vento é extraída na entrada da turbina, assim sobrando $1/3$ da energia na saída, por

consequência, limitando a potência mecânica disponível para extração, definindo o valor que passou a ser conhecido por Limite de Betz, sendo este 59,3%, Figura 2.9.

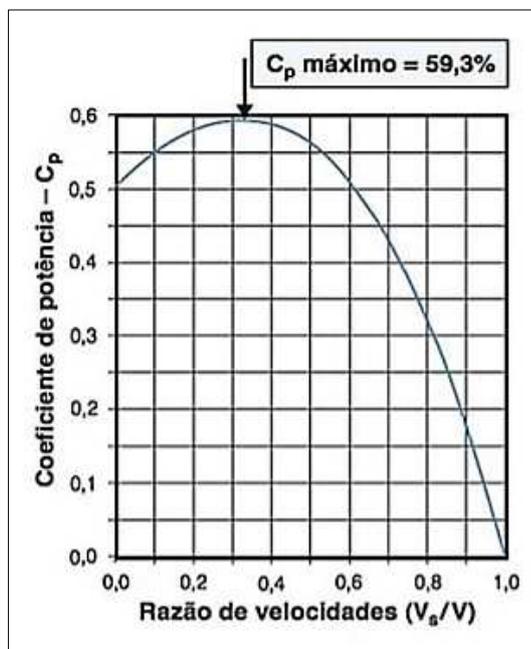


Figura 2.9 – Gráfico de curva do coeficiente de potência (Adaptado de Pinto, 2014)

O Coeficiente de Potência é uma das características mais significativas para a produção de energia eólica através de aerogeradores. Este também é conhecido por Coeficiente de Betz, tem como responsabilidade a representação da capacidade de transformação que a turbina realiza ao transformar a energia cinética do vento em energia mecânica.

2.5 Curva de potência de uma turbina eólica

“Quando uma massa de ar se desloca através da turbina, as características aerodinâmicas das pás transformam parte desta energia em trabalho de modo a induzir o movimento de rotação na turbina. No entanto, a massa de ar permanece com parte da energia inicial e se desloca com menor velocidade. Assim, a potência gerada pela turbina é dada pelo produto da potência fornecida pelo vento.” (Búrigo, 2016. p. 10)

Conforme citado por Búrigo (2016), ao atingir a velocidade de partida é o momento que se inicia a conversão de energia, todavia a operação inicial parte do seu momento de otimização de potência e velocidade, desta forma, ao atingir a velocidade nominal, consequentemente atingirá sua potência nominal, o que indica que o gerador estará

trabalhando em seu ponto ótimo. Ao ultrapassar o limite ao qual foi construído, o aerogerador necessita da estabilização de sua potência, necessitando assim de um controle de velocidade, devido a este possibilitar o trabalho em seu estado ideal, para evitar o comprometimento do equipamento, rejeitando o “excesso” de potência extraída. O respectivo processo pode ser visto pela Figura 2.10:

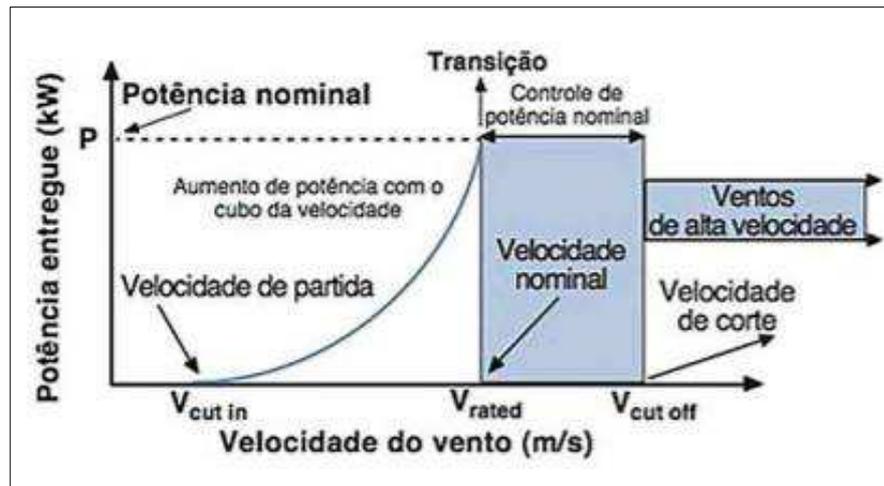


Figura 2.10 – Processo de extração de potência do vento (Adaptado de Pinto, 2014)

2.6 O controle de potência de uma turbina

Para a limitação da rotação das pás da turbina quando a velocidade do vento se apresenta superior à velocidade operação das turbinas eólicas, mecanismos de controle podem ser utilizados para essa finalidade. Suehara (2016) trata sobre dois dos métodos tradicionais que realizam esta função: controle de estol (*Stall*) e controle de passo (*Pitch*):

2.6.1 Controle de Estol (*Stall*)

Técnica passiva utilizada através da fixação das pás da turbina ao rotor em seu ângulo de passo, conforme seu projeto aerodinâmico, como pode ser visto na Figura 2.11, impossibilitando seu giro em torno de seus eixos longitudinais. A potência extraída pelas pás, quando a velocidade do vento se apresentar inferior ou igual ao valor nominal, é a máxima possível. No caso desta exceder seu valor nominal, uma região de turbulência é criada na superfície atrás da pá, identificando uma diminuição na sua força de sustentação, caracterizando o fenômeno de *Estol*. A velocidade de rotação da turbina eventualmente

apresentar-se-á com uma diminuição, consequência proveniente de tal fenômeno. Ao longo de seu eixo longitudinal, as pás geralmente são torcidas com o intuito de não haver uma diminuição abrupta da velocidade.

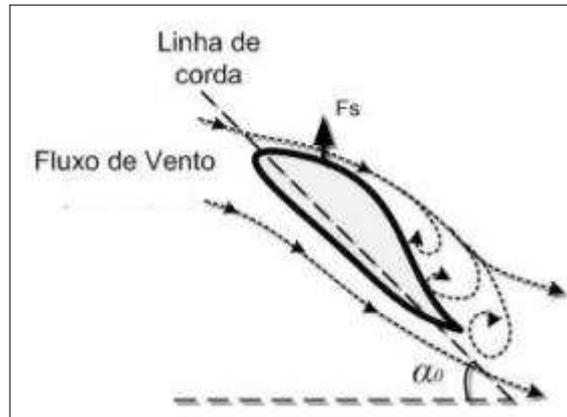


Figura 2.11 – Controle aerodinâmico de potência em Estol passivo (Adaptado de Martinello, 2015)

Tal técnica tem como vantagem a simplicidade do sistema, devido a não existência de um mecanismo em si de atuação. Todavia, necessita-se de um cálculo aerodinâmica de complexidade, promovendo a definição do ângulo de ataque para o acontecimento do efeito de Estol.

2.6.2 Controle de passo (*Pitch*)

Diferente do controle de Estol, no controle de passo o giro da pá dá-se através da direção contrária ao vento, conforme Figura 2.12. O ângulo de ataque é reduzido pelo sistema de controle quando a velocidade do vento exceder o valor nominal, girando as pás de forma gradual. Quando a velocidade do vento estiver muito elevada, seleciona-se o ângulo de passo para garantir que a turbina produza apenas sua potência nominal.

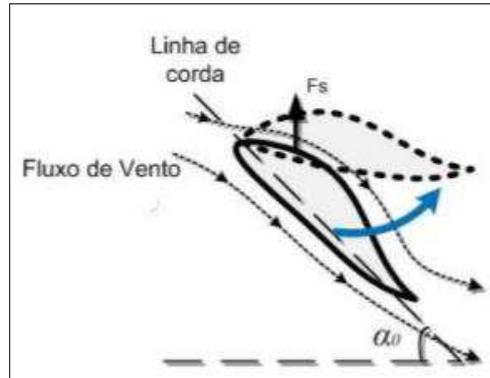


Figura 2.12 – Controle aerodinâmico de potência em Pitch (Adaptado de Martinello, 2015)

Tal controle tem como vantagens principais processo de partida assistido para baixas velocidades de vento e maior precisão na limitação da potência gerada; a desvantagem, devido sua alta complexidade de sistema, é o custo.

2.7 Potencial energético

Para a determinação da energia que pode ser extraída de uma determinada massa de ar por um aerogerador, inicialmente calcula-se a quantidade de energia cinética que esta contém através da equação do potencial energético (2.2):

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V^2 \quad (2.2)$$

Sendo E_c é a energia cinética do vento [J], m a massa de ar [kg], V a velocidade do vento $\left[\frac{m}{s}\right]$.

Pode-se observar o aproveitamento de energia através da análise da velocidade da massa de ar que se encontra disponível (v_1), como da velocidade que é resultante da interação com o gerador (v_3) e da velocidade de corrente de ar proveniente da interação com o gerador (v_3) –, sendo estas das em $\left[\frac{m}{s}\right]$, assim também é possível analisar o quanto ocorreu o seguimento de fluxo natural de ar (FOX, 2014). Observa-se o diagrama da Figura 2.13:

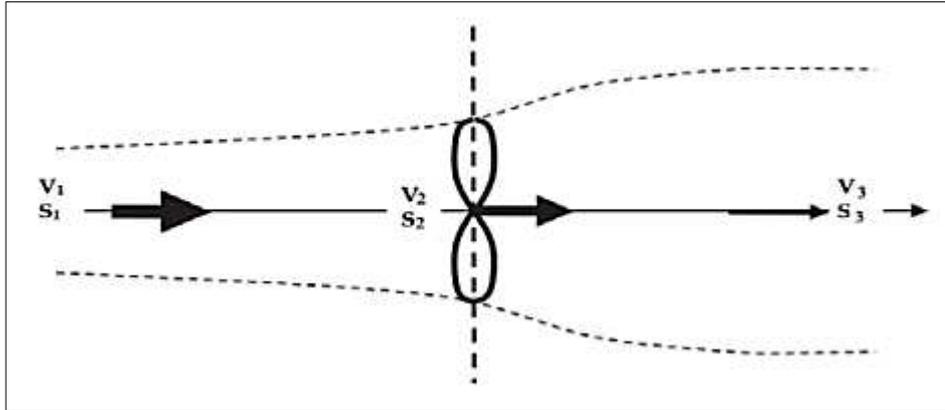


Figura 2.13 – Comportamento da velocidade de corrente de ar (Adaptado de Fox, 2014)

Fox (2014) aponta que a densidade do ar pode ser considerada constante devido a redução da massa apresentar-se mínima. No que tange a energia cinética, quando extraída pela turbina, precisa-se que sua determinação é através da diferença entre a energia cinética a montante (direção de entrada) e a energia cinética a jusante (direção de saída) do conjunto de pás, de acordo com a equação 2.3:

$$\Delta E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (v_1^2 - v_3^2) \quad (2.3)$$

Sendo ΔE a variação de entrada e saída da energia cinética [J], tem-se o cálculo da massa de ar através da equação 2.4:

$$m = \rho_{ar} \cdot A \cdot v_2 \quad (2.4)$$

Onde ρ_{ar} é a densidade do ar $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$. A área de varredura do rotor $[m^2]$ e v_2 velocidade instantânea no rotor $\left[\frac{m}{s}\right]$. Destacando v_2 , de acordo com Bretschneider (2018), e pelo teorema de Rankine-Froude, tem-se que a equação 2.5 determina a velocidade instantânea do ar localizada na superfície do rotor:

$$v_2 = \frac{v_1 + v_3}{2} \quad (2.5)$$

Bretschneider (2018) direciona que, conforme a equação 2.6, levando em consideração a massa de ar, e adicionando a velocidade no nível do rotor v_2 , o coeficiente de potência pode ser integrado a esta:

$$P_n = \frac{1}{2} \cdot \rho_{ar} \cdot A \cdot V^3 \cdot \left\{ \frac{1}{2} \left[1 + \frac{v_3}{v_1} \right] \left[1 - \left(\frac{v_3}{v_1} \right)^2 \right] \right\} \quad (2.6)$$

Tomando como base que a potência extraída do vento é determinada pela expressão $\frac{1}{2} \cdot \rho_{ar} \cdot A \cdot V^3$ e o coeficiente de potência (C_p) é através de $\left\{ \frac{1}{2} \left[1 + \frac{v_3}{v_1} \right] \left[1 - \left(\frac{v_3}{v_1} \right)^2 \right] \right\}$. Desta forma, simplificando a equação, tem-se:

$$P_n = \frac{1}{2} \cdot \rho_{ar} \cdot A \cdot V^3 \cdot C_p \quad (2.7)$$

Sendo P_n representante da potência nominal extraída do vento, ρ_{ar} a densidade específica do ar, A a área varrida pela hélice do rotor e V a velocidade nominal do vento. Tendo em vista que a área varrida é adquirida pela equação 2.8:

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (2.8)$$

Onde D em questão é o diâmetro do rotor (hélice) do aerogerador [m].

2.8 A eficiência aerodinâmica de uma turbina

Como anteriormente citado, respeitando as leis da transferência de massa, o limite para o Coeficiente de Potência é de um alcance máximo de 59,3% da energia disponível (MANWELL; MCGOAWAN; ROGERS, 2014). O coeficiente de potência C_p pode ser determinado também pela relação entre v_1 e v_3 , representada no gráfico da Figura 2.14:

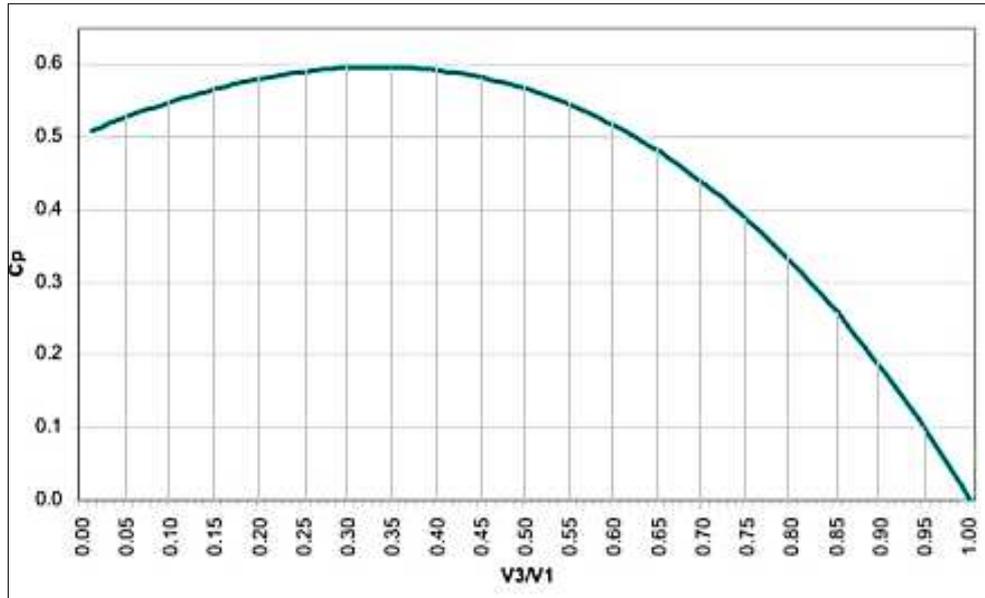


Figura 2.14 – Relação de C_p com a razão v_3/v_1 (Adaptado de Ribeiro; Silva, 2018)

Segundo Bretschneider (2018), é possível realizar um balanço energético, sendo definido o sistema semelhante à forma que Betz, e aferir a eficiência do aerogerador com a diferença entre as velocidades de entrada (v_1) e saída do sistema (v_3) – sendo v_2 a velocidade no instante do rotor –, atentando que na densidade da massa de ar não haverá redução, apenas na velocidade, assinalando a captação da energia cinética pelo rotor e seu armazenamento como energia mecânica.

Hipoteticamente, extrair toda a potência do vento significa que a velocidade do vento na saída turbina seria nula (v_3), e por conseguinte, a potência também seria anulada. Por outro lado, se na saída da turbina a velocidade incidente não for alterada ($v_1 = v_3$), a potência também se nula. Portanto, a potência máxima extraída é em um valor entre v_1 e v_3 . Em teoria, quanto maior a potência extraída pela turbina, menor será o valor de v_3 . Desta forma, pode-se perceber a existência de um limite máximo de extração de energia cinética disponível no vento. A Figura 2.14, anteriormente vista, mostra C_p em função de v_3/v_1 , podendo verificar o valor máximo de C_p , que é $16/27$, ou $0,59$, quando v_3/v_1 é igual a $1/3$.

2.9 Razão da Velocidade de Ponta da Pá (TSR)

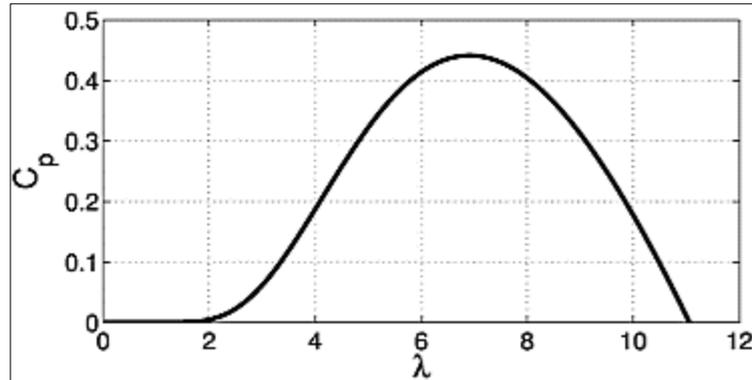


Figura 2.15 - Relação entre C_p e λ (Adaptado de Búriço, 2016)

De acordo com Búriço (2016), coeficiente de potência, dado por C_p , é resultante da aerodinâmica e da posição da turbina com relação ao fluxo de vento. Visto que C_p , como visto na Figura 2.15 depende da relação entre a velocidade de saída das pás e a velocidade do vento, esta é conhecida por Razão da Velocidade de Ponta da Pá (TSR), representada também por λ , a qual é determinada pela equação 2.9, tem seu valor aproximadamente igual a 7.

$$TSR = \lambda = \frac{V_s}{V} = \frac{\omega_r \cdot R}{V} \quad (2.9)$$

Onde R é o raio da área de varredura da turbina [m], e ω_r a velocidade angular mecânica no eixo da turbina ou rotor [rad/s].

2.10 Rendimento do gerador de uma turbina eólica

Sabe-se que a potência elétrica de uma turbina eólica é dada pela equação 2.7:

$$P_n = \frac{1}{2} \cdot \rho_{ar} \cdot A \cdot V^3 \cdot C_p \quad (2.10)$$

Desta forma, tendo em vista as perdas possivelmente envolvidas, citadas na Tabela 2.1, obtém-se a equação 2.9:

$$P_n = \frac{1}{2} \cdot \eta \cdot \rho_{ar} \cdot A \cdot V^3 \cdot C_p \quad (2.11)$$

Sendo η a eficiência aerodinâmica.

Tabela 2.1 – Tipos de perdas de uma turbina eólica
(Adaptado de Pinto, 2014)

DISPOSITIVO	PERDAS
Gerador	Mecânicas: atrito entre os componentes (mancais e ventilação) Magnéticas: histerese, correntes parasitas e saturação magnética Elétricas: correntes no enrolamento (efeito joule)
Multiplicador	Atrito entre as engrenagens: calor
Sistema elétrico	Efeito joule e efeito corona

2.11 O Fator de Capacidade de uma Turbina

“Em eólica, há duas situações distintas que tratam da eficiência. Uma é a produção de potência em relação à potência nominal (kWh/kW), a outra é a produção de potência em relação à área varrida (kWh/m²). Entretanto, nenhum desses casos indica uma boa estimativa da eficiência de uma turbina. Entra em cena, então, o fator de capacidade de uma turbina.” (PINTO, 2014, p.109)

Pinto (2014) aponta que o fator de capacidade é a relação entre a energia elétrica gerada e a sua capacidade de produção, sendo expressada através de uma taxa percentual. Adquire-se a Energia Anual Gerada (EAG) em kWh, a qual é expressada pela equação 2.12, sendo considerado o período de 1 (um) ano:

$$EAG = \sum[f(v) \cdot P(v)] \times 365 \text{ dias} \times 24 \text{ horas} = \sum[f(v) \cdot P(v)] \times 8760 \text{ (kWh)} \quad (2.12)$$

Sendo $f(v)$ a frequência percentual de ocorrência da velocidade do vento e $P(v)$ a potência [W] que é produzida pela turbina na velocidade do vento v . Desta forma, chega-se ao fator de capacidade da turbina F_c através da equação 2.13:

$$F_c = \frac{EAG}{8760 \cdot P_n} \quad (2.13)$$

Levando em conta que P_n é a potência nominal do vento. Normalmente, a variação do fator de capacidade de uma turbina eólica é a partir de 40 a 50%. Em caso de valores maiores, há uma ocorrência máxima produção de potência.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Tem-se como objetivo apresentar metodologicamente as análises, de forma explicativa com uma abordagem quantitativa, acerca das características aerodinâmicas de quatro turbinas eólicas de eixo horizontal de pequeno porte, assim como a geração da energia que lhe é proveniente para efeitos de eficiência, possibilitando uma visão da respectiva capacidade do tipo de turbina, utilizando como referência do modelo com baixa capacidade de geração de energia, produtora de no máximo 100 kW, considerando-se somente os valores nominais referentes.

Para fins de comparação e levantamentos de informações, tomou-se como base 04 (quatro) aerogeradores: 03 (três) fabricados pela empresa ENERSUD – Energia Limpa, a qual fabrica e comercializa equipamentos voltados para a geração de energia proveniente de fontes renováveis, como representante em maior número de fabricação e instalação de sistemas eólicos de pequeno porte no Brasil; o último analisado fora com o intuito de comparar baixas gerações de potências, encontrado no Instituto Mauá de Tecnologia (IMT).

Partiu-se do pressuposto um aerogerador já produzido conforme as especificações de um modelo ideal, absteve-se, portanto, da utilização do coeficiente de potência em seu ponto ideal, de acordo com a Figura 3.1, considerando-se 0,4:

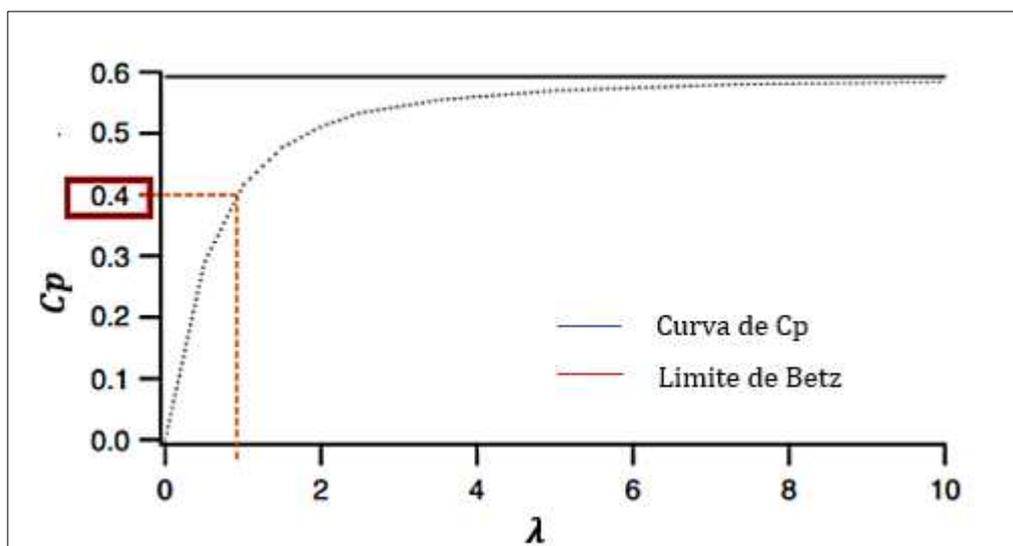


Figura 3.1 – Gráfico da relação entre C_p e λ (Adaptado de Manwell; McGowan; Rogers, 2009)

3.1 Turbina eólica Notus Marine (200W)

Considerou-se a Turbina Eólica Notus Marine, vista na Figura 3.2, com potência nominal 200W em tensão de saída 24V – foi desenvolvida para suprir pequenas necessidades de energia.



Figura 3.2 – Turbina eólica Notus Marine (Adaptado de ENERSUD, 2020)

A configuração acerca dos principais dados técnicos voltados para o sistema eólico selecionado pode ser vista na Tabela 3.1, extraídos do ANEXO A:

Tabela 3.1 – Configuração do sistema eólico utilizado
(Adaptado de ENERSUD, 2020)

Configuração da Notus Marine	
Diâmetro da hélice	1,12 m
Número de pás	3
Material de pás	Compósito de Fibra de Vidro
Vida útil do projeto	20 anos
Peso Total	11 kg
Proteção conta altas velocidades	Controle de passo
Controle de Velocidade	Stall Control
Gerador	Síncrono ímã permanente
Tipo de ímã do gerador	Neodímio
Topologia do Gerador	Fluxo Axial
Sistema elétrico	Trifásico
Número de pólos	14

Tem-se também exposto na Tabela 3.2 o desempenho que representa o aerogerador selecionado, conforme dados de seu fabricante:

Tabela 3.2 – Desempenho do aerogerador selecionado – dados do fabricante
(Adaptado de ENERSUD, 2020)

Desempenho da Notus Marine – dados do fabricante	
Potência Nominal	200W
Rotação Nominal	900 RPM
Toque de partida	0,12 Nm
Tensão de saída	12/24 Volts
Velocidade nominal	13 m/s
Velocidade de partida	3,84 m/s
Velocidade Máxima	137 km/h
Temperatura de operação	-10 a 50°C

Considerando a necessidade de determinar a área varrida pela hélice do rotor, sendo o diâmetro da hélice 1,12 m, tem-se pela equação 2.8:

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{\pi \cdot 1,12^2}{4} \Rightarrow A = 0,98m^2 \quad (3.1)$$

Desta forma, com a área de varredura hélice encontrada na equação 3.1, 0,98m², pode-se determinar o coeficiente de potência a partir dos dados tabelados. Calculou-se o rendimento do gerador conforme a equação 2.10, sendo a potência nominal (P_n) vista na Tabela 3.2, 200W, a densidade do ar 1,225kg/m³ e a velocidade nominal de 13 m/s, obtém-se:

$$P_n = \frac{1}{2} \cdot \rho_{ar} \cdot A \cdot V^3 \cdot C_p \cdot \eta \Rightarrow 200 = \frac{1}{2} \cdot 1,225 \cdot 1,12 \cdot 13^3 \cdot 0,4 \cdot \eta \Rightarrow \eta = 0,38 \quad (3.2)$$

Conforme a equação 3.2, a Turbina Eólica Notus Marine apresentou uma eficiência aerodinâmica de 0,38 ou 38 %.

3.2 Turbina Eólica NOTUS 138 (420W)

Considerou-se a Turbina Eólica Notus 138, vista na Figura 3.3, com potência nominal 420W em tensão de saída 24V e 48V.



Figura 3.3 – Turbina Eólica Notus 138 (Adaptado de ENERSUD, 2020)

A configuração acerca dos principais dados técnicos voltados para o sistema eólico selecionado pode ser vista na Tabela 3.3 (ANEXO B):

Tabela 3.3 Configuração do sistema eólico utilizado
(Adaptado de ENERSUD, 2020)

Configuração do sistema eólico utilizado	
Diâmetro da hélice	1,38 m
Número de pás	3
Material de pás	Compósito de Fibra de Vidro
Vida útil do projeto	20 anos
Peso Total	12,5 kg
Proteção conta altas velocidades	Controle de passo
Controle de Velocidade	Pitch Control
Gerador	Síncrono ímã permanente
Tipo de ímã do gerador	Neodímio
Topologia do Gerador	Fluxo Axial
Sistema elétrico	Trifásico
Número de pólos	14

Tem-se também exposto na Tabela 3.4 o desempenho que representa o aerogerador selecionado, conforme dados de seu fabricante:

Tabela 3.4 – Desempenho do aerogerador selecionado – dados do fabricante
(Adaptado de ENERSUD, 2020)

Desempenho do aerogerador selecionado – dados do fabricante	
Potência Nominal	420W
Rotação Nominal	1100 RPM
Toque de partida	0,3 Nm
Tensão de saída (contínua)	12/24/48 Volts
Velocidade nominal	13 m/s
Velocidade de partida	2,2 m/s
Velocidade Máxima	137 km/h

Temperatura de operação	-10 a 50°C
-------------------------	------------

Conforme a Tabela 3.3, o diâmetro da hélice 1,38 m, determinou-se a área varrida pela hélice do rotor, através da equação 2.8:

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{\pi \cdot 1,38^2}{4} \Rightarrow A = 1,49m^2 \quad (3.3)$$

Desta forma, com a área de varredura hélice na equação 3.3, 1,49m², pode-se determinar o rendimento a partir dos dados tabelados. Calculou-se o rendimento conforme a equação 2.8, sendo a potência nominal (P_n) vista na Tabela 3.2 de 200W, a densidade do ar 1,225kg/m³ e a velocidade nominal de 13 m/s, obtém-se:

$$P_n = \frac{1}{2} \cdot \rho_{ar} \cdot A \cdot V^3 \cdot C_p \cdot \eta \Rightarrow 420 = \frac{1}{2} \cdot 1,225 \cdot 1,49 \cdot 13^3 \cdot 0,4 \cdot \eta \Rightarrow \eta = 0,52 \quad (3.4)$$

Conforme a equação 3.4, a Turbina Eólica NOTUS 138 apresentou um rendimento de 0,52 ou 52 %.

3.3 Turbina Eólica Gerar Extreme (1200W)

A Turbina Eólica Gerar Extreme, vista na Figura 3.4, com potência nominal 1200W em tensão de saída de até 48V, fora a terceira e última selecionada para as análises:

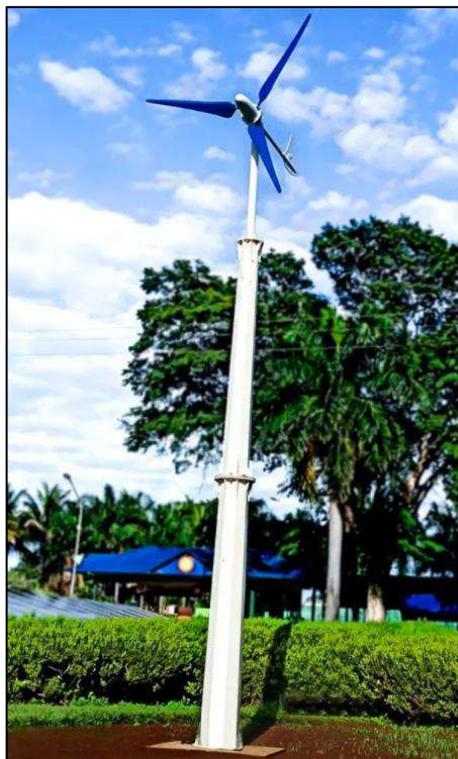


Figura 3.4 – Turbina Eólica Gerar Extreme (Adaptado de ENERSUD, 2020)

A configuração acerca dos principais dados técnicos voltados para o sistema eólico selecionado pode ser vista na Tabela 3.5, extraídos do ANEXO C:

Tabela 3.5 – Configuração do sistema eólico utilizado
(Adaptado de ENERSUD, 2020)

Configuração do sistema eólico utilizado	
Diâmetro da hélice	2,46 m
Número de pás	3
Material de pás	Compósito de Fibra de Vidro
Vida útil do projeto	20 anos
Peso Total	39 kg
Proteção conta altas velocidades	Controle de passo
Controle de Velocidade	Stall Control
Gerador	Síncrono ímã permanente
Tipo de ímã do gerador	Neodímio
Topologia do Gerador	Fluxo Axial
Sistema elétrico	Sem escovas e trifásico – saída AC
Número de pólos	14

Tem-se também exposto na Tabela 3.6 o desempenho que representa o aerogerador selecionado, conforme dados de seu fabricante:

Tabela 3.6 – Desempenho do aerogerador selecionado – dados do fabricante
(Adaptado de ENERSUD, 2020)

Desempenho do aerogerador selecionado – dados do fabricante	
Potência Nominal	1200W
Rotação Nominal	480 RPM
Toque de partida	0,3 Nm
Tensão de saída	24/48 Volts (contínua)
Velocidade nominal	13 m/s
Velocidade de partida	2,2 m/s
Velocidade Máxima	137 km/h
Temperatura de operação	-10 a 50°C

Considerando a necessidade de determinar a área varrida pela hélice do rotor, sendo o diâmetro da hélice 2,46 m (Tabela 3.5), tem-se:

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{\pi \cdot 2,46^2}{4} \Rightarrow A = 4,75m^2 \quad (3.5)$$

Com a área de varredura hélice, 4,75m², pode-se determinar o coeficiente de potência a partir dos dados tabelados. Calculou-se o rendimento através da equação 2.11, sendo a potência nominal (P_{vento}) vista na Tabela 3.6 de 1200W, a densidade do ar 1,225kg/m³ e a velocidade nominal do vento de 13 m/s, obtém-se:

$$P_{vento} = \frac{1}{2} \cdot \rho_{ar} \cdot A \cdot V_{vento}^3 \cdot C_p \Rightarrow 1200 = \frac{1}{2} \cdot 1,225 \cdot 4,75 \cdot 13^3 \cdot 0,4 \cdot \eta \Rightarrow \eta \cong 0,47 \quad (3.6)$$

Conforme a equação 3.2, a Turbina Eólica NOTUS Marine apresentou um rendimento de 0,47 ou 47 %.

3.4 Turbina eólica do IMT (100W)

Considerou-se a Turbina Eólica do IMT, vista na Figura 3.5, com potência nominal de 100W em tensão de saída 14V – foi desenvolvida para suprir pequenas necessidades de energia.



Figura 3.5 – Turbina eólica do IMT (Adaptado de IMT, 2018)

A configuração acerca dos principais dados técnicos voltados para o sistema eólico selecionado pode ser vista na Tabela 3.7:

Tabela 3.7 – Configuração do sistema eólico utilizado
(Adaptado de IMT, 2018)

Configuração da IMT	
Diâmetro da hélice	0,9 m (900mm)
Número de pás	3
Material de pás	Fibra de nylon
Peso Total	5 kg
Regulação de velocidades	Sem (velocidade constante)
Gerador	Síncrono ímã permanente
Tipo de ímã do gerador	Neodímio
Topologia do Gerador	Fluxo Axial

Tem-se também exposto na Tabela 3.8 o desempenho que representa o aerogerador selecionado, conforme dados de seu fabricante:

Tabela 3.8 – Desempenho do aerogerador selecionado – dados do fabricante
(Adaptado de IMT, 2018)

Desempenho da IMT – dados do fabricante	
Potência Nominal	100W
Rotação Nominal	800 RPM
Toque de partida	1,2 Nm
Tensão de saída	10 a 14 Volts (contínua)
Velocidade nominal	10 m/s
Velocidade de partida	2 m/s
Temperatura de operação	25°C

Considerando a necessidade de determinar a área varrida pela hélice do rotor, sendo o diâmetro da hélice 0,9 m, tem-se pela equação 2.8:

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,9^2}{4} \Rightarrow A = 0,64m^2 \quad (3.7)$$

Desta forma, com a área de varredura hélice encontrada na equação 3.7, 0,64 m², pode-se determinar o coeficiente de potência a partir dos dados tabelados. Calculou-se o rendimento do gerador conforme a equação 2.10, sendo a potência nominal (P_n) vista na Tabela 3.2, 100W, a densidade do ar 1,225kg/m³ e a velocidade nominal de 10 m/s, obtém-se:

$$P_n = \frac{1}{2} \cdot \rho_{ar} \cdot A \cdot V^3 \cdot C_p \cdot \eta \Rightarrow 100 = \frac{1}{2} \cdot 1,225 \cdot 0,64 \cdot 10^3 \cdot 0,4 \cdot \eta \Rightarrow \eta = 0,63 \quad (3.8)$$

Conforme a equação 3.2, a Turbina Eólica NE-100S apresentou uma eficiência aerodinâmica de 0,63 ou 63%.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A área de varredura e a eficiência de conversão de energia cinética em energia eólica são fatores que influenciam na produção gerada, mas não são os melhores índices de estimativa, desta forma, analisou-se a geração de energia conforme seu aproveitamento de acordo com a ocorrência da velocidade do vento produzido em São Luís do Maranhão, levando-se em consideração a necessidade de uma base para os cálculos das frequências percentuais deste, de modo a encontrar a Energia Anual Gerada (EAG), pelas turbinas, sendo analisada assim como seu fator de capacidade, determinado através do levantamento de velocidades do vento aferida pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), visto no APÊNDICE A, assim como os dados dos aerogeradores nos ANEXOS A, B, C; o levantamento gráfico no ANEXO D; e como base de comparação os ANEXOS E, F e G.

4.1 Determinação do Fator de Capacidade de uma turbina através da Energia Anual Gerada

Para a determinar o Fc e a EAG, utilizou-se os elementos que compõem a Tabela 4.1 para fins de comparações:

Tabela 4.1 – Especificações das turbinas utilizadas da ENERSUD e da IMT
(Adaptado de ENERSUD e IMT, 2018 e 2020)

Turbinas	Notus Marine	Notus 138	Gerar Extreme	IMT
Características				
Potência nominal	200W	420W	1200W	100 W
Área varrida pela turbina	0,98 m ²	1,49 m ²	4,75 m ²	0,68 m ²
Velocidade nominal do vento	13 m/s	13 m/s	13 m/s	10 m/s
Tensão de saída	12/24 Volts (contínua)	12/24/48 Volts (contínua)	24/48 Volts (contínua)	10 a 14 Volts (contínua)

4.1.1 Turbina Eólica Notus Marine

Encontrou-se a EAG da Turbina Eólica Notus Marine através da equação 2.10, substituindo os dados referentes a turbina em questão:

$$EAG = \sum[f(v) \cdot P(v)] \times 8760 (kWh) = 0,3 \times 200 \times 8760 (kWh) = 525,6 kW \quad (4.1)$$

Encontrado o EAG na equação 4.1, substitui-o na equação 2.11:

$$F_c = \frac{EAG}{8760 \cdot P_n} = \frac{525.600}{8760 \cdot 200} \Rightarrow F_c = 0,3 \quad (4.2)$$

Entende-se que o fator de capacidade de 30%, calculado na equação 4.2, irá produzir 525,6 kW por ano.

4.1.2 Turbina Eólica Notus 138

Encontrou-se a EAG da Turbina Eólica Notus 138 através da equação 2.10, substituindo os dados referentes a turbina em questão:

$$EAG = \sum[f(v) \cdot P(v)] \times 8760 \text{ (kWh)} = 0,3 \times 420 \times 8760 \text{ (kWh)} = 1103,76 \text{ kW} \quad (4.3)$$

Encontrado o EAG na equação 4.1, substitui-o na equação 2.11:

$$F_c = \frac{EAG}{8760 \cdot P_n} = \frac{1103,76}{8760 \cdot 420} \Rightarrow F_c = 0,3 \quad (4.4)$$

Portanto, o fator de capacidade de 30%, calculado na equação 4.3, irá produzir 1103,76 kW por ano.

4.1.3 Turbina Eólica Gerar Extreme

Encontrou-se a EAG da Turbina Eólica Gerar Extreme através da equação 2.10, substituindo os dados referentes a turbina em questão:

$$EAG = \sum[f(v) \cdot P(v)] \times 8760 \text{ (kWh)} = 0,3 \times 1200 \times 8760 \text{ (kWh)} = 3153,6 \text{ kW} \quad (4.5)$$

Encontrado o EAG na equação 4.1, substitui-o na equação 2.11:

$$F_c = \frac{EAG}{8760 \cdot P_n} = \frac{3.153.600}{8760 \cdot 1200} \Rightarrow F_c = 0,3 \quad (4.6)$$

Entende-se que o fator de capacidade de 30%, calculado na equação 4.6, irá produzir 3153,6 kW por ano.

4.1.4 Turbina Eólica do IMT

Encontrou-se a EAG da Turbina Eólica IMT através da equação 2.10, substituindo os dados referentes a turbina em questão:

$$EAG = \sum[f(v) \cdot P(v)] \times 8760 \text{ (kWh)} = 0,3 \times 100 \times 8760 \text{ (kWh)} = 262,8 \text{ kW} \quad (4.7)$$

Obtido o EAG na equação 4.7, substitui-o na equação 2.11:

$$F_c = \frac{EAG}{8760 \cdot P_n} = \frac{262800}{8760 \cdot 100} \Rightarrow F_c = 0,3 \quad (4.8)$$

Entende-se que o fator de capacidade de 30%, calculado na equação 4.8, irá produzir 262,8 kW por ano, podendo atender

Obtidas as energias anuais geradas, pode-se ver o levantamento destas através do gráfico exposto na Figura 4.1, tendo em vista que todas apresentaram um mesmo fator de capacidade, 30%, a Gerar Extreme apresentou uma capacidade maior de produção. Todavia, não indica a maior detentora de rendimento, visto que cada uma tem sua produção realizada com a capacidade de geração de energia para tipos de diferentes de aplicação.

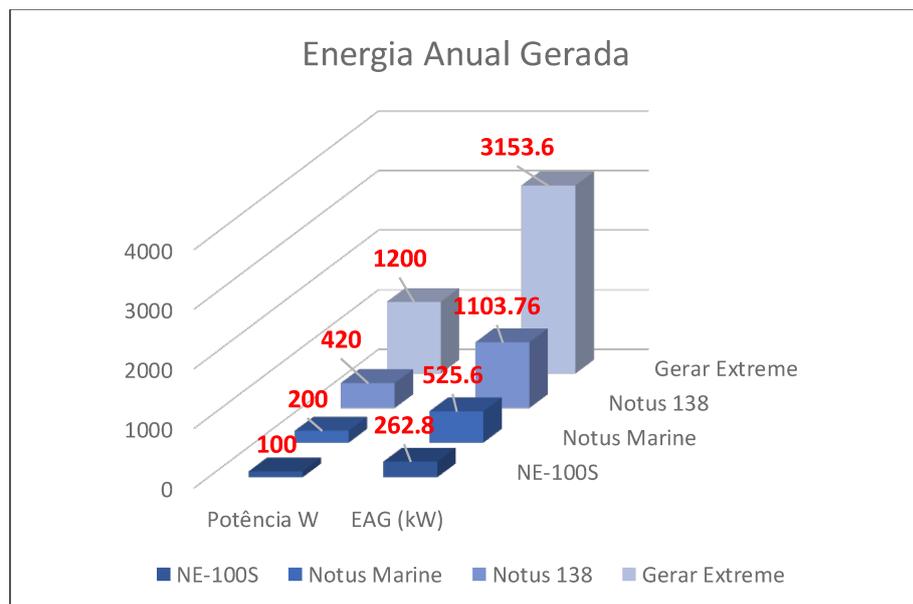


Figura 4.1 – Gráfico da Energia Anual Gerada – EAG (Adaptação de autoria, 2021)

4.2. Comparação entre as turbinas analisadas

A Tabela 4.2 apresenta os dados referentes às turbinas analisadas com o intuito do levantamento para fins de comparação:

Tabela 4.2 – Comparação das especificações das turbinas
(Adaptado de ENERSUD e IMT, 2020)

Turbinas	IMT	Notus Marine	Notus 138	Gerar Extreme
Potência nominal	100W	200W	420W	1200W
Rotação	800 RPM	900 RPM	1100 RPM	480 RPM
Área varrida pela turbina	0,22 m ²	0,98 m ²	1,49 m ²	4,75 m ²
Diâmetro do rotor	0,9m	1,12m	1,38 m	2,46 m
Eficiência aerodinâmica	68%	38%	52%	47%
Velocidade nominal	10 m/s	13 m/s	13 m/s	13 m/s
Controle de velocidade	-	<i>Stall Control</i>	<i>Pitch Control</i>	<i>Stall Control</i>

Conforme a Tabela 4.2, vê-se a eficiência aerodinâmica gerada pelas turbinas conforme seus dados obtidos. Percebe-se que aquela de maior eficiência apresenta uma menor potência nominal, no caso, a turbina da IMT, com relação a que apresenta uma maior, a Gerar Extreme, demonstrada na Figura 4.2.

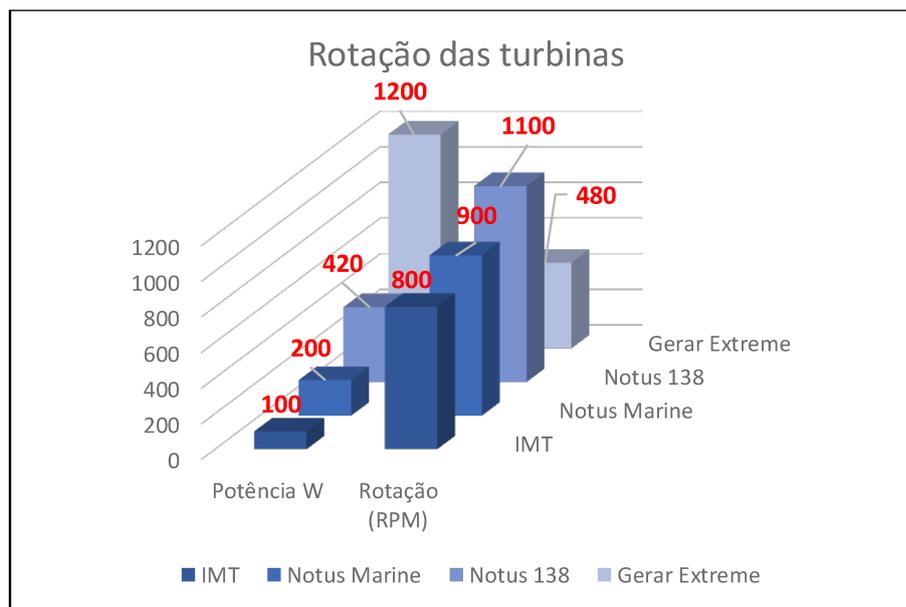


Figura 4.2 – Gráfico das rotações das turbinas – EAG (Adaptação de autoria, 2021)

Devido ao rendimento aerodinâmico corresponder à eficiência aerodinâmica da turbina, podendo variar de acordo com o perfil aerodinâmico e o número de pás, necessitou-se analisar a influência da Razão da Velocidade de Ponta da Pá (TSR), sabendo-se de sua relação com o coeficiente de potência. Tendo em vista a rotação produzida por estas, a Figura 4.2 apresenta as comparações dos supracitados entre sim, conforme suas potências nominais:

4.2.1 IMT

Determinou-se o TSR do IMT através da equação 2.9, substituiu-se as variáveis através dos dados obtidos na Tabela 01, rotação ω_r de 800 RPM, o diâmetro do rotor de 0,9m e a velocidade do vento de 10 m/s:

$$TSR = \lambda = \frac{\omega_r \cdot R}{V} = \frac{83,78 \cdot 0,45}{10} \Rightarrow \lambda = 3,77 \quad (4.7)$$

Conforme a equação 4.7, a razão da ponta da pá é de 3,77.

4.2.2 Notus Marine

Determinou-se o TSR da Notus Marine através da equação 2.9, substituiu-se as variáveis através dos dados obtidos na Tabela 01, a rotação ω_r de 900 RPM, o diâmetro do rotor de 1,13m e a velocidade do vento de 13 m/s:

$$TSR = \lambda = \frac{\omega_r \cdot R}{V} = \frac{94,25 \cdot 0,56}{13} \Rightarrow \lambda = 4,06 \quad (4.8)$$

Conforme a equação 4.8, a razão da ponta da pá é de 4,06.

4.2.3 Notus 138

Determinou-se o TSR da Notus 138 através da equação 2.9, substituiu-se as variáveis através dos dados obtidos na Tabela 01, a rotação ω_r de 1100 RPM, o diâmetro do rotor de 1,38m e a velocidade do vento de 13 m/s:

$$TSR = \lambda = \frac{\omega_r \cdot R}{V} = \frac{115,2 \cdot 0,69}{13} \Rightarrow \lambda = 6,11 \quad (4.9)$$

Conforme a equação 4.9, a razão da ponta da pá é de 6,11.

4.2.3 Gerar Extreme

Determinou-se o TSR da Notus 138 através da equação 2.9, substituiu-se as variáveis através dos dados obtidos na Tabela 01, a rotação ω_r de 480 RPM, o diâmetro do rotor de 2,46 m e a velocidade do vento de 13 m/s:

$$TSR = \lambda = \frac{\omega_r \cdot R}{V} = \frac{50,27 \cdot 1,23}{13} \Rightarrow \lambda = 4,75 \quad (4.10)$$

Conforme a equação 4.10, a razão da ponta da pá é de 4,75.

Pinto (2014) considera que um desempenho ótimo para um rotor de três pás varia de 7 a 8, no caso das turbinas de grande porte; no que tange as de pequeno porte, de 5 a 7. Entende-se, portanto, que a Notus Marine se apresenta dentro de sua faixa de construção com 6,11. No caso do aerogerador do IMT, percebe-se que este apresentou uma baixa TSR: 3,77. No entanto, conforme seu fabricante, o intuito a ser alcançado é de 4, devido sua produção ser de alcance limitado, rotores com pequenos diâmetros não atendem essencialmente a ordem máxima para produção, assim também vale para a Notus Marine.

Segundo Pinto (2014), nas suas condições de melhor operação, as turbinas podem chegar até 80% do limite. Entretanto, a faixa de operação de eficiência aerodinâmica sem comprometer o trabalho de operação, consiste de 45% a 50%. Tem-se na Tabela 4.3 a comparação das eficiências das turbinas, assim como os dados encontrados do decorrer do estudo.

Tabela 4.3 – Comparação das especificações das turbinas
(Adaptado de ENERSUD e IMT, 2020)

Turbinas	IMT	Notus Marine	Notus 138	Gerar Extreme
Características				
Potência nominal	100W	200W	420W	1200W
Rotação	800 RPM	900 RPM	1100 RPM	480 RPM
Área varrida pela turbina	0,22 m ²	0,98 m ²	1,49 m ²	4,75 m ²
Eficiência aerodinâmica	68%	38%	52%	47%
Razão de Velocidade de Ponta da Pá (TSR)	3,77	4,06	6,11	4,75
Velocidade nominal	10 m/s	13 m/s	13 m/s	13 m/s
Controle de velocidade	-	Stall Control	Pitch Control	Stall Control

Analisou-se os respectivos desempenhos, tendo em vista os controles de velocidade utilizados, sendo a *Notus Marine* e a *Gerar Extreme* usuária do Controle de Estol, estas que possuem suas pás projetadas para a diminuição da eficiência quando o vento atingir altos valores, enquanto que a *Notus Marine* com o *Pitch Control* tem capacidade de maior produção de energia sem a diminuição de sua eficiência. A turbina do IMT obteve uma eficiência acima do necessário devido a falta de um controlador que limite essa extração de potência.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS

A respectiva monografia compreendeu-se a partir do estudo bibliográfico dos métodos de construção, estendendo-se à aerodinâmica de aerogeradores horizontais de pequeno porte até seus métodos analíticos. Todavia, a variação pode ser realizada com a utilização de softwares específicos, o qual não foi o intuito da pesquisa, senão a comparação analítica entre os equipamentos em questão. Conforme dados obtidos, para a projeção de aerogeradores de pequeno porte, fora proporcionada a obtenção de características aerodinâmicas mais próximas dos ideais teoricamente expostos.

As características aerodinâmicas de um aerogerador horizontal de pequeno porte (não se limitando a estes) são influenciadas pela estrutura da pá de sua turbina, considerando seu comprimento, área, material como também seu posicionamento, levantando o fato da dimensão da área varrida do rotor, visto que este, quanto menor for, menor será sua produção de energia. Entretanto, sua capacidade de geração é congruente às necessidades de uso.

A opção de comparação de controles de velocidade levantou a questão da eficiência da sua aplicação em aerogeradores de pequeno porte, quando se tratando da instabilidade do comportamento dos ventos e da extração destes, visto que sua utilização é limitada pelas indústrias aos de médio e grande porte, devido a seu alto custo, entretanto, o *Pitch Control* mostrou-se detentor de características que valham seu investimento. Desta forma, como proposta de trabalhos futuros, sugere-se o estudo da emulação do controle de velocidade citado, com o intuito de analisar o comportamento de um aerogerador de pequeno porte, levando em consideração a relação do Coeficiente de Potência com a Razão da Velocidade de Ponta da Pá.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL: Resolução Normativa nº 482, de 17 de Abril de 2012. 14 p.

BRASIL. Instituto Nacional de Meteorologia. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Estações Automáticas. Disponível em: <<https://portal.inmet.gov.br/>>. Acesso em: 15 nov. 2021.

BRETSCHNEIDER, Maximillian da Rosa. **Projeto E Simulação De Pás Para Aerogerador Horizontal De Pequeno Porte**. 2018. 92 f. Dissertação de mestrado (Mestre Profissional em Tecnologia de Materiais e Processos Industriais), Universidade Feevale, Novo Hamburgo, 2018.

BÚRIGO, Lucas Rocha. **Estudo de um sistema para conexão de aerogeradores de pequeno porte com a rede elétrica**. Orientador: Ivo Barbi. 2016. 164 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2016.

ENERSUD (Rio de Janeiro). **Energia Limpa e Sustentável**. Disponível em: <https://www.enersud.com.br/>. Acesso em: 10 set. 2021

FOX, R. W; MCDONALD, A. T; PRITCHARD, P.J. **Introdução a mecânica dos fluidos**. 8 ed. Rio de Janeiro: LTC Ltda, 2014.

GOUVÊA, Renato Luiz Proença de; SILVA, Paulo Azzi da. Desenvolvimento do setor eólico no Brasil. **Bndes**, Rio de Janeiro, v. 15, n. 49, p. 81-118, jun. 2018

IEC. **IEC 61400-2: Small wind turbines**. International Electrotechnical Commission. Londres, Inglaterra, 2013. 164 p.

INSTITUTO MAUÁ DE TECNOLOGIA – IMT (São Paulo). **Microturbina eólica Mauá e Manual do Mundo**. 2018. Disponível em: <https://maua.br/graduacao/microturbina-eolica-maua-manual-do-mundo>. Acesso em: 12 set. 2021.

MANWELL, James; MCGOWAN, Jon; ROGERS, Anthony. **Wind energy explained theory design and application**. 2. ed. United Kingdom: Wiley, 2009.

MARTINELLO, Diana. Sistema de emulação de aerogeradores para aplicação em geração distribuída de energia elétrica. 2015. Dissertação (Mestre em Engenharia Elétrica) - Universidade Tecnológica Federal Do Paraná. Paraná, 2015.

OLIVEIRA, Fernando Victor Mesquita. **Projeto de um aerogerador de baixa escala com intensificador de potência**. 2019. 60 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

PINTO, Milton de Oliveira. **Fundamentos de energia eólica**. Rio de Janeiro: LTC, 2014. 726 p.

REVOLUÇÃO ENERGÉTICA. Brasil: Greenpeace, 2016. Disponível em: <https://www.greenpeace.org/static/planet4-brasil-stateless/2018/07/Relatorio_RevolucaoEnergetica2016_completo.pdf>. Acesso em: 20 out. 2021.

RIBEIRO, Anna Livia de Souza; SILVA, Gabriel Pereira da. **Projeto de Concepção de Unidade de Geração Eólica de Pequeno Porte.** 2018. 105 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica), Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Rio de Janeiro, 2018.

SANTOS, Gustavo B. Secim dos. **Projeto de aerogerador horizontal comercial de pequeno porte.** 2017. 112p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2017.

SUEHARA, Bruno Batista. **Controle da velocidade angular de uma turbina eólica de eixo horizontal via planicidade diferencial.** Orientador: Eugênio L. F. Fortaleza. 2016. 105 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas Mecatrônicos) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

TOLMASQUIM, Mauricio Tiomno. **Energias Renováveis:** hidráulica, biomassa, eólica, solar, oceânica. Rio de Janeiro: EPE, 2016. 452 p.

VIAN, Ângelo; TAHAN, Carlos Marcio Vieira; AGUILAR, Guido Javier Rostegui; GOUVEA, Marcos Roberto; GEMIGNANI, Matheus Mingatos Fernandes. **Energia Eólica:** fundamentos, tecnologia e aplicações.1. ed. São Paulo: Blucher, 2021. 146 p.

ANEXO A– Catálogo referente à turbina eólica Notus Marine da ENERSUD

LINHA NOTUS

A Linha NOTUS da Enersud® foi desenvolvida para suprir pequenas necessidades de energia ao menor custo em dois modelos, Notus 112 - 250 W e Notus 138 - 350 W.

Suas principais vantagens são a FÁCIL INSTALAÇÃO e o BAIXO NÍVEL DE RUIDO. Possuem um sofisticado sistema de controle de velocidade por controle de passo, que garantem MÁXIMA SEGURANÇA em qualquer tipo de operação. Pode ser instalada tanto em conexão na rede pública quanto *off-grid*, tornando-a ideal também para locais isolados.

É recomendada a utilização da Linha NOTUS para diversas aplicações, sendo as mais comuns:

- Veleiros e Embarcações em geral
- Telecomunicações
- Iluminação de Rua e Residencial
- Residências de Baixo Consumo

CARACTERÍSTICAS DAS TURBINAS NOTUS

Configuração

Parâmetro	112	138
Diâmetro da hélice	1,12 m	1,38 m
Número de Pás	3	
Tipo de Pás	Torcida (5 aerofólios)	
Material das Pás	Composito de Fibra de Vidro	
Vida útil	20 anos	
Peso Total	11 Kg	12,5 kg
Proteção contra altas velocidades	Stall (Controle de Passo) - 17,5 m/s	
Controle de velocidade	Active Stall	
Sistema magnético	Neodímio (ímã permanente) e Sem Escovas	
Caixa de Engrenagens	Não Possui (Drive direto)	
Sistema elétrico	Trifásico - Saída DC Retificada	
Tipo de Alternador Elétrico	Fluxo Axial (encapsulado em epóxi)	
Materials Anti Corrosão	Alumínio / Inox / Mat. Galvanizado	
Balancamento - Dinâmico	Verificação pós-pintura	
Diâmetro do Tubo na Ponta da Torre	48 mm	

Desempenho

	250 w	350 w
Potência Nominal	250 w	350 w
Rotação Nominal	1100 RPM	
Torque de partida	0,3 Nm	
Tensão de saída	12/24/48 Volts	
Velocidade Nominal	12,5 m/s	
Velocidade de Partida	2,2 m/s	
Velocidade Máxima	137 km/h	
Temperatura de operação	-10 a 50 °C	

Potência



Geração



Onde Estamos

Rua: Dr. Heitor da Costa Matta s/n,
Lote 31, Quadra 10 - Bairro Inojá
CEP: 24.943-870 Maricá - RJ

Email: enersud@enersud.com.br
Telefone: (+55) 21 3710-0896



2017 ENERSUD®. Todos os direitos reservados

ANEXO B– Catálogo referente à turbina eólica Notus 138 da ENERSUD



AEROGERADOR NOTUS 138

Unidade de geração eólica de múltiplas aplicações dotada de sistema de controle de passo e alternador de alto torque (patenteados).

Aplicações: Carregamento de baterias, bombeamento DC, iluminação, telecomunicações, poste eólico (iluminação) geração híbrida (com solar).

Parâmetro	138
Diâmetro da hélice	1,38 m
Número de pás	3
Tipo de pás	Torcida (5 aerofólios)
Vida útil	20 anos
Peso Total	12,5 kg
Controle de velocidade	Stall
Proteção contra altas velocidades	Active Stall (Controle de Passo)
Sistema magnético	Neodímio (ímã permanente)
Sistema elétrico	Trifásico
Tipo de Alternador Elétrico	Fluxo Axial (encapsulado em epóxi)
Materiais Anti Corrosão	Alumínio / Inox / Mat. Galvanizado
Balanceamento - Dinâmico	Verificação pós-pintura
Classe de Vento (IEC) ²	III Vmed = 7,5 m/s



Altura\Velocidade	5 m/s	5,5 m/s	6 m/s	6,5 m/s	7 m/s	7,5 m/s
Incidência direta	41	61	73	83	92	99
15 m	30	39	49	59	69	78
12 m	27	36	45	54	64	73
09 m	24	32	40	49	58	67
06 m	20	26	34	42	50	59

TESTE DE POTÊNCIA - NOTUS 138



A tabela acima se refere a uma estimativa de energia gerada em kw.h/mês em diferente alturas de torres, considerando as velocidades obtidas no Atlas Eólico Brasileiro, considerando o fator de forma igual a 2. Tabela e gráfico são válidos para unidades de 24 e 48 V

ANEXO C– Catálogo referente à turbina eólica Gerar Extreme da ENERSUD



AEROGERADOR GERAR J-Tele

Unidade de geração eólica otimizada para uso em geração de energia para instalações de telecomunicações

Aplicações: Carregamento de baterias em locais de ventos desde fracos até de extrema velocidade.

CARACTERÍSTICAS GERAR 246

Diâmetro das pás	2,46 m
Número de pás	3
Construção das pás	Torcida (10 aerofólios)
Vida útil	20 anos
Peso total	38 kg
Sistema de proteção	Active stall
Sistema magnético	Neodímios
Sistema elétrico	Trifásico
Tensões (off grid)	24v/48 V
Giro de busca do vento	360º (total)
velocidade nominal	500 rpm

Turbina com alternador ampliado e baixa rotação.



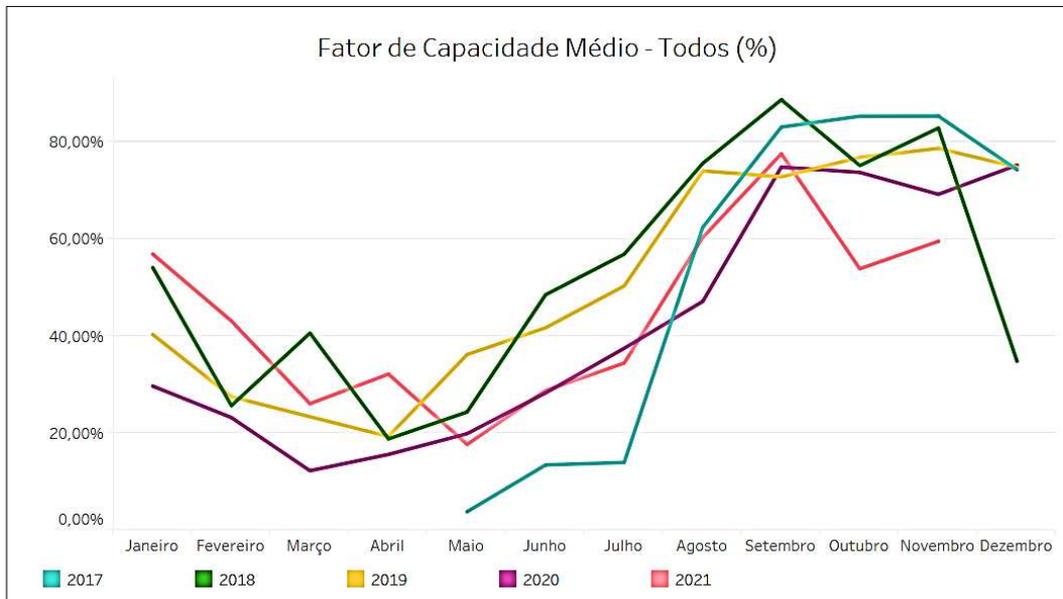
Velocidade/Altura	4,0 m/s	4,5 m/s	5,0 m/s	5,5 m/s	6,0 m/s	6,5 m/s	7,0 m/s	7,5 m/s
15m	29	44	62	83	105	129	152	174
12m	26	40	56	76	97	119	142	164
9m	23	34	49	67	86	107	129	151
6m	18	28	41	55	73	92	112	133

POTÊNCIA GERAR 246

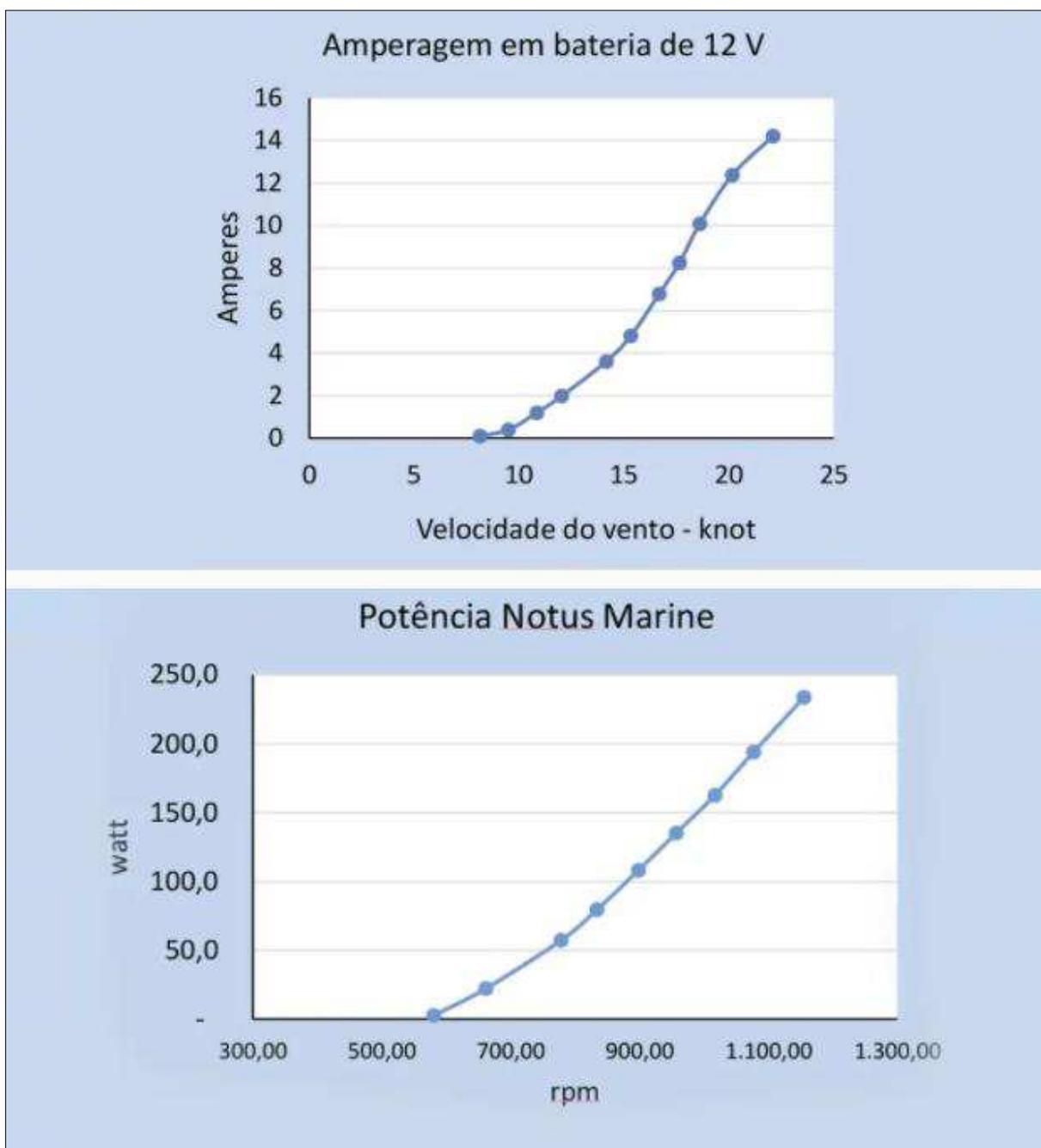


A tabela acima se refere a uma estimativa de energia gerada em kw.h/mês, em diferente alturas de torres, considerando as velocidades obtidas no Atlas Eólico Brasileiro, considerando o fator de forma igual a 2 e a rugosidade baixa.

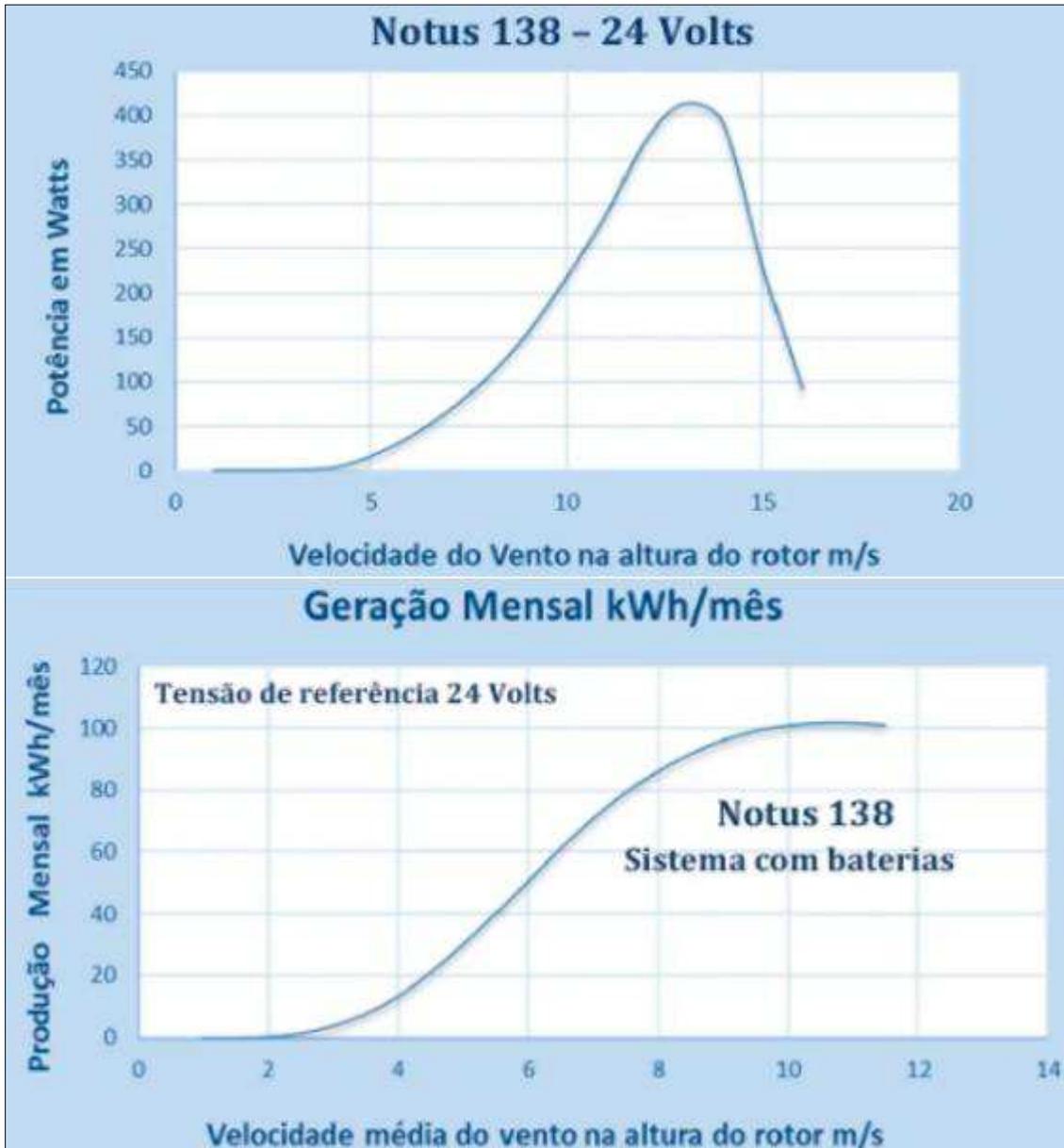
ANEXO D – Gráfico de Fator de capacidade médio do Maranhão



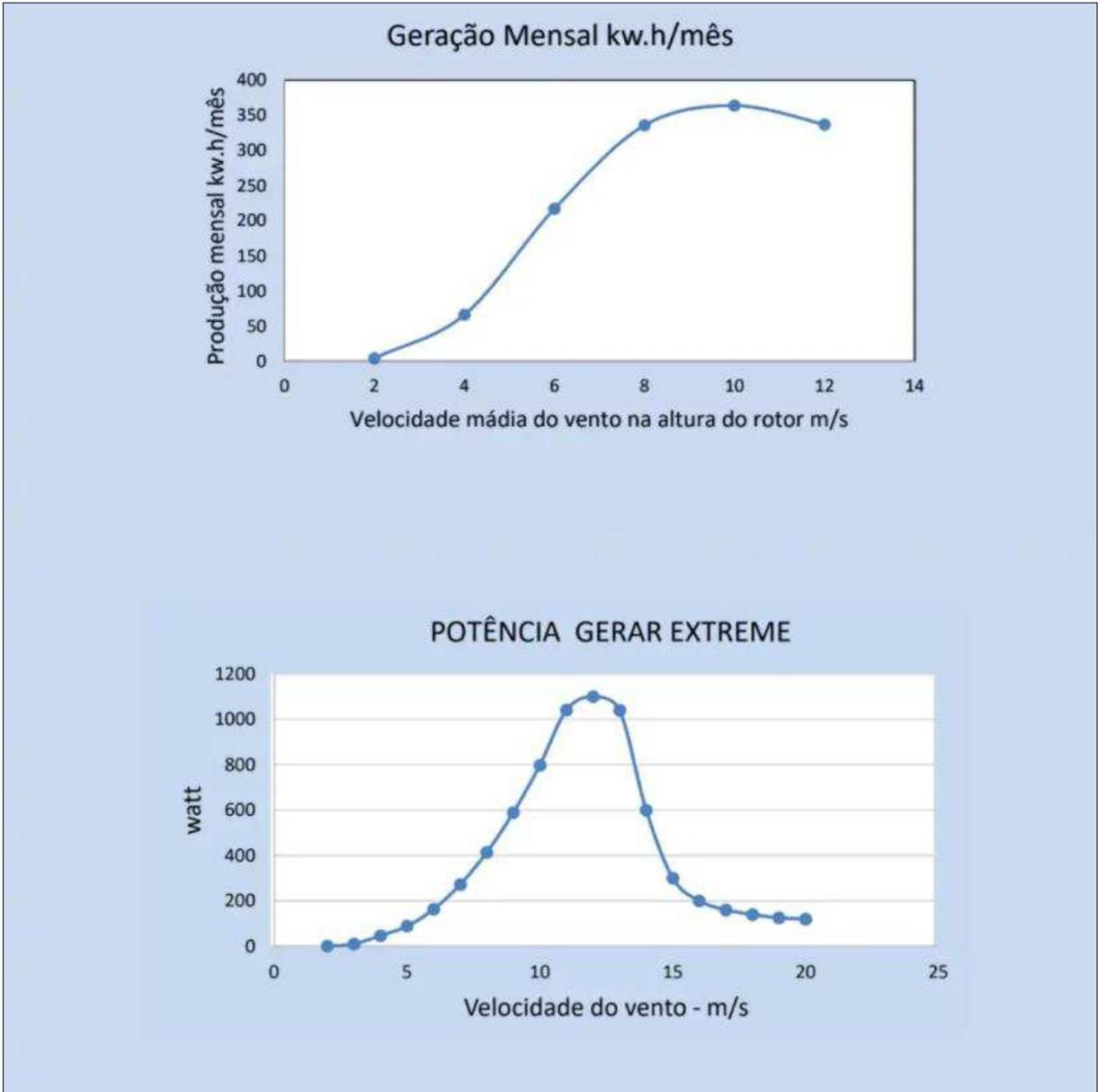
ANEXO E- Gráficos referentes à produção de energia da turbina eólica Notus Marine da ENERSUD



ANEXO F- Catálogo referente à produção de energia da turbina eólica Notus 138 da ENERSUD



ANEXO G– Gráficos referentes à produção de energia da turbina eólica Gerar Extreme da ENERSUD



APÊNDICE A- Tabela de dados das velocidades de vento analisadas pelo INMET

DATA	HORA	VENTO (m/s)
15/11/2021	00:00	1,2
15/11/2021	01:00	1,5
15/11/2021	02:00	2,7
15/11/2021	03:00	0,8
15/11/2021	04:00	0,5
15/11/2021	05:00	0,1
15/11/2021	06:00	0,4
15/11/2021	07:00	0,0
15/11/2021	08:00	0,7
15/11/2021	09:00	0,9
15/11/2021	10:00	1,0
15/11/2021	11:00	1,6
15/11/2021	12:00	2,7
15/11/2021	13:00	2,9
15/11/2021	14:00	3,0
15/11/2021	15:00	3,6
15/11/2021	16:00	3,3
15/11/2021	17:00	3,9
15/11/2021	18:00	3,6
15/11/2021	19:00	3,2
15/11/2021	20:00	3,6
15/11/2021	21:00	2,5
15/11/2021	22:00	2,2
15/11/2021	23:00	1,7