



APROVEITAMENTO EÓLICO PARA UMA VILA DE PESCADORES

Ana Elisa da Silva Menezes

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Jorge Luiz do Nascimento

RIO DE JANEIRO

DEZEMBRO DE 2012

APROVEITAMENTO EÓLICO PARA UMA VILA DE PESCADORES

Ana Elisa da Silva Menezes

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

Aprovada por:

Prof. Jorge Luiz do Nascimento, Dr. Eng.

Prof. Luís Guilherme Barbosa Rolim, Dr.-Ing.

Prof. Walter Issamu Suemitsu, Dr. Ing.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

DEZEMBRO DE 2012

Silva Menezes, Ana Elisa da

Aproveitamento Eólico para uma Vila de Pescadores/ Ana Elisa da Silva Menezes, Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Elétrica, 2012.

xiv, 93 p.: Il.; 29,7 cm.

Orientador: Jorge Luiz do Nascimento

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Elétrica, 2012.

Referências Bibliográficas: p. 83-86.

1.Geração de Energia Eólica. I.Nascimento, Jorge Luiz do.
II.Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Elétrica. III.Título.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu pai André Luiz Gomes Menezes por todo o apoio e investimento que possibilitou o meu ingresso à Universidade Federal do Rio de Janeiro e a conclusão do curso de Engenharia Elétrica.

Agradeço à minha mãe Letícia Fátima da Silva Menezes por todo incentivo, dedicação e suporte durante o Ensino Fundamental e Ensino Médio e durante os 5 anos de faculdade.

Agradeço a minha irmã Ana Letícia da Silva Menezes pelo incentivo a escolha do curso de Engenharia Elétrica e a área de atuação.

Agradeço a todos os professores do Departamento de Engenharia Elétrica pelo tempo dedicado e conhecimento transmitido.

Agradeço a todos os amigos da graduação pela ajuda e incentivo nos estudos.

Agradeço ao aluno Pedro Cezar de Souza Lucena pelas sugestões e auxílio durante o desenvolvimento deste projeto. Agradeço também por todo o conhecimento que me foi transmitido e que contribuiu para a melhora do meu desempenho nas disciplinas da Graduação.

Agradeço ao meu professor orientador Jorge Luiz do Nascimento pela oportunidade de estagiar no Laboratório de Fontes Alternativas de Energia, no qual foi desenvolvido este projeto. Agradeço também por toda a dedicação e paciência que teve ao ler todos os meus relatórios e meu projeto de final de curso.

Agradeço a empresa Tecnosuporte Soluções e Serviços, pelo espaço concedido na empresa para a construção do protótipo da turbina. Agradeço também pelas doações de alguns materiais utilizados na construção do protótipo.

Resumo

A energia eólica é vista hoje, como uma das principais fontes alternativas de energia e com perspectivas de gerar quantidades substanciais de energia, sem causar os impactos ambientais provocados por grande parte das fontes convencionais, principalmente, em locais onde é difícil o acesso à rede elétrica convencional e que estão distantes dos grandes centros urbanos.

Este trabalho propõe adotar a energia eólica como alternativa de geração de energia elétrica para atender à atividade pesqueira de algumas comunidades de pescadores da cidade de Maricá, tomando como foco a Vila de Pescadores de Zacarias. O trabalho tem como objetivo dimensionar um gerador eólico de pequeno porte e custo baixo, que possa servir como módulo ou unidade de geração de energia elétrica para a vila de pescadores.

Sumário

Agradecimentos	iv
Resumo	v
Sumário	vi
Índice de Figuras	viii
Índice de Gráficos	ix
Índice de Tabelas	xi
Simbologia	xii
1. Introdução	1
2. Descrição do Projeto	4
2.1. Objetivo	4
2.2. Descrição	4
3. Geração Eólica	6
3.1. A energia eólica.....	8
3.2. Princípio de funcionamento	9
3.3. Componentes de um gerador eólico	10
3.4. Tipos de turbinas eólicas.....	11
3.4.1. Turbinas de eixo horizontal	12
3.4.2. Turbinas de eixo vertical	14
3.4.3. Turbinas de pequeno porte.....	19
3.5. Potência do vento	21
3.6. Potência aproveitável.....	22
3.7. Velocidade específica	24
3.8. Curva de potência	25
3.9. Aplicação dos sistemas eólicos	26
3.9.1. Sistemas independentes	27
3.9.2. Sistemas híbridos.....	27
3.9.3. Sistemas interligados à rede elétrica	28

4. Desenvolvimento Técnico.....	29
4.1. Ventos no local.....	29
4.2. A comunidade de pescadores	30
4.3. Consumo de energia	31
4.4. Dimensionamento da turbina	36
4.4.1. Escolha do tipo de turbina	36
4.4.2. Escolha do gerador elétrico.....	37
4.4.3. Cálculo das dimensões da turbina	38
4.4.4. Coeficiente de potência da turbina	44
4.5. Curva de desempenho do aerogerador.....	46
4.5.1. Curva de potência mecânica x velocidade de rotação	47
4.5.2. Ponto nominal de operação.....	49
4.5.3. Gerador elétrico.....	53
4.6. Sistema eólico com armazenamento de energia.....	59
4.7. Dimensionamento do banco de baterias	60
4.7.1. Balanço de energia entre geração e carga elétrica.....	61
4.7.2. Capacidade do banco de baterias	66
4.7.3. Recarga do banco de baterias.....	68
5. Conclusões	80
6. Bibliografia	83
ANEXO – Montagem da Turbina Lenz	87

Índice de Figuras

Figura 3.1 – Funcionamento de um aerogerador de eixo horizontal	10
Figura 3.2 – Turbina de eixo horizontal.....	13
Figura 3.3 – Turbina de eixo horizontal desenvolvida pela empresa Magenn Power	14
Figura 3.4 – Turbina Darrieus de pás curvas.....	15
Figura 3.5 – Turbina Darrieus de pás retas	16
Figura 3.6 – Turbina Savonius	17
Figura 3.7 – Turbina Lenz2.....	18
Figura 3.8 – Turbinas Skystream 3.7, Superwind 350 e Whisper 500	19
Figura 3.9 – Turbinas VAWT 300W, WS-0,15 B e Falcon 600W	20
Figura 4.1 – Representação dos vetores de velocidade e dos ângulos de ataque e azimute	45
Figura 4.2 – Sistema eólico com armazenamento de energia	60
Figura A.1 – Protótipo da turbina Lenz	87
Figura A.2 – Geometria da pá (dimensões em milímetro).....	88
Figura A.3 – Construção das pás da turbina.....	89
Figura A.4 – Suporte de fixação das pás.....	90
Figura A.5 – Ângulo de posicionamento das pás	91
Figura A.6 – Rotor da turbina.....	91
Figura A.7 – Torre de sustentação da turbina.....	92

Índice de Gráficos

Gráfico 3.1 – Potência eólica instalada no mundo	7
Gráfico 3.2 – Potência eólica instalada no Brasil	8
Gráfico 3.3 – Relação entre o coeficiente de potência e a razão de velocidades	23
Gráfico 3.4 – Relação entre a solidez e a velocidade específica	25
Gráfico 3.5 – Curva de potência de uma turbina eólica de 660kW	26
Gráfico 4.1 – Histograma de frequência da velocidade do vento	30
Gráfico 4.2 – Representação da carga elétrica em relação ao seu tempo de uso ao longo do dia	35
Gráfico 4.3 – Curva do coeficiente de potência em função da velocidade específica de uma turbina Lenz de três pás	46
Gráfico 4.4 – Potência mecânica em função da velocidade de rotação da turbina.....	48
Gráfico 4.5 – Potência mecânica da turbina.....	50
Gráfico 4.6 – Potência da turbina	51
Gráfico 4.7 – Estimativa da produção de energia da turbina	51
Gráfico 4.8 – Representação do ponto central de cada curva e o ponto de maior probabilidade de ocorrência de operação na curva de Potência mecânica x Velocidade de rotação	53
Gráfico 4.9 – Curva de potência do gerador de imã permanente de 50W	54
Gráfico 4.10 – Potência mecânica fornecida pela turbina ao eixo do gerador.....	56
Gráfico 4.11 – Potência elétrica do conjunto turbina-gerador	57
Gráfico 4.12 – Torque mecânico do eixo de transmissão	58
Gráfico 4.13 – Curva de desempenho do aerogerador.....	59

Gráfico 4.14 – Média horária da velocidade do vento no período avaliado	62
Gráfico 4.15 – Distribuição diária da potência elétrica gerada pelo sistema eólico	64
Gráfico 4.16 – Balanço de energia.....	65
Gráfico 4.17 – Resultado do balanço de energia entre geração e carga elétrica	65
Gráfico 4.18 – Comportamento do banco de baterias de retaguarda ao longo do dia para o perfil de vento adotado.....	74
Gráfico 4.19 – Recarga do banco de baterias de reserva	79

Índice de Tabelas

Tabela 4.1 – Quadro de cargas	33
Tabela 4.2 – Consumo de energia ao longo do dia	34
Tabela 4.3 – Área de captação de cada turbina do sistema	41
Tabela 4.4 – Turbinas Giromill com capacidade de geração de 300W dos fabricantes Bayat Energy, Ningbo Star Solar Co, Greenenergy Technology Co, Bjerga Engineering e Aeolos Wind Energy.....	42
Tabela 4.5 – Especificações do gerador de ímã permanente de 50W.....	54
Tabela 4.6 – Média horária da velocidade do vento no período avaliado.....	62
Tabela 4.7 – Potência elétrica gerada pelo sistema eólico diariamente	63
Tabela 4.8 – Comportamento do banco de baterias de retaguarda ao longo do dia	70
Tabela 4.9 – Recarga do banco de baterias de reserva.....	76
Tabela A.1 – Custo dos materiais utilizados na construção do rotor da turbina	93

Simbologia

A	Área varrida pelas pás da turbina
C_a	Coefficiente de arrasto
$C_{\text{banco baterias}}$	Capacidade de armazenamento do banco de baterias
C_p	Coefficiente de potência
C_s	Coefficiente de sustentação
$d_{\text{polia gerador}}$	diâmetro da polia onde está acoplado o gerador
$d_{\text{polia turbina}}$	diâmetro da polia onde está acoplada a turbina
D	Diâmetro do rotor
DOD	Profundidade de descarga da bateria
E	Energia cinética do vento
$E_{\text{bateria reserva}}$	Capacidade de armazenamento de energia do banco de baterias de reserva
$E_{\text{sobra 1º dia}}$	Energia de sobra do 1º dia após o dia inteiro sem geração
$E_{\text{sobra/dia}}$	Energia de sobra por dia após o 1º dia de recarga
E_{total}	Energia total produzida pela turbina
f_i	Frequência relativa de cada classe de velocidade do vento
i	Identificação do registro
k	Relação de transmissão
L	Comprimento da pá do rotor
m	Massa de ar
\dot{m}	Fluxo de massa de ar

n	Número de registros
n_i	Número de ocorrências da velocidade do vento v_i
n_{gerador}	Velocidade de rotação do gerador
n_{turbina}	Velocidade de rotação da turbina
N	Número de pás da turbina
N_{turbinas}	Número de turbinas do sistema eólico
$P_{\text{média}}$	Potência média
P_e	Potência elétrica gerada pela turbina eólica
$P_{e \text{ sistema eólico}}$	Potência elétrica gerada pelo sistema eólico
P_i	Potência fornecida pela curva de potência da turbina para cada classe de velocidade do vento
P_{mec}	Potência mecânica extraída do vento pelas pás da turbina
P_{vento}	Potência disponível no vento
R	Raio da turbina
S	Área de cada pá
T	Período total do tempo considerado na instalação
$T_{\text{mec eixo}}$	Torque mecânico do eixo de transmissão
U	Velocidade do vento não perturbado
v	Velocidade do vento
\bar{v}	Velocidade média do vento
v_i	Velocidade do vento medida
v_u	Velocidade da ponta da pá
V_a	Velocidade do escoamento axial

W	Velocidade relativa do escoamento
α	Ângulo de ataque da pá
η_c	Rendimento do controlador de carga
η_g	Rendimento do gerador
η_I	Rendimento do inversor
η_m	Rendimento do multiplicador de velocidades
θ	Ângulo de azimute
λ	Velocidade específica
ρ	Densidade do ar
ω	Velocidade angular da turbina
Ω	Solidez

1. Introdução

Desde o início do século XX, o mundo tem sofrido com a exploração de seus recursos naturais e com a poluição da atmosfera. A energia tem sido através da história, a base do desenvolvimento das civilizações. Nos dias atuais são cada vez maiores as necessidades energéticas para a produção de alimentos, bens de consumo e de produção, lazer e para promover o desenvolvimento econômico, social e cultural.

A crescente demanda por eletricidade vem sendo suprida, em grande parte, por fontes fósseis de energia. Fontes estas que têm causado uma grande preocupação ao mundo, por serem altamente prejudiciais ao meio ambiente, uma vez que durante sua queima são liberados gases poluentes, que contribuem com o aumento do efeito estufa, além de, também, serem esgotáveis, o que faz com que a dependência energética a partir delas seja um problema quando essas fontes se esgotarem.

Essa atual preocupação energética tem aumentado o interesse por outras formas de aproveitamento de energia, principalmente, pelas fontes renováveis. São consideradas fontes renováveis, aquelas fontes cuja reposição pela natureza é bem mais rápida do que sua utilização energética, como as águas dos rios, ventos, sol, marés e ondas, logo, são consideradas fontes inesgotáveis. Incluem-se também, aquelas fontes cujo manejo pelo homem pode ser efetuado de forma compatível com as necessidades de sua utilização energética, como é o caso da biomassa. Já as fontes não renováveis, são aquelas passíveis de se esgotar por serem utilizadas com velocidade bem maior que os milhares de anos necessários para sua formação, como é o caso dos combustíveis fósseis e os combustíveis nucleares.

Uma forma de geração de energia que tem se destacado no mundo e que contribui para a redução dos impactos causados pelos combustíveis fósseis é a nuclear. Tal fonte de energia elimina o problema das emissões de gases poluentes na atmosfera, porém enfrenta obstáculos no que se refere ao armazenamento dos resíduos nucleares que são eliminados durante a sua utilização. É uma fonte de energia que pode ser considerada limpa, se o seu lixo atômico for armazenado corretamente, porém se houver vazamento pode trazer consequências muito graves e até irreversíveis.

Existem outras formas de aproveitamento de energia menos agressivas ao ambiente, que vêm ganhando força no seu desenvolvimento e aplicação, e têm se tornado uma alternativa para o atual cenário energético mundial, são as chamadas Fontes Alternativas de Energia. São consideradas fontes alternativas de energia, aquelas fontes que não são convencionais e ainda estão em um estágio tecnológico embrionário. O termo fonte alternativa de energia é sinônimo de uma energia limpa, pura, não poluente, a princípio inesgotável e que pode ser encontrada em qualquer lugar, pelo menos a maioria, na natureza. Apesar de limpa, possui impactos ambientais, porém reduzidos quando comparados com os das fontes convencionais.

Dentre as fontes alternativas de energia, as que vêm se destacando são a solar e a eólica. A energia solar configura-se como uma opção de energia muito importante, por ser a fonte de energia renovável mundialmente mais disponível. A sua grande limitação está no elevado custo da tecnologia necessária para gerar energia elétrica a partir dela. A energia eólica, diferente da solar, já possui custos reduzidos e até competitivos, e atualmente diversos países a utilizam para gerar grandes potências.

No Brasil, a geração eólica e a geração solar vêm sendo aplicadas tanto para operação em paralelo com o sistema elétrico de potência, quanto para suprimento de sistemas isolados. A maior parte das aplicações é em sistemas isolados, pois a aplicação em paralelo com a rede ainda fica bastante vinculada aos aspectos econômicos e tecnológicos, uma vez que a geração solar apresenta elevados custos de implantação e a geração eólica apesar do seu custo ser atrativo, o seu aproveitamento nem sempre é possível devido à característica intermitente do vento. No caso dos sistemas isolados, tais formas de geração de energia competem com a extensão da rede elétrica, sendo muitas vezes mais vantajosas, devido ao elevado custo de instalação e manutenção das linhas de transmissão. Com isso, a utilização dessas fontes de energia tem sido bastante difundida para alimentação de comunidades onde é difícil o acesso à rede elétrica convencional e de locais distantes dos grandes centros urbanos.

O presente trabalho irá estudar uma forma alternativa de geração de energia de baixo custo para atender a atividade pesqueira artesanal de algumas comunidades de pescadores da cidade de Maricá, tomando como foco a Vila de Pescadores de Zacarias. São pescadores que há várias gerações praticam a pesca artesanal. Dentre suas tradições destacam-se a pesca artesanal e a coleta de plantas (frutos e medicinais) da Restinga de Maricá. A pesca é a principal atividade exercida pela comunidade, porém enfrentam algumas dificuldades com a atividade pesqueira, pois não possuem condições financeiras ideais para manter a energia da

rede das concessionárias necessária para abastecer refrigeradores e máquinas de produção de gelo para a conservação do pescado.

Em termos de aproveitamento de energia, tanto a energia solar quanto a energia eólica poderiam ser aproveitadas, já que há grande disponibilidade de sol e os ventos da região são apropriados para a utilização de pequenos geradores eólicos. A geração eólica, por dispor de uma tecnologia mais barata e menos complexa em relação à solar, é a forma de geração de energia que será adotada para atender a atividade pesqueira artesanal.

Neste projeto será estudado um modelo adequado de turbina eólica de pequeno porte que seja compatível com os padrões de vento da região e com as necessidades da comunidade. Serão estudados dois modelos de turbinas eólicas: Giromill (Darrieus de pás retas) e Lenz.

2. Descrição do Projeto

2.1. Objetivo

Este trabalho propõe adotar a energia eólica como alternativa de geração de energia elétrica para atender à atividade pesqueira de algumas comunidades de pescadores da cidade de Maricá. O trabalho visa dimensionar um gerador eólico de pequeno porte, de custo baixo e de fácil construção que possa servir como módulo ou unidade de geração de energia elétrica para a vila de pescadores.

2.2. Descrição

Inicialmente será realizada uma revisão teórica sobre energia eólica, contendo uma breve explicação da sua história evolutiva, aplicações, princípios de funcionamento, principais componentes e classificação dos aerogeradores e alguns fundamentos teóricos.

Após a revisão teórica sobre o tema será feito um estudo da velocidade do vento do local para o qual se pretende dimensionar a turbina. O estudo será realizado através da coleta de dados da velocidade do vento fornecidos por uma estação anemométrica próxima ao local da instalação. Após a coleta de dados será efetuado um tratamento estatístico dos mesmos para possibilitar a análise da velocidade dos ventos durante o período em que foram feitas as medições e determinar a velocidade média dos ventos no local.

Será estimado o consumo de energia das cargas que serão atendidas pelo sistema eólico para que seja possível dimensionar a turbina eólica de acordo com a potência necessária para supri-las.

Para o dimensionamento da turbina será realizado um levantamento de alguns modelos de turbinas eólicas já existentes no mercado, em que serão analisados alguns dados como potência nominal, velocidade do vento nominal, velocidade de rotação nominal, coeficiente

de potência e dimensões da mesma. Essas informações servirão como referência para o dimensionamento da turbina deste projeto.

Após o dimensionamento, será explicado, no Anexo, o processo de montagem do protótipo da turbina dimensionada neste projeto.

3. Geração Eólica

Desde a antiguidade, a energia eólica vem sendo utilizada pela humanidade e tem ajudado o homem em diversas atividades como a moagem de grãos e bombeamento de água, e com o passar dos anos, passou a ser utilizada para gerar energia elétrica.

As primeiras turbinas eólicas utilizadas para produção de eletricidade foram desenvolvidas no final do século XIX. No entanto, essas turbinas se mostraram altamente ineficazes tanto do ponto de vista tecnológico quanto do ponto de vista financeiro, despertando pouco interesse no desenvolvimento das tecnologias na área [1].

A utilização da energia eólica para produção de eletricidade ganhou força durante a Segunda Guerra Mundial, sendo uma forma de os países economizarem os combustíveis fósseis. Porém, após o fim da Segunda Guerra os combustíveis fósseis voltaram a abundar em todo o cenário mundial e a energia eólica acabou ficando em segundo plano.

Na década de 70, do século XX, com o choque do petróleo, alguns países se viram obrigados a procurar por fontes alternativas de energia e os investimentos em pesquisa em energia eólica voltaram a ganhar força.

Na década de 90, do século XX, surgiu o primeiro marco regulatório de incentivo à geração de energia por fontes alternativas. A Lei de Fomento à Eletricidade, ou *Stromeinspeisungsgesetz*, criou a *feed-in tariff*, no Brasil conhecida como tarifa-prêmio, que garantia aos produtores de energia que utilizassem fonte eólica ou solar a compra de toda energia gerada por um preço equivalente, no mínimo, a 90% do preço médio de venda de energia. Esse incentivo possibilitou o crescimento bastante expressivo da potência eólica instalada no mundo a partir do meio da década de 90 [1].

Nos últimos anos a energia eólica tem despontado como uma das principais fontes alternativas de energia e é vista hoje como umas das fontes alternativas com perspectivas de gerar quantidades substanciais de energia sem causar os impactos ambientais provocados por grande parte das fontes convencionais. A partir do meio da década de 90, a energia eólica tem apresentado um crescimento bastante expressivo, principalmente devido aos incentivos governamentais e a evolução da tecnologia de aerogeradores. A potência eólica instalada no

mundo já chegou a aproximadamente 237 GW em 2011 e as expectativas para os próximos cinco anos é de um crescimento de 255 GW [2].

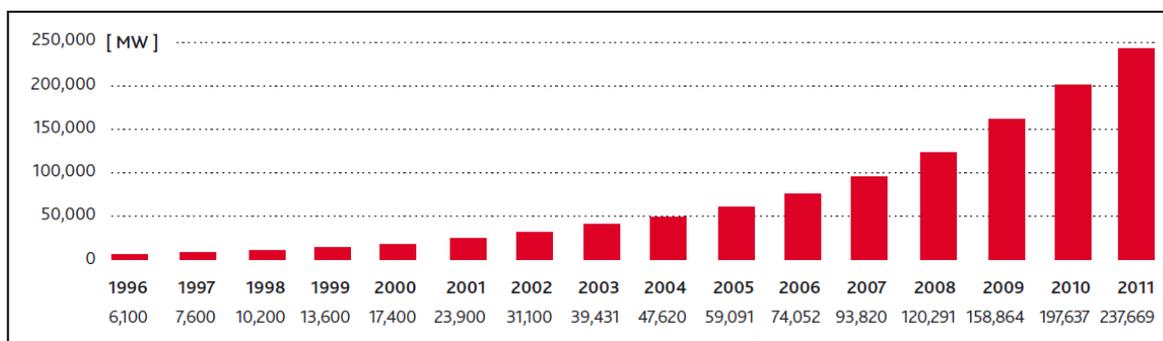


Gráfico 3.1 – Potência eólica instalada no mundo [2]

A China hoje é o maior produtor de energia eólica, com aproximadamente 62 GW de potência eólica instalada, seguida dos Estados Unidos que possui 47 GW de potência instalada. O Brasil ocupa a 21ª posição no ranking dos países produtores de energia eólica, com 1,5 GW de potência eólica instalada [2].

O Brasil, além de ser rico em recursos hídricos, também possui um grande potencial eólico. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) o território brasileiro tem um potencial eólico de 300 GW [3], estando mais da metade do potencial concentrada na Região Nordeste do país. Na atualidade apenas 0,5% do potencial é aproveitado para geração de energia elétrica.

A participação da energia eólica na matriz energética brasileira vem aumentando rapidamente e a previsão é que continue crescendo, assim como vem acontecendo no resto do mundo. Nos últimos sete anos, a capacidade instalada aumentou 54 vezes [2].

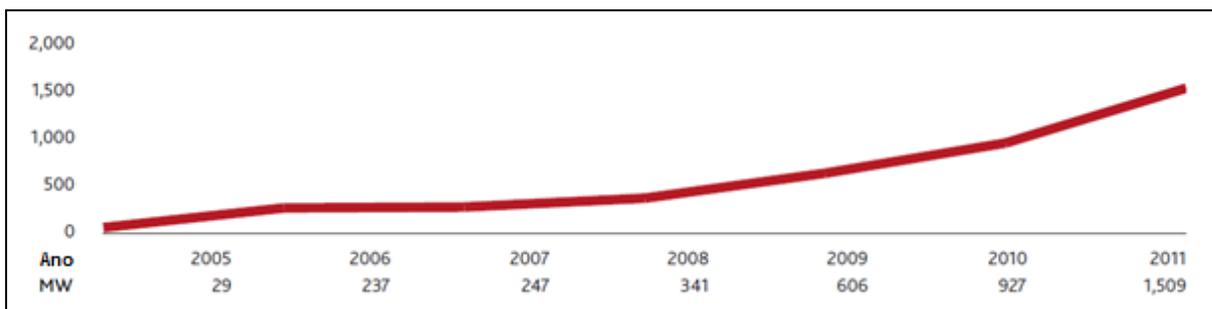


Gráfico 3.2 – Potência eólica instalada no Brasil [2]

Em menos de uma década a energia dos ventos conquistou o espaço brasileiro, atraiu grandes investimentos e tem hoje potencial superior ao hidrelétrico, cujo potencial é de 261 GW [3].

3.1. A energia eólica

A energia eólica consiste na energia cinética contida nos movimentos das massas de ar na atmosfera, os ventos, que são produzidos através do aquecimento diferenciado da atmosfera. Como a radiação do Sol não é uniforme, alguns locais são mais aquecidos do que outros. Essa diferença de temperatura cria zonas de pressões diferentes, que por sua vez, causam o deslocamento das massas de ar [1].

O comportamento do vento pode ser influenciado por vários fatores, dentre eles a vegetação, a rotação da terra e as irregularidades da mesma. A rotação da terra provoca variações sazonais na intensidade e na direção dos ventos. A vegetação, as construções e o relevo podem diminuir ou aumentar a velocidade do vento e criar turbulência ao redor dele [4]. O ideal é que as turbinas eólicas sejam instaladas em regiões nas quais os ventos não sejam perturbados por essas irregularidades. A altura também é um fator muito relevante para o aproveitamento da energia eólica, em grandes alturas são encontradas elevadas velocidades de vento.

Um aspecto relevante no aproveitamento da energia eólica para geração de energia elétrica é que a potência do vento depende da área de captação e é proporcional ao cubo da

velocidade do vento, logo, pequenas variações na velocidade do vento podem ocasionar grandes alterações na potência. Por esse motivo, é de extrema importância realizar um estudo da velocidade do vento no local em que se deseja instalar uma turbina eólica e avaliar a sua variação ao longo do dia e das estações do ano. É necessário obter dados confiáveis e de boa qualidade, pois a má qualidade dos dados pode resultar em um dimensionamento inadequado, em erros na estimativa da potência gerada, e como consequência, prejuízos financeiros [5].

3.2. Princípio de funcionamento

O aproveitamento da energia eólica para geração de eletricidade ocorre através da conversão da energia cinética contida nos ventos em energia elétrica, com o auxílio de geradores eólicos, também conhecidos como aerogeradores.

A energia cinética dos ventos, primeiramente é convertida em energia mecânica, através do movimento das pás da turbina eólica, e em seguida, esta energia mecânica é convertida em energia elétrica através do gerador elétrico. O processo de conversão é realizado da seguinte maneira: o vento faz girar as pás da turbina, que estão acopladas a um eixo central. Este eixo está ligado a uma caixa de transmissão, que tem a função de aumentar a velocidade de rotação do gerador elétrico. À caixa de transmissão está ligado o gerador elétrico, que é responsável por converter a energia mecânica do eixo em energia elétrica. Esta energia elétrica, por sua vez, é enviada por cabos que descem pelo interior da torre e se conectam a uma rede elétrica ou a um banco de baterias no caso de sistemas autônomos.

Para que o aerogerador tenha um bom funcionamento, esse é provido de unidades de controle que são responsáveis pela proteção do aerogerador e são utilizados para melhorar a eficiência do mesmo.

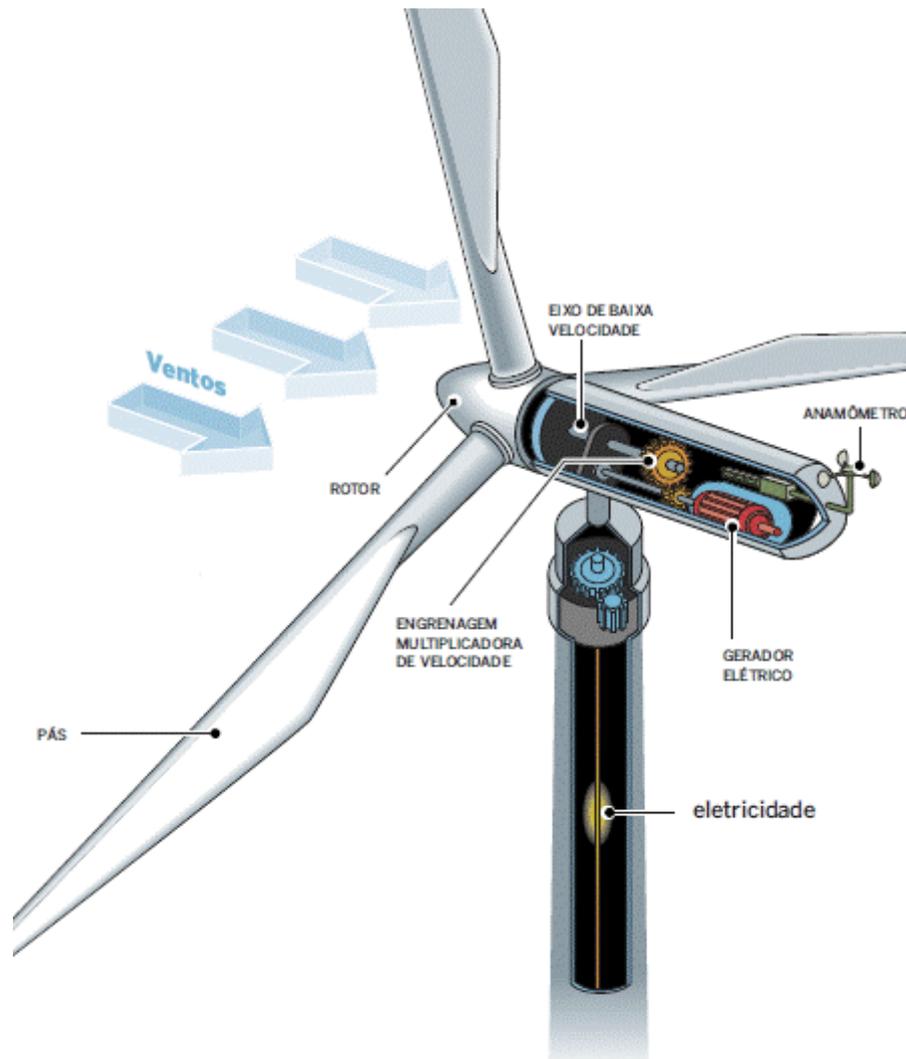


Figura 3.1 – Funcionamento de um aerogerador de eixo horizontal [6]

3.3. Componentes de um gerador eólico

Os principais componentes de um gerador eólico para geração de eletricidade são: pás, eixo do rotor, caixa de engrenagens, gerador elétrico, torre, e sistemas de freio e de controle.

As pás são os componentes do sistema eólico responsáveis pela interação com o vento. Elas têm a função de capturar a energia eólica e a converter em energia rotacional no eixo do rotor. Devem ser leves, resistentes e devem ter um bom rendimento aerodinâmico. Na maioria das aplicações, as pás possuem um formato semelhante ao de uma asa de avião, porém podem ter

outros formatos. O seu comprimento pode variar de poucos centímetros até dezenas de metros, dependendo da potência desejada.

O conjunto de pás é denominado rotor e o seu eixo é responsável por acionar o gerador elétrico, através da transferência de energia mecânica para o gerador. O eixo do rotor pode ser conectado diretamente ao eixo do gerador elétrico ou por meio de uma caixa de engrenagens, também chamada de caixa de transmissão.

A caixa de engrenagens, conforme já foi explicado no item 3.2, tem a função de aumentar a velocidade de rotação do gerador elétrico, já que a baixa rotação das pás é insuficiente para acionar o gerador elétrico. Algumas unidades dispensam a utilização da caixa de engrenagens, e o eixo do rotor é, então, ligado diretamente ao gerador elétrico. Neste caso, é utilizado um gerador elétrico com elevado número de pólos.

O gerador elétrico é o componente responsável pela geração da eletricidade. Em geral, são utilizados geradores de indução ou geradores síncronos para unidades de média e grande potência. Nas unidades de baixa potência normalmente são empregados geradores de ímã permanente.

A torre é o elemento que sustenta a turbina e tem a função de elevar a turbina até a altura em que a velocidade do vento seja adequada para a geração.

O sistema de freio é utilizado para parar a turbina em situações de emergência e tempestades, e o de controle é responsável pelo acionamento do deslocamento angular das pás e do acompanhamento da direção do vento pela nacelle (utilizado em turbinas de eixo horizontal).

3.4. Tipos de turbinas eólicas

As turbinas eólicas podem ser classificadas de acordo com os seguintes aspectos: tamanho e/ou potência nominal extraída e orientação do eixo do rotor em relação ao solo. Com relação ao tamanho e/ou potência nominal extraída podem ser classificadas em pequeno, médio e grande porte. Com relação à orientação do eixo do rotor podem ser classificadas como turbina de eixo horizontal e turbina de eixo vertical.

As turbinas eólicas de pequeno porte são aquelas turbinas capazes de gerar até 80 kW de potência [7]. Normalmente são utilizadas em sistemas isolados para alimentar residências e meios rurais, e em sistemas híbridos em conjunto com painéis fotovoltaicos para alimentar sistemas de iluminação pública.

As turbinas de médio porte são aquelas turbinas capazes de gerar potência entre 81 kW e 500 kW [7] e normalmente são aplicadas em geração distribuída e sistemas híbridos. Já as turbinas de grande porte são aquelas com capacidade de geração a cima de 500 kW [7] e normalmente são utilizadas em usinas eólicas para geração de potência em grande escala.

3.4.1. Turbinas de eixo horizontal

As turbinas de eixo horizontal são as mais comuns e são caracterizadas por possuírem pás que giram em um plano perpendicular à direção do vento. Por captarem o vento em apenas uma direção, necessitam de mecanismos de controle para direcionar a seção reta varrida pelas pás. O seu funcionamento é baseado em princípios aerodinâmicos, sendo predominantemente movidas por forças de sustentação [7]. As forças aerodinâmicas que atuam sobre as pás das turbinas são chamadas de força de sustentação e força de arrasto. A força de sustentação atua perpendicularmente ao escoamento e a força de arrasto atua na direção do escoamento.

Esse tipo de turbina pode possuir uma, duas ou mais pás, dependendo do seu tipo de aplicação. As turbinas de múltiplas pás normalmente são utilizadas para bombeamento de água [7]. Para geração de eletricidade as turbinas mais utilizadas são as de três pás, pois possuem um melhor desempenho em relação aos demais modelos e possuem uma melhor aceitação do ponto de vista do impacto visual e menor emissão de ruído em relação às turbinas de uma e duas pás. Estas turbinas são pouco utilizadas por serem mais instáveis e propensas a turbulências, o que pode trazer riscos a sua estrutura.

As turbinas utilizadas comercialmente para aplicação em grande escala, geralmente são fabricadas em fibra de vidro e contam ainda com sistemas de freios aerodinâmico, mecânico ou eletrônico, que são acionados quando o vento se torna demasiadamente forte e sistemas de controle de potência para melhorar o aproveitamento de potência. Atualmente, essas turbinas são também utilizadas em aplicações *offshore*, ou seja, fora da costa, o que foi possível graças

aos avanços tecnológicos e avanços em pesquisas no campo dos materiais. Hoje é possível encontrar turbinas resistentes a ambientes submetidos a elementos químicos mais agressivos, como é o caso do mar.



Figura 3.2 – Turbina de eixo horizontal [8]

Existem ainda experimentos e protótipos de diferentes modelos de turbinas de eixo horizontal que estão sendo desenvolvidos com a mesma finalidade das turbinas tradicionais em gerar energia elétrica. A Figura 3.3 mostra um projeto de um aerogerador desenvolvido pela empresa canadense Magenn Power. A turbina é constituída de um balão preenchido com gás hélio e está elevada e suspensa por cabos a uma altitude de 300 metros e tem capacidade de gerar até 10 kW para velocidades de vento entre 6 km/h e 100 km/h [9]. Hoje, já existem turbinas com capacidade de geração de 100 kW. Segundo o criador do modelo, esse tipo de turbina terá vantagens em relação às turbinas convencionais como: menor ruído, capacidade de operação em uma vasta faixa de velocidade de vento, funcionamento em elevadas alturas sem a necessidade de torres de sustentação que encarecem o projeto, mobilidade da turbina e capacidade de instalação mais perto da rede de energia.



Figura 3.3 – Turbina de eixo horizontal desenvolvida pela empresa Magenn Power [9]

3.4.2. Turbinas de eixo vertical

As turbinas de eixo vertical são capazes de captar os ventos de todas as direções, não necessitando assim, de sistemas de controle de direção das pás, o que reduz o custo e a complexidade do seu projeto. Podem ser movidas por forças de sustentação ou forças de arrasto, dependendo do modelo da turbina [4]. Conseguem operar em velocidades baixas de vento, e por esse motivo esse tipo de configuração foi adotado neste projeto, já que o local em que a turbina será instalada possui velocidades baixas de vento.

As turbinas de eixo vertical tendem a ser mais seguras, silenciosas, mais fáceis de construir e mais baratas em relação às turbinas de eixo horizontal. Além disso, podem ser instaladas em locais onde o vento é turbulento. Por essa razão, as turbinas de eixo vertical estão em vantagem sobre as turbinas de eixo horizontal no caso de ambientes urbanos e regiões com ventos extremamente fortes ou apenas rajadas de vento. Podem ser colocadas em pequenas alturas, o que permite a colocação dos dispositivos de conversão de energia em alturas mais baixas ou ao nível do solo, facilitando assim, as operações de manutenção. Por outro lado, não são muito eficientes como as turbinas de eixo horizontal e por esse motivo normalmente são utilizadas em pequenos projetos e em instalações de pequenas potências.

Os modelos mais comuns de turbinas de eixo vertical são os modelos Darrieus e Savonius. A turbina Darrieus desenvolvida em 1931 pelo francês Georges J. M. Darrieus [10] é um modelo predominantemente movido por força de sustentação e altamente eficiente em relação aos demais modelos de eixo vertical. É a configuração de eixo vertical cuja eficiência mais se aproxima da eficiência das turbinas de eixo horizontal de três pás. Pode ser constituído de pás curvas ou pás retas (H-Darrieus ou Giromill), podendo apresentar duas ou mais pás, dependendo do tipo e aplicação. Uma limitação desse tipo de turbina é a sua deficiência durante a partida do rotor, sendo algumas vezes necessária a utilização de motores para dar a partida. O modelo de pás retas, também conhecido como Giromill, apresenta um bom comportamento em ventos turbulentos, o que representa uma boa opção para aplicações de geração de eletricidade em áreas onde as turbinas de eixo horizontal são inadequadas. Embora tenha uma eficiência um pouco menor do que o modelo Darrieus de pás curvas, sua construção é mais simples e possui menor custo.



Figura 3.4 – Turbina Darrieus de pás curvas [10]

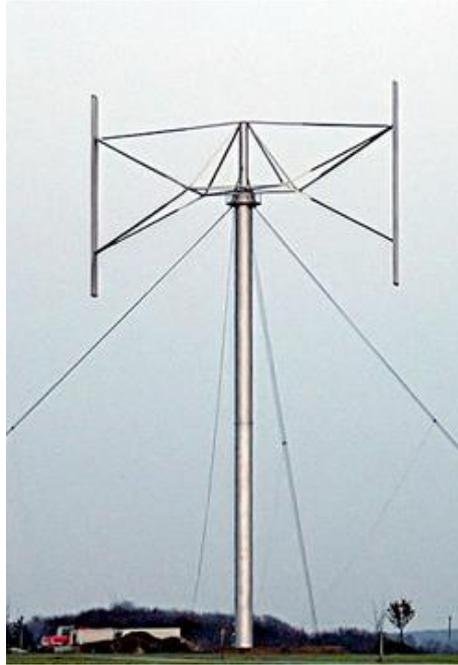


Figura 3.5 – Turbina Darrieus de pás retas [10]

Uma variação do modelo de pás retas é a turbina Cycloturbine, que é essencialmente uma Giromill com ângulo de ataque variável. A variação do ângulo de ataque melhora a eficiência da turbina e auxilia a mesma durante a sua partida. Em velocidades de vento baixas, as pás da turbina são colocadas contra o vento fazendo com que as forças de arrasto atuem e assim, a turbina inicie a sua rotação. À medida que a velocidade de rotação da turbina aumenta, as pás da turbina são colocadas de forma que os ventos passem por elas e gerem forças de sustentação, possibilitando assim, a aceleração da turbina [11].

O modelo Savonius, inventado pelo engenheiro finlandês Sigurd J. Savonius em 1922 [12] é constituído de pás com superfícies curvas, podendo ter forma helicoidal ou reta, dispostas lado a lado e deslocadas de modo que o vento possa passar entre elas. Esse tipo de turbina é predominantemente movido por força de arrasto e por esse motivo, possui baixa eficiência quando comparada com o modelo Darrieus, podendo chegar a 20%. Devido a sua baixa eficiência, a turbina Savonius não é muito adequada para geração de energia elétrica, porém pode ser utilizada em aplicações domésticas, com geração de eletricidade em pequena escala. Como possui baixa rotação e alto torque de partida, é ideal para aplicações como bombeamento de água e moagem de grãos. Esse tipo de turbina é silencioso, fácil de fabricar e pode suportar ventos fortes, sem ser danificado.



Figura 3.6 – Turbina Savonius [12]

As turbinas Savonius e Darrieus também podem ser utilizadas juntas, acopladas ao mesmo eixo. Neste caso, a turbina Savonius é utilizada para dar o arranque à turbina Darrieus e esta é utilizada para gerar mais potência.

Um modelo de eixo vertical que tem sido muito utilizado para fins experimentais e para geração de pequenas potências é o modelo Lenz, desenvolvido por Edwin Lenz. Esse modelo foi baseado nos princípios e projetos de outras turbinas de eixo vertical, como a Darrieus de pás retas (Girromill) e a Savonius. O formato das pás e a forma como elas são posicionadas são semelhantes às pás da turbina Girromill, a diferença está em uma das faces da pá, que não é totalmente fechada, o que a torna também semelhante ao modelo Savonius. A vantagem da pá não ser totalmente fechada está durante a partida da turbina, pois possibilita que a mesma inicie o seu movimento em velocidades mais baixas de vento. O princípio de funcionamento das pás é baseado nas duas forças aerodinâmicas, de arrasto e sustentação. O objetivo da combinação sustentação/arrasto é possibilitar a auto-partida da turbina e possibilitar que a turbina alcance proporções maiores de velocidade específica.

De acordo com Edwin Lenz a turbina possui uma eficiência boa, podendo chegar a 41%, o que a torna adequada para aplicações em geração de energia elétrica [13]. Porém, não apresenta um bom funcionamento quando submetida a velocidades de vento elevadas. Na

Figura 3.7 está ilustrada a turbina Lenz2 construída por Edwin Lenz, com capacidade de geração de 52W a uma velocidade de vento de 5,6 m/s [14]. A turbina foi projetada para operar em velocidades baixas de vento. De acordo com Lenz, acima de 9 m/s a turbina não apresenta bom funcionamento e sua eficiência cai consideravelmente.



Figura 3.7 – Turbina Lenz2 [14]

Com a evolução da tecnologia de aerogeradores, hoje é possível encontrar uma variedade muito grande de modelos de turbinas eólicas. Além dos modelos apresentados nesta seção, existem muitos outros utilizados tanto para bombeamento de água como para geração de energia elétrica.

3.4.3. Turbinas de pequeno porte

Os modelos mais comuns de turbinas eólicas de pequeno porte encontrados no mercado são os de eixo horizontal. O mercado de turbinas de eixo vertical ainda é pequeno quando comparado com o de eixo horizontal, porém está crescendo rapidamente com o aumento da demanda e os incentivos governamentais para a utilização das fontes alternativas de energia.

Embora as turbinas de eixo horizontal sejam as mais comuns, as de eixo vertical são as mais aplicáveis para uso em alturas baixas, telhados e áreas urbanizadas. A sua capacidade de operar bem em alturas baixas é uma vantagem para essas turbinas, pois se consegue reduzir os custos referentes à torre de sustentação.

Dentre os fabricantes de turbinas de eixo horizontal de pequeno porte, pode-se citar a Southwest Windpower, Superwind, Fortis Windenergy, Ampair Microwind, Aircon, Bergey Windpower Co e Aerofortis. Na Figura 3.8 estão ilustradas algumas turbinas de eixo horizontal de pequeno porte. As turbinas Skystream 3.7 e Whisper 500 do fabricante Southwest Windpower são capazes de gerar até 2,4kW a 13 m/s e 3kW a 10,5 m/s, respectivamente [15], e a turbina Superwind 350 da empresa Superwind é capaz de gerar até 350W a uma velocidade de vento de 12,5 m/s [16].



Figura 3.8 – Turbinas Skystream 3.7, Superwind 350 e Whisper 500 [15] e [16]

Dentre os fabricantes de turbinas de eixo vertical, pode-se citar a WePower, Aeolos Wind Energy, Urban Green Energy, Mariah Power, Helix Wind, Windside, Ropatec, Four Seasons Windpower, Hi-VAWT Technology, Ningbo Solar Co., Green Technology Co., Bayat Energy e Bjerga Engineering. Na Figura 3.9 são apresentados três exemplos de turbinas de eixo vertical de pequeno porte.



Figura 3.9 – Turbinas VAWT 300W, WS-0,15 B e Falcon 600W [17], [18] e [19]

As turbinas VAWT-300W do fabricante Ningbo Solar Co e Falcon 600W do fabricante WePower, mostradas na Figura 3.9, são turbinas Darrieus de pás retas com capacidade de geração de 300W a 8 m/s [17] e 600W a 13 m/s [20], respectivamente. O modelo Savonius WS-0,15 B do fabricante Windside possui capacidade de geração de 120W a 20 m/s [18].

Além das turbinas industriais também é possível encontrar turbinas fabricadas artesanalmente, como a turbina Lenz e a Savonius, mencionadas na seção 3.4.2. É também comum encontrar turbinas de eixo horizontal e Giromill artesanais, com pás fabricadas com cano de PVC e folha de alumínio, respectivamente. Porém, estas turbinas não produzem bons resultados, uma vez que requerem uma geometria específica das pás e materiais mais sofisticados para obter um bom funcionamento. A turbina Lenz é uma novidade para as turbinas de eixo vertical e ainda está em fase de desenvolvimento. As turbinas encontradas em operação são, todavia, turbinas artesanais, construídas com finalidades experimentais e em aplicações domésticas para pequenas potências.

3.5. Potência do vento

Considere uma massa de ar m , com velocidade v , que flui através da área A de varredura de uma turbina eólica. A energia cinética presente nessa massa de ar é dada por:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (3.1)$$

A potência dessa massa de ar, para uma velocidade constante, é dada pela derivada da energia em relação ao tempo:

$$P = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2}\dot{m}v^2 \quad (3.2)$$

em que, \dot{m} é o fluxo da massa de ar (kg/s) e é dado por:

$$\dot{m} = \rho vA \quad (3.3)$$

Substituindo a equação 3.3 na equação 3.2, obtém-se a expressão que descreve a potência disponível no vento:

$$P_{\text{vento}} = \frac{1}{2}\rho Av^3 \quad (3.4)$$

Da equação 3.4, observa-se que a velocidade do vento influencia de forma significativa na potência disponível em razão da sua relação cúbica. Nota-se também que a potência varia linearmente com a densidade do ar e com a área varrida pelas pás. Quanto maior as dimensões

das pás, maior é a área varrida por elas, e por consequência maior é a potência disponível no vento. A densidade do ar é função da pressão atmosférica e da temperatura do ambiente, que são grandezas que variam com a altitude. No entanto diferentes altitudes levam a diferentes valores da potência disponível no vento.

A área varrida pelas pás é o parâmetro que determina a quantidade de energia do vento que a turbina é capaz de captar e é determinada conforme a disposição das pás sobre o eixo da turbina. No caso de turbinas de eixo horizontal a área varrida é determinada pela área de uma circunferência ($\pi \times R^2$), onde o seu raio é representado pelo comprimento das pás. Nas turbinas Darrieus de pás retas, a área varrida é determinada pela altura das pás e o diâmetro da turbina ($L \times D$).

3.6. Potência aproveitável

Nem toda a potência disponível no vento é aproveitada pela turbina eólica, apenas uma fração dessa potência é extraída pelas pás da turbina. Essa fração é denominada Coeficiente de Potência (C_p). De acordo com o físico alemão Albert Betz, a máxima potência que pode ser aproveitada pela turbina eólica equivale a 59% da potência do vento disponível para a turbina. Esse valor é teórico. Na prática, para turbinas eólicas modernas aproveita-se em torno de 40%. O Gráfico 3.3 mostra o comportamento típico do coeficiente de potência de algumas turbinas eólicas.

Como pode ser visto no Gráfico 3.3, o coeficiente de potência é função da razão entre a velocidade da ponta da pá e a velocidade do vento, também conhecida como velocidade específica.

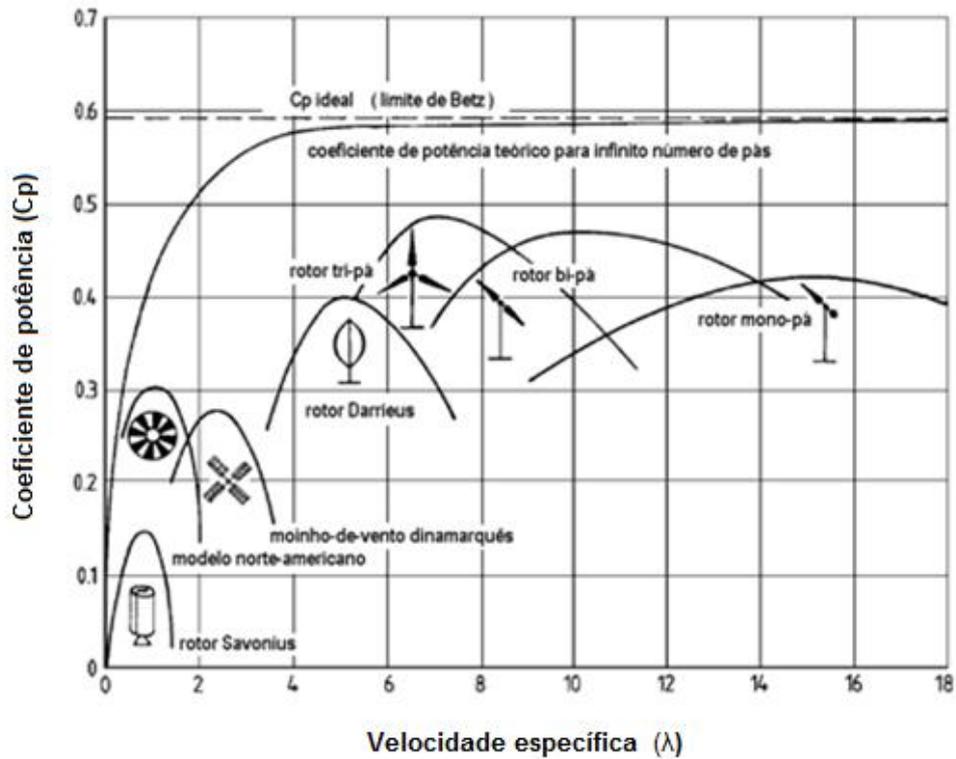


Gráfico 3.3 – Relação entre o coeficiente de potência e a razão de velocidades [21]

Visto que apenas uma parcela da potência disponível no vento é extraída pelas pás da turbina, a potência mecânica extraída do vento pelas pás da turbina é, então, definida pela expressão:

$$P_{mec} = \frac{1}{2} \rho A v^3 c_p \quad (3.5)$$

A potência eólica convertida em eletricidade além de depender das condições do vento e do tamanho da turbina eólica, depende também do rendimento do aerogerador, que compõe o rendimento aerodinâmico das pás, o rendimento do gerador elétrico e o rendimento do multiplicador de velocidades, caso esteja presente no aerogerador. A potência elétrica gerada pela turbina eólica é então definida pela expressão:

$$P_e = \frac{1}{2} \rho A v^3 c_p \eta_g \eta_m \quad (3.6)$$

3.7. Velocidade específica

Um parâmetro importante a ser considerado em estudos de turbinas eólicas é a relação entre a velocidade da ponta da pá e a velocidade do vento designada como velocidade específica λ .

$$\lambda = \frac{v_u}{v} \quad (3.7)$$

A velocidade da ponta da pá é definida pelo produto da velocidade angular da turbina e o raio da turbina:

$$v_u = \omega R \quad (3.8)$$

Da equação 3.8, nota-se que instalações eólicas de grande porte apresentam baixa velocidade angular enquanto que instalações eólicas de pequeno porte possuem alta velocidade angular. Desta forma, turbinas com potência na ordem de kW alcançam velocidades de cerca de 180 rpm e turbinas com potência na ordem de MW operam com cerca de 20 rpm [5].

A velocidade específica é função de um parâmetro denominado solidez. Denomina-se solidez a relação entre a área total das pás e a área varrida por elas.

$$\Omega = \frac{S \cdot N}{A} \quad (3.9)$$

A solidez possui uma relação inversa com a velocidade específica, como pode ser visto no Gráfico 3.4. Turbinas com alto valor de λ possuem baixa solidez e baixo torque na partida. Turbinas com baixo valor de λ possuem alta solidez e elevado torque na partida [5]. Um exemplo de turbinas de alta solidez são as turbinas de múltiplas pás, que apresentam velocidades específicas na faixa de 1 a 2,5. Normalmente as turbinas de alta solidez são empregadas para bombeamento de água e as turbinas de baixa solidez são utilizadas para geração de eletricidade. As turbinas de alta solidez também são utilizadas para geração de energia elétrica em pequena escala (pequenas potências).

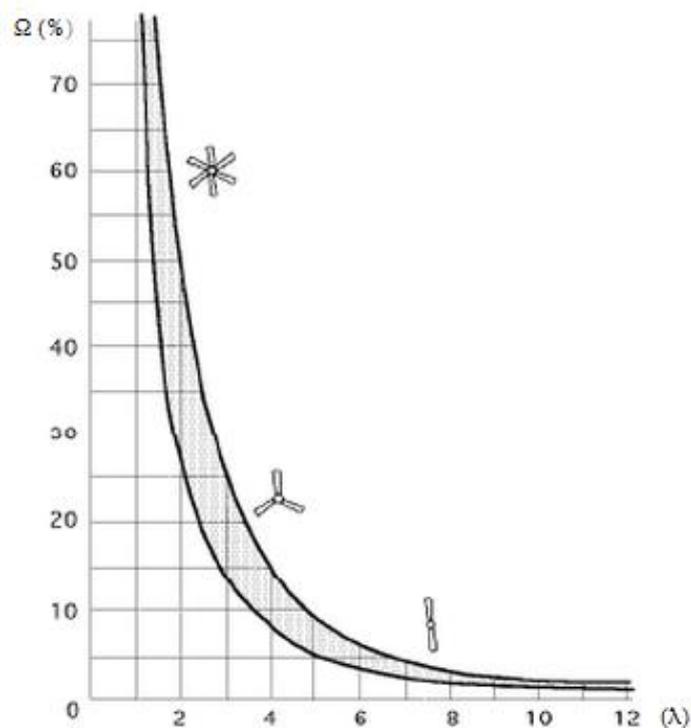


Gráfico 3.4 – Relação entre a solidez e a velocidade específica [Adaptado de Pedro Fernandes Díez, *Energia Eólica*][22]

3.8. Curva de potência

A curva de potência de uma turbina eólica representa a característica de operação da turbina e o seu conhecimento é fundamental para projetos de aproveitamento eólico. A curva

relaciona a potência elétrica gerada pela turbina em função da velocidade do vento. O Gráfico 3.5 mostra uma curva de potência típica de uma turbina eólica, cuja capacidade de geração é 660 kW.

A curva é caracterizada por três valores de velocidade do vento: velocidade de entrada do vento, velocidade nominal do vento e velocidade de corte do vento. A velocidade de entrada do vento é a velocidade a partir da qual a turbina inicia a geração de energia elétrica. A velocidade nominal do vento é a velocidade para a qual as turbinas são projetadas para gerarem a máxima potência e a velocidade de corte do vento é a velocidade a partir da qual a turbina é retirada de operação por motivo de segurança.

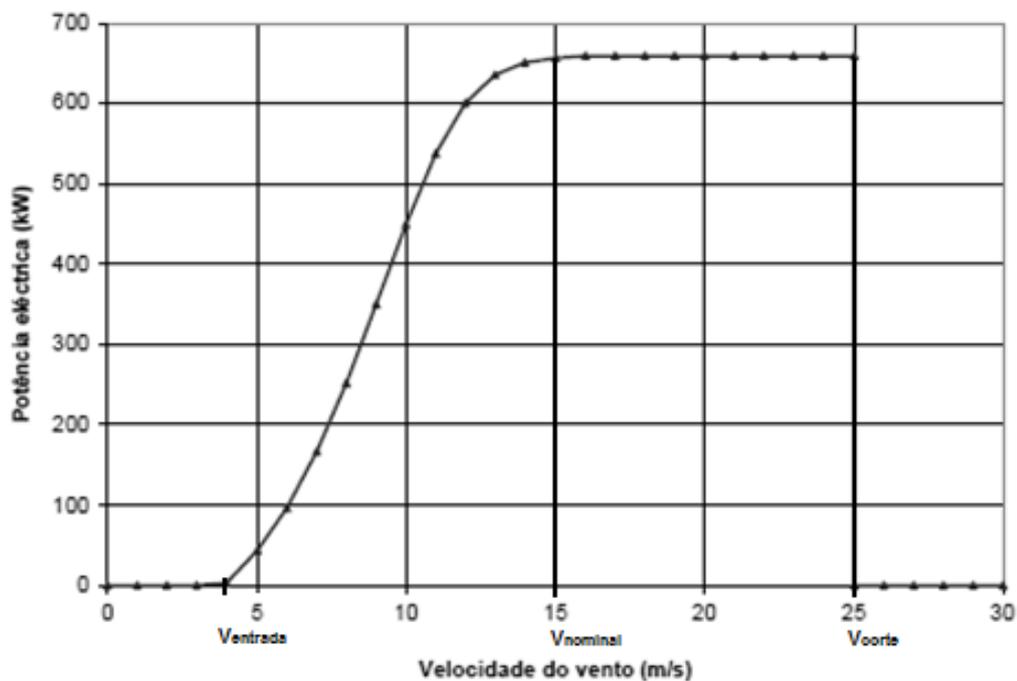


Gráfico 3.5 – Curva de potência de uma turbina eólica de 660 kW [23]

3.9. Aplicação dos sistemas eólicos

Os sistemas eólicos podem ser utilizados em três aplicações distintas: sistemas independentes ou isolados, sistemas híbridos e sistemas interligados à rede elétrica.

3.9.1. Sistemas independentes

Nos sistemas eólicos independentes ou isolados, o gerador eólico não está ligado à rede elétrica e é o único responsável pelo fornecimento de energia elétrica. Devido à característica intermitente do vento necessitam de um sistema de armazenamento de energia. Normalmente, este tipo de sistema utiliza geradores de pequeno porte, com capacidade de geração até 80 kW [7].

O sistema de armazenamento de energia é formado por baterias, as quais são responsáveis por armazenar a energia nos momentos em que a potência disponível é maior que a potência necessária para o consumo, e assim, tornar possível a utilização da mesma quando a situação for invertida. Em sistemas eólicos, aconselha-se a utilização de baterias de ciclo profundo, pois como a produção de energia eólica é irregular, necessita-se de uma bateria que suporte uma descarga maior sem afetar a sua durabilidade.

Para possibilitar o acoplamento entre as baterias e o gerador eólico é necessária a utilização de um circuito retificador.

Além do sistema de armazenamento, os sistemas eólicos independentes também necessitam de inversores e controladores de carga. Os inversores têm a função de converter a corrente contínua proveniente das baterias em corrente alternada, para que a energia elétrica possa ser utilizada pelas cargas que operam em corrente alternada, e os controladores de carga têm a função de proteger as baterias contra sobrecarga ou descarga excessiva.

3.9.2. Sistemas híbridos

Nos sistemas híbridos, o gerador eólico opera em conjunto com outra fonte de energia para atender ao usuário, podendo ser geradores a diesel, módulos fotovoltaicos e outras fontes de energia. A utilização de várias formas de geração de energia elétrica aumenta a complexidade do sistema e exige a otimização do uso de cada fonte. No entanto, é necessário realizar um controle de todas as fontes para que haja máxima eficiência na entrega da energia para os consumidores. Nesse tipo de sistema, assim como no sistema isolado, é necessária a

utilização de um banco de baterias para o armazenamento da energia. Para isso é necessário a utilização de um controlador de carga e de circuitos inversores e retificadores.

3.9.3. Sistemas interligados à rede elétrica

Nos sistemas eólicos interligados à rede elétrica, toda a geração é entregue à rede elétrica, não necessitando assim de sistemas de armazenamento de energia. Os geradores eólicos utilizados nesse tipo de sistema são de grande porte, com capacidade de geração na ordem de MW e são utilizados em conjunto para possibilitar a geração de energia em grande escala.

Esse tipo de sistema requer uma atenção especial e deve ser controlado de forma rígida para não causar perturbações ao sistema elétrico.

4. Desenvolvimento Técnico

4.1. Ventos no local

No dimensionamento de sistemas eólicos é de grande importância a realização de um estudo das velocidades do vento no local em que será instalada a turbina. A avaliação do potencial eólico deve ser realizada com base em observações diárias da velocidade do vento durante um bom período de tempo. Para a obtenção dos dados da velocidade do vento são utilizados anemômetros, que são instrumentos responsáveis pela medição da velocidade do vento nos instantes desejados. Normalmente nas estações anemométricas as medições são realizadas continuamente em períodos discretos podendo ser de minutos ou horas.

No presente trabalho, os dados de velocidade do vento foram coletados de uma estação anemométrica próxima ao local da instalação, a uma altura de 10 m em relação ao solo, durante os meses de maio a setembro do ano de 2012. As velocidades foram avaliadas diariamente durante um curto período de tempo, porém o ideal é que o estudo seja realizado durante no mínimo um ano para que seja possível obter dados confiáveis, já que o comportamento do vento sofre alterações ao longo do ano.

Após a coleta dos dados é importante efetuar um tratamento estatístico dos mesmos, para auxiliar na análise dos dados e estimar o comportamento dos ventos no local. Normalmente é construído um histograma contendo as frequências de ocorrência das velocidades do vento. O Gráfico 4.1 apresenta o histograma de frequências das velocidades do vento do local da instalação.

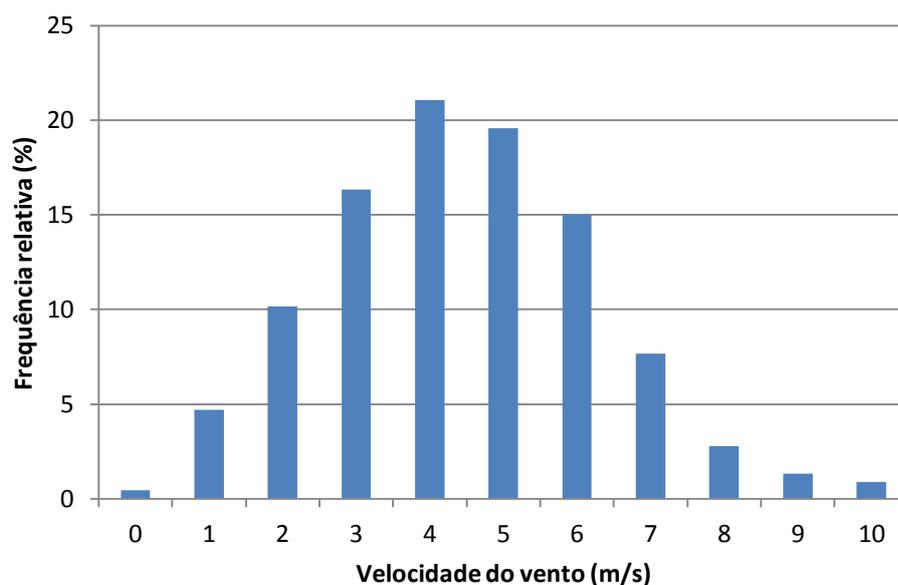


Gráfico 4.1 – Histograma de frequência da velocidade do vento

Pelo histograma de frequência de velocidade de vento, pode-se notar que a região é caracterizada por baixas velocidades de vento. Para um pouco mais de 70% do período avaliado as velocidades do vento estão compreendidas entre 3 e 6 m/s.

De posse da distribuição estatística da velocidade do vento no local, o próximo passo consiste em estimar a velocidade média do vento que pode ser calculada pela metodologia da média ponderada, conforme mostrado na equação 4.1. A média da velocidade do vento durante o período avaliado foi de 4,4 m/s.

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i \cdot n_i \quad (4.1)$$

4.2. A comunidade de pescadores

Os geradores eólicos serão utilizados para atender à atividade pesqueira artesanal da comunidade de pescadores do Zacarias, situada às margens da Lagoa de Maricá, dentro de

uma área de proteção ambiental (APA). A pesca artesanal vem sendo praticada pelos moradores da comunidade há várias gerações e é uma atividade de grande importância para a comunidade, sendo responsável pela geração de emprego e renda para muitas pessoas que ali residem.

Zacarias é a segunda comunidade pesqueira mais produtiva do município. De acordo com o relatório de monitoramento da produção de pescado de Maricá desenvolvido pela empresa OGX, no ano de 2010 a comunidade obteve uma produção anual de 26,09 toneladas [24].

A produção varia muito ao longo do ano em virtude de algumas dificuldades enfrentadas pelas embarcações artesanais perante as condições climáticas. Para conhecer a necessidade de armazenamento da produção, foi feita uma estimativa da produção mensal a partir do cálculo da média mensal da produção com base no relatório da produção anual de pescado. De acordo com os resultados obtidos, a produção média mensal da comunidade do Zacarias é de 2,17 toneladas.

4.3. Consumo de energia

Os geradores eólicos serão utilizados para alimentar as seguintes cargas: um freezer de 305 litros com 124W de potência; uma máquina de gelo de 50kg de produção por dia com reservatório de 6kg de gelo e potência de 1/4HP; e três lâmpadas fluorescentes cada uma com potência de 15W. A escolha do freezer foi baseada na capacidade de armazenamento da produção. Visto que a produção é pequena, apenas um freezer de 305 litros é suficiente para armazenar a produção.

Uma característica desse tipo de carga, que deve ser levada em consideração neste trabalho, é o elevado consumo de energia. Um freezer, por exemplo, fica ligado durante muitas horas no dia. Estima-se que o tempo durante o qual o compressor fica ligado para manter o interior do freezer na temperatura desejada é de cerca de 8 a 10h por dia [25] e [26]. Deve-se inclusive tomar um cuidado especial com o consumo de energia durante o seu tempo de funcionamento, pois a energia proveniente dos ventos nem sempre está disponível. Neste caso seria indispensável a utilização de baterias para o armazenamento da energia necessária para alimentar esse tipo de carga.

Para estimar a energia demandada pelas cargas foi construído um quadro contendo as cargas que serão alimentadas pelo sistema com as suas respectivas características elétricas, como mostrado na Tabela 4.1. Os horários de funcionamento de cada equipamento foram estabelecidos de acordo com a rotina do pescador na cooperativa de pesca.

Os dois pontos de luz interna são utilizados durante três horas do dia, de 5h às 6h e de 10h às 12h; o ponto de luz vigia é utilizado à noite durante onze horas do dia, de 18h às 5h do dia seguinte; a máquina de gelo opera nos momentos de produção do gelo até completar o reservatório, ou seja, ela opera durante três horas para produzir 6kg de gelo. Após a retirada do gelo do reservatório, a máquina reinicia o seu ciclo de operação. Como serão realizadas três retiradas de gelo por dia (às 5h, 14h e 18h), o tempo total de operação da máquina por dia será de nove horas, ou seja, a máquina irá operar nos horários de 6h às 9h, de 15h às 18h e de 19h às 21h. Para a determinação do tempo de operação do freezer, foi levado em consideração que o mesmo, quando permanece fechado por muito tempo, opera durante quinze minutos de uma em uma hora para manter a temperatura do seu interior. Como a porta do freezer não será aberta com frequência, apenas será aberta para armazenar o gelo produzido pela máquina de gelo nos horários de 5h, 14h e 18h e para armazenar a sobra da produção diária de pescado que poderá ocorrer de 10h às 12h durante quinze a vinte minutos, foi considerado que após o fechamento das portas, na primeira situação o freezer irá operar durante meia hora e na segunda situação irá operar durante duas horas para recuperar a temperatura perdida. De 18h às 5h o freezer permanecerá fechado e o seu compressor irá operar durante quinze minutos de uma em uma hora. Então, o tempo total de operação do freezer por dia será de seis horas e meia.

Carga	Tensão (V)	Potência (W)	Tempo de uso (h)	Consumo diário (kWh)
2 lâmpadas fluorescentes para luz interna (15W cada)	127	30 (2×15)	3	0,09
1 lâmpada fluorescente para luz vigia	127	15	11	0,165
1 freezer 305L	127	124	6,5	0,806
1 máquina de gelo 50kg	127	186	9	1,674

Tabela 4.1 – Quadro de cargas [25], [27] e [28]

De acordo com o quadro de cargas o consumo diário total de energia é de 2,735kWh.

O consumo de energia ao longo do dia está mostrado com mais detalhes na Tabela 4.2 e representado graficamente no Gráfico 4.2.

Hora do dia	Tipo de carga	Potência da carga	Tempo de uso
0:00 – 0:15	Luz externa	15 W	15 minutos
0:15 – 0:30	Luz externa e freezer	139 W	15 minutos
0:30 – 1:30	Luz externa	15 W	1 hora
1:30 – 1:45	Luz externa e freezer	139 W	15 minutos
1:45 – 2:45	Luz externa	15 W	1 hora
2:45 – 3:00	Luz externa e freezer	139 W	15 minutos
3:00 – 4:00	Luz externa	15 W	1 hora
4:00 – 4:15	Luz externa e freezer	139 W	15 minutos
4:15 – 5:00	Luz externa	15 W	45 minutos
5:00 – 6:00	Luz interna	30 W	1 hora
6:00 – 6:30	Freezer e máquina de gelo	310 W	30 minutos
6:30 – 7:30	Máquina de gelo	186 W	1 hora
7:30 – 7:45	Freezer e máquina de gelo	310 W	15 minutos
7:45 – 8:45	Máquina de gelo	186 W	1 hora
8:45 – 9:00	Freezer e máquina de gelo	310 W	15 minutos
9:00 – 10:00	-	-	-
10:00 – 10:15	Luz interna e freezer	154 W	15 minutos
10:15 – 12:00	Luz interna	30 W	1 hora e 45 minutos
12:00 – 14:00	Freezer	124 W	2 horas
14:00 – 15:00	-	-	-
15:00 -15:30	Freezer e máquina de gelo	310 W	30 minutos
15:30 – 16:30	Máquina de gelo	186 W	1 hora
16:30 – 16:45	Freezer e máquina de gelo	310 W	15 minutos
16:45 – 17:45	Máquina de gelo	186 W	1 hora
17:45 – 18:00	Freezer e máquina de gelo	310 W	15 minutos
18:00 – 19:00	Luz externa	15 W	1 hora
19:00 – 19:30	Luz externa, freezer e máquina de gelo	325 W	30 minutos
19:30 – 20:30	Luz externa e máquina de gelo	201 W	1 hora
20:30 – 20:45	Luz externa, freezer e máquina de gelo	325 W	15 minutos
20:45 – 21:45	Luz externa e máquina de gelo	201 W	1 hora
21:45 – 22:00	Luz externa, freezer e máquina de gelo	325 W	15 minutos
22:00 – 23:00	Luz externa	15 W	1 hora
23:00 – 23:15	Luz externa e freezer	139 W	15 minutos
23:15 – 0:00	Luz externa	15 W	45 minutos

Tabela 4.2 – Consumo de energia ao longo do dia

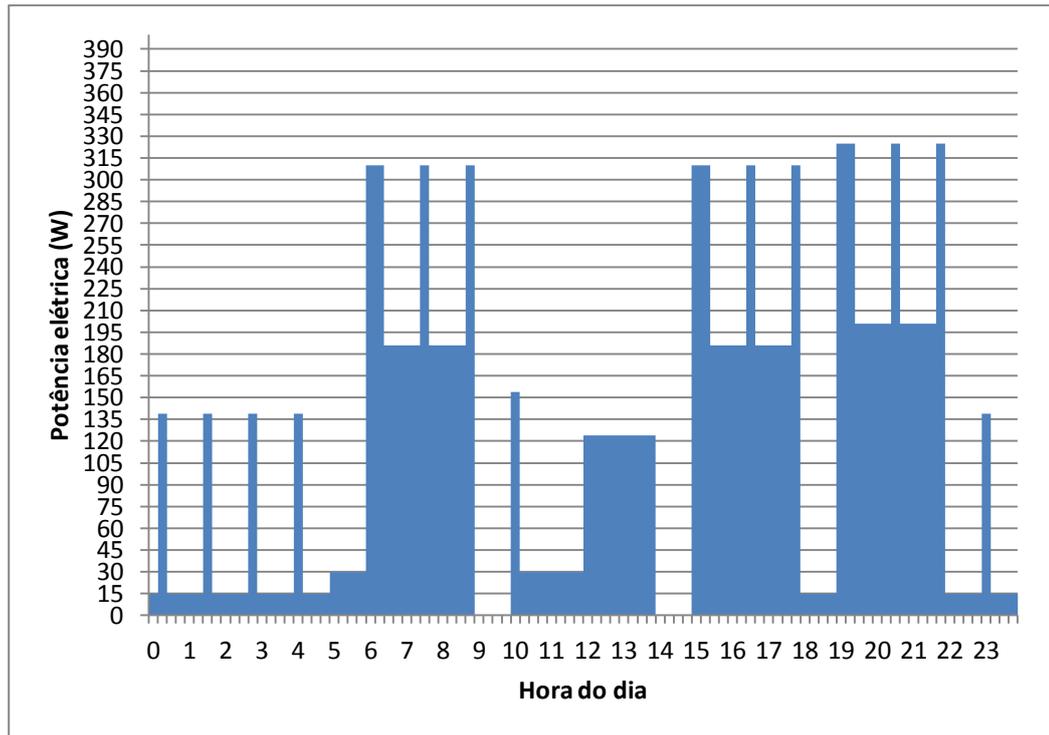


Gráfico 4.2 – Representação da carga elétrica em relação ao seu tempo de uso ao longo do dia

Com base no consumo estimado, pode-se determinar a potência contínua que o sistema eólico deverá ser capaz de fornecer para atender a demanda de energia por dia. Essa potência contínua é a potência média que o sistema eólico deveria fornecer continuamente durante uma determinada quantidade de horas em que há vento satisfatório no dia para atender a demanda de energia. De acordo com os estudos realizados da velocidade do vento no local, observou-se que no período em estudo, houve um número considerável de ocorrências (13,8% do período avaliado) em que, durante nove horas do dia, não houve vento satisfatório para atender a demanda de energia. É o segundo pior caso de ocorrência sem vento satisfatório. O primeiro pior caso sem vento é o de seis horas sem vento satisfatório no dia, que corresponde a uma porcentagem de 18,39% dos dias coletados. Como seis horas sem vento satisfatório é pouco tempo, não será considerado para o cálculo da potência contínua, pois a mesma seria diminuída ao ponto de o sistema não ser capaz de atender a carga quando ocorrerem vários dias em que não há vento satisfatório durante nove horas, que corresponde ao segundo pior caso de ocorrência sem vento no dia.

Então, no cálculo da potência contínua, deverá ser considerado que o vento é satisfatório durante quinze horas do dia. A potência contínua que o sistema eólico deverá ser capaz de fornecer para atender a demanda de energia por dia pode ser calculada por:

$$P_{\text{média}} = \frac{\text{Consumo diário total}}{\text{Nº de horas de vento satisfatório}} = \frac{2,735\text{kWh}}{15\text{h}} \cong 182 \text{ W} \quad (4.2)$$

O sistema eólico deverá, então, ser capaz de fornecer continuamente uma potência média de 182W para atender a demanda diária de energia. Nos horários do dia em que não há geração suficiente para atender a carga, a mesma será atendida por um banco de baterias, que deverá ser dimensionado de tal forma que seja capaz de atender a carga nos momentos em que não há geração suficiente, como será mostrado no item 4.7.

4.4. Dimensionamento da turbina

O dimensionamento de uma turbina eólica consiste na determinação de uma série de variáveis como diâmetro do rotor, comprimento e largura das pás, geometria e posicionamento das pás, tipo de configuração da turbina e tipo de gerador elétrico que será utilizado para converter a energia mecânica da turbina em energia elétrica.

4.4.1. Escolha do tipo de turbina

A turbina eólica escolhida para ser utilizada como módulo de geração de energia na vila de pescadores é uma turbina de eixo vertical. A escolha foi baseada na simplicidade da turbina, na característica do vento no local e nos custos de construção e instalação. Conforme já foi mencionado no capítulo anterior, esse tipo de turbina opera em velocidades baixas de vento e por não necessitar de sistemas de controle de direção das pás, o custo e a complexidade da turbina são reduzidos.

Dentre os modelos de turbinas de eixo vertical existentes, foi escolhido o modelo Darrieus de pás retas (Giromill). Conforme já foi explicado no item 3.4.2, a turbina Giromill além de apresentar uma construção simples e custo baixo, possui também uma eficiência elevada, o que viabiliza a sua utilização para geração de energia elétrica para atender a atividade pesqueira da comunidade de pescadores. Uma das vantagens desse tipo de turbina é a possibilidade de ser instalada em pequenas alturas e a habilidade de operação em ventos turbulentos e rajadas de vento.

O critério utilizado para a escolha do número de pás está relacionado com a solidez e a estabilidade das mesmas. As turbinas com muitas pás possuem alta solidez e interagem com o vento a uma baixa razão de velocidades (razão entre a velocidade da ponta da pá e a velocidade do vento), enquanto que as turbinas com poucas pás possuem baixa solidez e interagem com o vento a uma elevada razão de velocidades. Para geração de eletricidade o ideal é a utilização de turbinas com baixa solidez. Dentre as turbinas normalmente utilizadas para esse fim estão as turbinas de duas pás, três pás e de cinco pás. Dentre essas turbinas, a escolha dependerá de um equilíbrio entre as características de funcionamento pretendidas e os custos referentes à produção e instalação. Em se tratando de custos, é muito mais vantajosa a utilização de turbinas com duas pás. No entanto se for levada em consideração a característica dinâmica da turbina, uma turbina de três pás tem um funcionamento mais estável e é mais silenciosa do que uma turbina de duas pás, assim como, uma turbina de cinco pás é mais estável do que uma de três pás. Outro critério importante a ser analisado é que o aumento do número de pás aumenta o torque de partida da turbina, o que acaba por auxiliar na auto-partida da mesma.

Devido à maior estabilidade e ao maior torque de partida da mesma em relação à turbina de três pás, a turbina de cinco pás será adotada neste projeto.

4.4.2. Escolha do gerador elétrico

O gerador é o componente responsável pela conversão da energia mecânica da turbina em energia elétrica. Em sistemas eólicos de pequeno porte normalmente são utilizados geradores de ímã permanente. Para este projeto foram listados dois possíveis geradores: o alternador automotivo e o gerador de ímã permanente. A vantagem da utilização do alternador

automotivo é o seu custo baixo e a facilidade de ser encontrado comercialmente. Outra característica do alternador automotivo é que já dispõe de um circuito retificador e um regulador de tensão. Porém, os alternadores automotivos operam em velocidades de rotação muito elevadas e iniciam a sua geração a uma velocidade de rotação próxima a 1000 RPM. No entanto, devido à característica de rotação baixa das turbinas eólicas, a utilização de alternadores automotivos se torna inviável para o projeto, uma vez que seria necessária a utilização de um sistema de multiplicação de velocidades com relação de transmissão muito grande.

Já os geradores de ímã permanente, diferentemente dos alternadores automotivos, são capazes de iniciar sua geração em baixas rotações. Uma vantagem da utilização desses geradores é a possibilidade do acoplamento direto entre a turbina e o gerador, dispensando desta forma, o uso de um sistema de multiplicação de velocidades. É importante ressaltar que o acoplamento direto entre a turbina e o gerador elimina as perdas decorrentes do sistema de multiplicação de velocidades. Por outro lado, o custo dos geradores de ímã permanente é elevado, devido ao elevado custo dos ímãs necessários para a sua construção e, no entanto, a análise desse fator vai depender da aplicação do gerador e da faixa de potência de operação. O custo pode variar de US\$175,00 a US\$6.900,00 para pequenas potências até 15kW [29] e [30]. Como este projeto requer baixas potências, o custo do gerador será vantajoso.

Os geradores de ímã permanente são uma particularidade das máquinas síncronas, onde os enrolamentos de campo (rotor) são substituídos por ímãs permanentes de alto produto energético, em geral os ímãs de neodímio (NeFeB), aumentando o rendimento do gerador. Uma vantagem da utilização dos geradores de ímã permanente é o fato de não haver a necessidade de um circuito de excitação, uma vez que não há enrolamentos de campo para serem alimentados. Neste caso, o fluxo magnético é produzido pelos ímãs. Outra vantagem é a possibilidade de serem encontrados em pequenas dimensões, uma vez que os ímãs ocupam uma área pequena, não necessitando assim, de um rotor com grandes dimensões.

4.4.3. Cálculo das dimensões da turbina

Apesar das turbinas Giromill serem o tipo mais simples, a sua análise aerodinâmica bem como o seu dimensionamento são bastante complexos e por sua vez requerem estudos mais

específicos. Por essa razão, neste trabalho serão tomadas como referência algumas turbinas já existentes comercialmente.

O dimensionamento da turbina é realizado a partir do conhecimento da velocidade média do vento e da potência contínua necessária para suprir a carga, calculada no item 4.3. A potência convertida pela turbina deve ser suficiente para compensar todas as perdas do sistema e suprir a potência média demandada pela carga. Sendo assim, todas as perdas do sistema deverão ser consideradas no dimensionamento.

Para a determinação das dimensões da turbina, primeiramente será calculada a potência do vento necessária para a conversão, que é dada por:

$$P_{\text{vento}} = \frac{P_{\text{média}}}{C_p \cdot \eta_g \cdot \eta_m \cdot \eta_l \cdot \eta_c} \quad (4.3)$$

O coeficiente de potência das turbinas Giromill existentes no mercado atual pode variar de 40% a 45% [31], para velocidades nominais do vento entre 8 a 13 m/s. Para velocidades do vento baixas entre 3 a 6 m/s, a eficiência aerodinâmica pode variar de 20% a 30% [32]. A eficiência aerodinâmica irá depender da geometria da pá adotada, da solidez da turbina e da forma como as pás são posicionadas em relação ao plano de rotação. Para o dimensionamento da turbina deste projeto será levado em consideração o coeficiente de potência igual a 25% para a velocidade do vento média de 4,4 m/s.

Os geradores de ímã permanente normalmente apresentam um rendimento de até 95% [30]. Para o dimensionamento será considerado um rendimento de 90%. Como a velocidade média do vento do local é baixa, a turbina dificilmente alcançará velocidades de rotações grandes o suficiente para acionar o gerador elétrico. Embora o gerador possua velocidades de rotação baixas, ainda assim será necessária a utilização de um sistema de multiplicação de velocidades. Então, as perdas da transmissão de potência mecânica deverão ser consideradas no dimensionamento. A eficiência do sistema de transmissão pode variar de 95 a 99% [33]. Para este projeto será considerada uma eficiência de 95%.

Todavia, será necessário levar em consideração as perdas elétricas no inversor durante a sua operação, que pode variar de 5 a 15% em inversores de boa qualidade [34 e 35], e as

perdas elétricas no controlador de carga. As perdas do controlador de carga são muito pequenas, quase que desprezíveis, e então, não serão levadas em consideração no dimensionamento.

Considerando um rendimento do inversor de tensão de 85% e um rendimento global do aerogerador de 21,38% ($25\% \times 90\% \times 95\%$), pela equação 4.3, obtém-se a potência do vento necessária, que tem um valor igual a 1001,72W.

$$P_{\text{vento}} = \frac{182}{0,25 \cdot 0,9 \cdot 0,95 \cdot 0,85} \cong 1001,72W \quad (4.4)$$

Desta forma, a turbina deve ter uma área de captação que compreenda a potência do vento de 1001,72W para a velocidade do vento média de 4,4 m/s. A área de captação da turbina pode ser calculada por:

$$A = \frac{P_{\text{vento}}}{0,5 \cdot \rho \cdot V^3} \quad (4.5)$$

$$A = \frac{1001,72}{0,5 \cdot 1,225 \cdot (4,4)^3} \cong 19,2 \text{ m}^2 \quad (4.6)$$

A turbina deve ter uma área de 19,2 m² (para uma densidade do ar igual a 1,225 kg/m³) para que seja possível captar do vento uma potência de 1001,72W. Como este projeto requer turbinas com dimensões pequenas, será necessário utilizar mais de uma turbina para obter a potência desejada. Para a determinação do número de turbinas e da área da captação de cada turbina, foi feito um estudo de quanto de área cada turbina deveria possuir se fosse utilizado um determinado número de turbinas no sistema. Cada área foi calculada fazendo a divisão do resultado da área de captação necessária, obtido na equação 4.6, pelo número de turbinas.

Número de turbinas	Área de captação (m ²)
1	19,2
2	9,60
3	6,40
4	4,80
5	3,84
6	3,20
7	2,74

Tabela 4.3 – Área de captação de cada turbina do sistema

Foram feitas comparações entre as áreas correspondentes a cada número de turbinas e verificou-se que utilizando sete turbinas, cada turbina deveria possuir uma área de captação de 2,74 m², o que permite que a turbina tenha dimensões pequenas, facilitando assim, na construção da turbina e no transporte da mesma. A área de captação de 2,74m² permite também que a turbina possua dimensões com valores em torno das dimensões de algumas turbinas Giromill que estão sendo tomadas como referência neste trabalho, as quais estão mostradas na Tabela 4.4.

Modelo	BE-L 300	BE-300	VAWT 300W	APV 300 Nile	300W H VAWT	Aeolos V 300W
Número de pás	5	3	5	5	5	3
Potência nominal (W)	300	300	300	300	300	300
Velocidade nominal (m/s)	10	10	8	7-8	8-10	10
Velocidade de arranque (m/s)	2	1	2	2	1,8	1,5
Comprimento da pá (m)	1,30	2	1,12	3	1,40	1,60
Diâmetro do rotor (m)	1,38	1,35	1,60	1,20	1,20	1,20
Área varrida (m ²)	1,80	2,70	1,80	3,60	1,68	1,92
Cp (%)	-	-	41	-	40-45	-

Tabela 4.4 – Turbinas Giromill com capacidade de geração de 300 W dos fabricantes Bayat Energy [36], Ningbo Star Solar [37], Greenenergy Technology [38], Bjerga Engineering [31] e Aeolos Wind Energy [39].

O sistema, então, deverá ser composto por sete turbinas, cada uma com área de captação de 2,74 m².

A área de captação de uma turbina Giromill é definida por:

$$A = D \cdot L \quad (4.7)$$

As dimensões da turbina podem ser calculadas isolando um dos termos, D ou L, da equação 4.7, que define a área varrida pelas pás da turbina Giromill. Para isso é necessário

conhecer um dos termos da equação 4.7. O diâmetro será tomado como referência e será escolhido com base nas dimensões das turbinas comerciais mostradas na Tabela 4.4.

Considerando um diâmetro de 1,5 m e uma área de captação de 2,74 m², o comprimento das pás pode ser determinado isolando o termo L da equação 4.5, conforme mostrado na equação 4.8.

$$L = \frac{A}{D} = \frac{2,74}{1,5} = 1,83 \text{ m} \quad (4.8)$$

Então, cada turbina possuirá um diâmetro de 1,5 m e pás com comprimento igual a 1,83m.

Em se tratando de eficiência, custo e simplicidade, a turbina Giromill é a mais adequada para atender a atividade pesqueira das comunidades, porém apesar da sua simplicidade, ainda assim é encontrada uma dificuldade na parte construtiva da turbina. Durante os estudos realizados para a construção do protótipo, foram encontradas algumas dificuldades com relação à parte construtiva das pás, pois para que a turbina funcione adequadamente, ela deve ser construída com materiais apropriados e deve possuir uma geometria específica para que a aerodinâmica das pás não seja comprometida. As turbinas que são encontradas no mercado normalmente são construídas com materiais mais sofisticados, como a fibra de vidro, utilizada na produção das pás. Podem também ser encontradas algumas turbinas com pás fabricadas de madeira.

Como o foco do trabalho é dimensionar uma turbina que atenda as necessidades da comunidade e que tenha uma construção simples para que os próprios moradores da comunidade sejam capazes de repará-la quando danificada, então será escolhido outro modelo de turbina mais simples, eficiente e que possa ser construído artesanalmente. Para este modelo serão adotadas as mesmas dimensões da turbina Giromill dimensionada nesta seção.

Dentre as turbinas de eixo vertical que podem ser construídas artesanalmente, mencionadas no item 3.4.3, a turbina Lenz é o modelo de turbina que mais se enquadra às características do local e atende aos requisitos do projeto. Conforme explicado no item 3.4.2, a turbina Lenz é uma turbina eficiente, de fácil construção e adequada para aplicações de geração de energia elétrica em pequena escala. Tem sido muito utilizada em aplicações

domésticas para geração de pequenas potências. Uma vantagem da sua utilização para a vila de pescadores é o fato de a turbina poder ser construída com materiais de custo baixo e fáceis de serem encontrados no mercado, como a folha de PVC e a folha de alumínio, utilizadas na fabricação das pás.

A turbina Lenz a ser utilizada neste projeto terá as mesmas dimensões da turbina Giromill, dimensionada neste capítulo. Cabe agora verificar se sua eficiência aerodinâmica será próxima da eficiência da turbina Giromill. De acordo com Edwin Lenz, consegue-se uma eficiência de até 41%, o que vai depender da construção da turbina e do comportamento do vento no local.

4.4.4. Coeficiente de potência da turbina

O coeficiente de potência da turbina vai depender de uma série de parâmetros aerodinâmicos que irão variar com a velocidade do vento e com a trajetória percorrida pela turbina. A expressão que define o coeficiente de potência para as turbinas de eixo vertical é dada por [40]:

$$C_p = \frac{\Omega\lambda}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left(\frac{W}{U}\right)^2 (C_s \sin \alpha - C_a \cos \alpha) d\theta \quad (4.9)$$

O ângulo de azimute θ é o ângulo da posição da pá com a perpendicular ao escoamento e o ângulo de ataque α é o ângulo formado pelo vetor que representa a velocidade relativa do escoamento e a linha da corda da pá, como mostrado na Figura 4.1. A componente V_a indicada na Figura 4.1 representa a velocidade do escoamento axial.

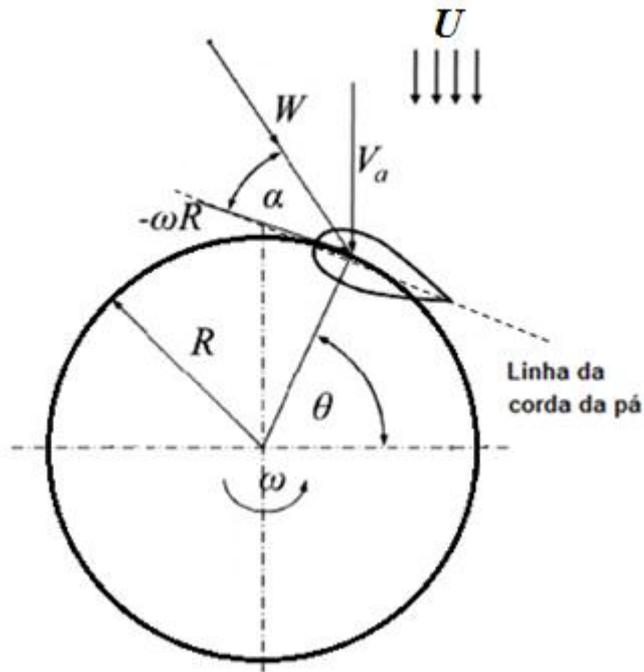


Figura 4.1 – Representação dos vetores de velocidade e dos ângulos de ataque e azimute

Como a turbina Lenz ainda é muito recente na história das turbinas de eixo vertical foram encontradas algumas dificuldades na obtenção dos dados referentes à aerodinâmica das pás da turbina, e por esse motivo, não foi possível simular a curva do coeficiente de potência da mesma, uma vez que ela depende dos coeficientes de arrasto e de sustentação, que são parâmetros cujos valores são específicos para cada modelo de turbina. Então, é necessário obter as curvas experimentalmente. Porém, para o cálculo teórico da potência mecânica da turbina deste projeto serão tomados como base os coeficientes de potência de algumas turbinas Lenz já existentes, que também foram obtidos experimentalmente.

O Gráfico 4.3 mostra as curvas de coeficiente de potência de uma turbina Lenz de três pás criada pela empresa Catapult Design, com as mesmas dimensões da turbina criada por Edwin Lenz. As curvas foram obtidas experimentalmente em um túnel de vento do centro de pesquisa da NASA. Para cada velocidade de vento aplicada, foi obtida uma curva de coeficiente de potência em função da velocidade específica.

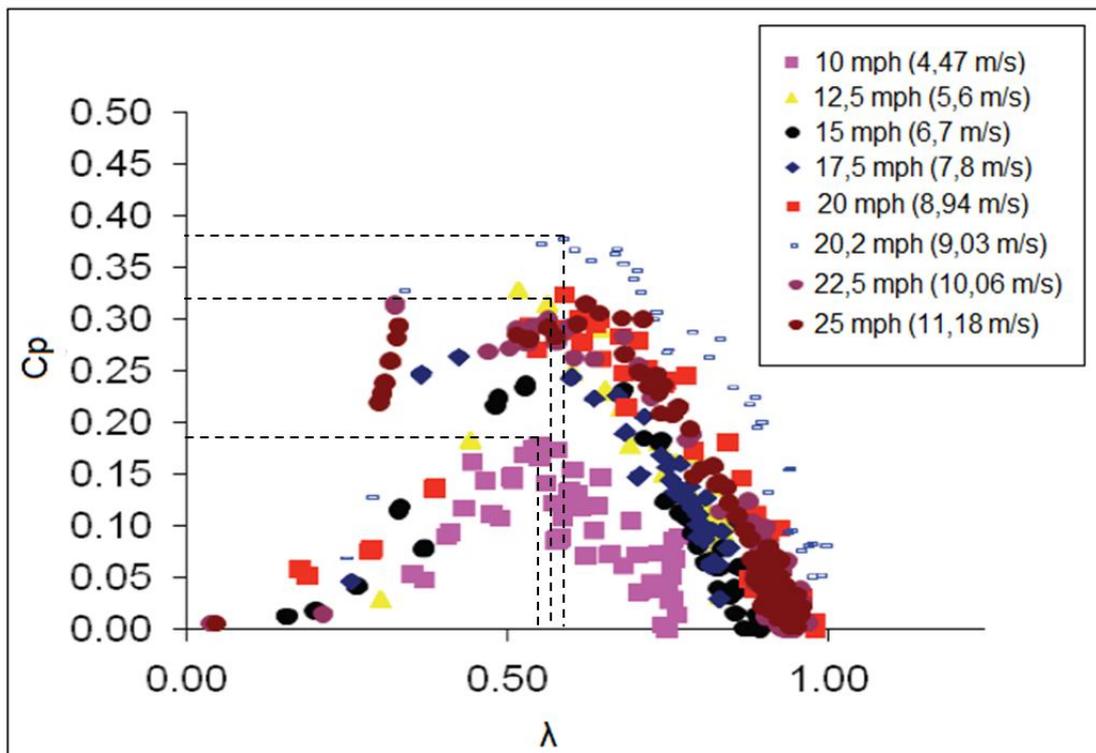


Gráfico 4.3 – Curva do coeficiente de potência em função da velocidade específica de uma turbina Lenz de três pás [41]

Do Gráfico 4.3, nota-se que a 9,03 m/s é alcançado o coeficiente de potência máximo, que tem seu valor igual a 0,38. Em velocidades do vento de 4,47 m/s e 5,6 m/s, os coeficientes de potência obtidos alcançam valores de até 19% e 32%, respectivamente. Nota-se que o coeficiente de potência máximo de 38% obtido pela Catapult Design difere do coeficiente de potência máximo obtido por Edwin Lenz, conforme mencionado no item 3.4.2, cujo valor é de 41%.

4.5. Curva de desempenho do aerogerador

A curva de desempenho ou curva de potência elétrica de uma turbina eólica representa a característica de operação da turbina, conforme já foi explicado no item 3.8. Para a obtenção dessa curva de desempenho, primeiro será necessário obter a curva de potência mecânica em função da velocidade de rotação da turbina, definir o seu ponto de operação nominal, escolher

o gerador elétrico que operará em conjunto com a turbina para o fornecimento de energia elétrica e definir uma faixa de operação da turbina.

4.5.1. Curva de potência mecânica x velocidade de rotação

Tomando como base as curvas de coeficiente de potência do Gráfico 4.3, a curva de potência mecânica em função da velocidade de rotação foi obtida utilizando a equação 3.5, explicada no item 3.6.

Para extrair os dados da curva de coeficiente de potência do Gráfico 4.3, foi necessário calcular a velocidade específica para cada velocidade de rotação, e para cada velocidade do vento testada pela Catapult Design, a partir do seguinte algoritmo de programação em Matlab:

```
D=1.5;
V=[4.47 5.6 6.5 7.5 8.5 9.03 10];
rpm=[0:1:100];

for i=1:length(V)
    for j=1:length(rpm)
        lambda(j)=(pi/60)*(rpm(j)*D/V(i));
    end
end
```

Calculados os valores de velocidade específica foi possível extrair do Gráfico 4.3 os valores aproximados dos coeficientes de potência correspondentes a cada velocidade específica para cada curva de velocidade do vento. A equação 3.5 foi utilizada para o cálculo da potência mecânica, que foi calculada para cada par de pontos de coeficiente de potencia e velocidade de rotação. De posse de todos os valores de velocidade de rotação e potência mecânica, foi possível traçar a curva de potência mecânica em função da velocidade de rotação para cada velocidade do vento, como mostrado no Gráfico 4.4.

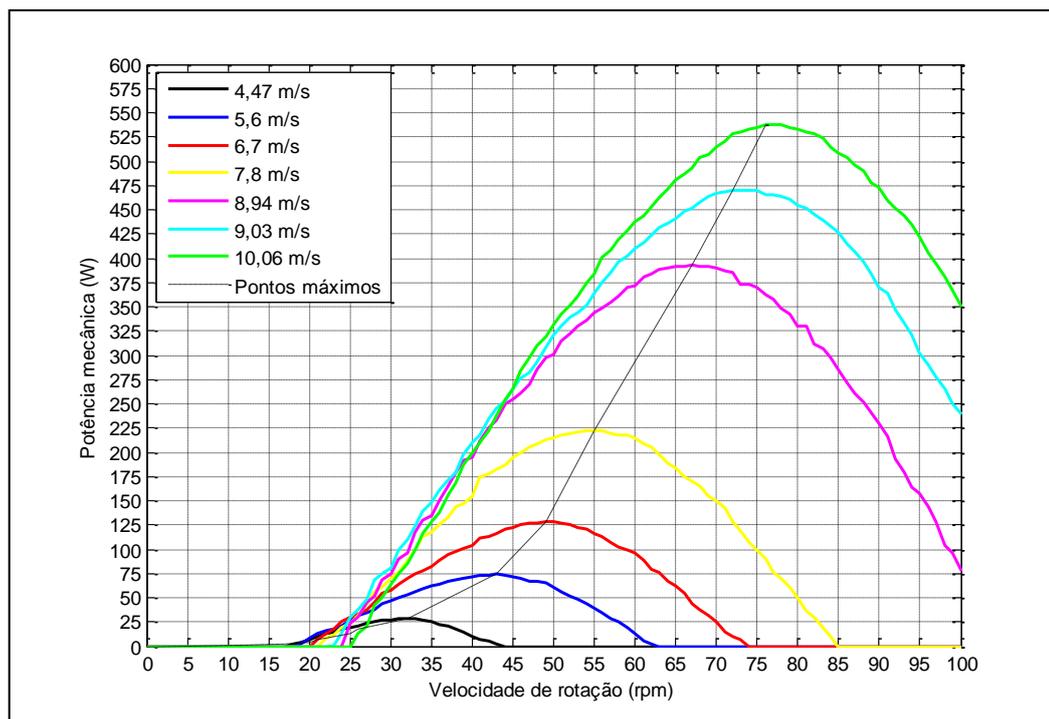


Gráfico 4.4 – Potência mecânica em função da velocidade de rotação da turbina

Verifica-se pelo Gráfico 4.4 que a turbina possui uma ampla faixa de operação para cada velocidade de vento aplicada. Porém esta faixa deverá ser limitada, pois a operação da turbina do lado esquerdo da curva de pontos máximos pode ocasionar uma situação em que a turbina será freada ao ponto de fazê-la parar de girar e deixar de gerar energia. É importante ressaltar que a partida da turbina com carga do lado esquerdo da curva impede que a mesma inicie a sua rotação, devido ao fato de a potência que é pedida pela carga ser muito maior do que a potência que a turbina é capaz de gerar e por esse motivo não sobra energia para acelerá-la. Então, a turbina deverá ser limitada para operar apenas nos pontos do lado direito de cada curva, pois nestes pontos a turbina é capaz de operar normalmente, quando estiver submetida a alterações na carga elétrica. Neste caso, deverá ser criado um sistema de controle para garantir que o ponto estará sempre operando do lado direito de cada curva.

4.5.2. Ponto nominal de operação

Nominal é a condição que uma máquina possui de operar continuamente em serviço normal ou contínuo, com capacidade de atender à carga do sistema. Como em sistemas eólicos a produção de energia é variável, devido à característica intermitente do vento, o ponto nominal de operação da turbina será definido como sendo o ponto de operação de maior probabilidade de ocorrência.

Esse ponto nominal de operação será determinado levando em consideração a frequência de ocorrência de cada velocidade de vento e o ponto central da curva de potência mecânica de cada velocidade do vento.

O ponto nominal da turbina não foi escolhido como sendo um ponto da curva de pontos máximos pelo fato de não haver um sistema de controle para manter o ponto de operação da turbina nos pontos máximos de cada curva, já que é um sistema simples e sem ligação com a rede elétrica, e por sua vez, não requer a maximização de potência.

Para auxiliar no cálculo do ponto de operação de maior probabilidade de ocorrência, será definida uma faixa de velocidade de vento, em que, para sua determinação serão levadas em consideração as curvas de frequência de ocorrência das velocidades do vento do local da instalação e de capacidade de produção de energia da turbina no período de estudo.

A curva de produção de energia ainda não foi obtida e, por este motivo, será explicado a seguir como traça-la.

A produção total de energia da turbina no período avaliado pode ser calculada pela equação 4.10 ou, graficamente, fazendo a multiplicação do histograma de frequência de ocorrência das velocidades do vento pelo período total de estudo e pela curva de potência mecânica que a turbina é capaz de gerar em função da velocidade do vento [5]. Esta última é obtida colocando a curva de pontos máximos da potência mecânica traçada no item anterior em função da velocidade do vento, como mostrado no Gráfico 4.5.

$$E_{total} = \sum f_i P_i T \quad (4.10)$$

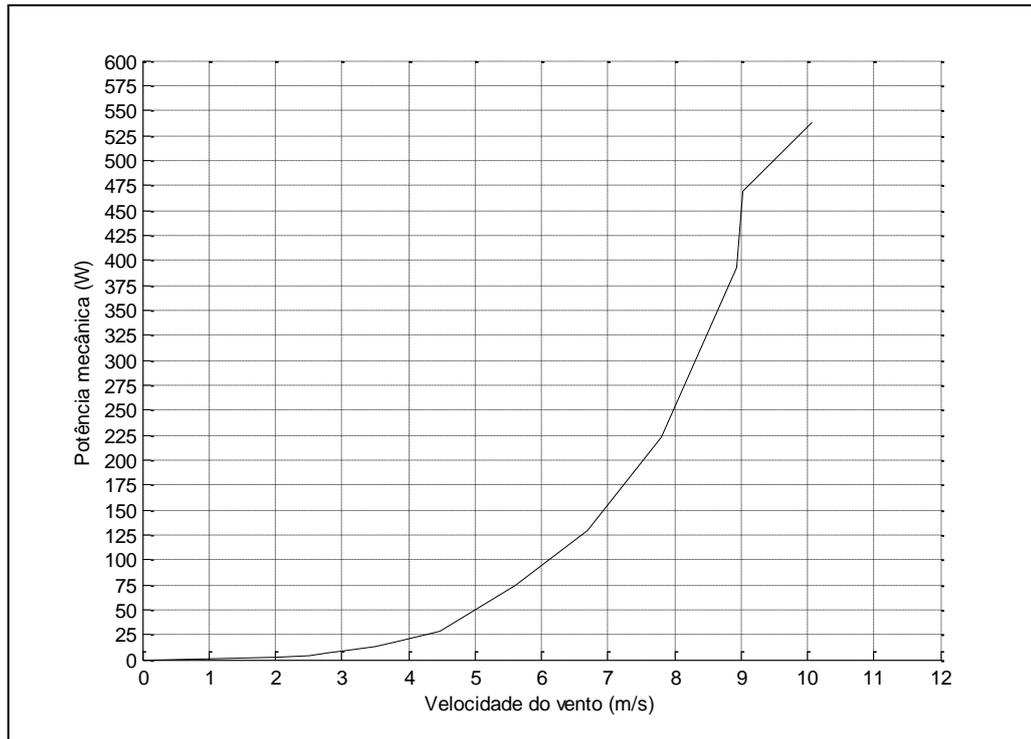


Gráfico 4.5 – Potência mecânica da turbina

Para auxiliar na multiplicação das curvas de frequências de ocorrência da velocidade do vento e de potência mecânica da turbina, esta última foi representada por uma curva em degrau, como mostrado no Gráfico 4.6. O resultado da multiplicação das curvas de frequência de ocorrência, traçada no Gráfico 4.1 e da curva de potência mecânica do Gráfico 4.6, é uma curva de energia, que mostra a quantidade de energia mecânica que a turbina é capaz de produzir, considerando o período em estudo da velocidade do vento no local da instalação.

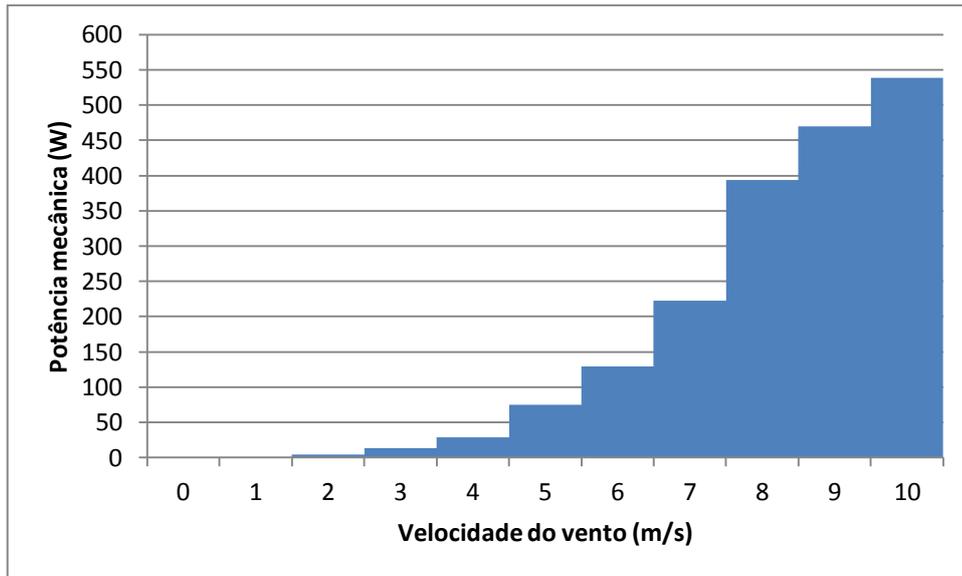


Gráfico 4.6 – Potência da turbina

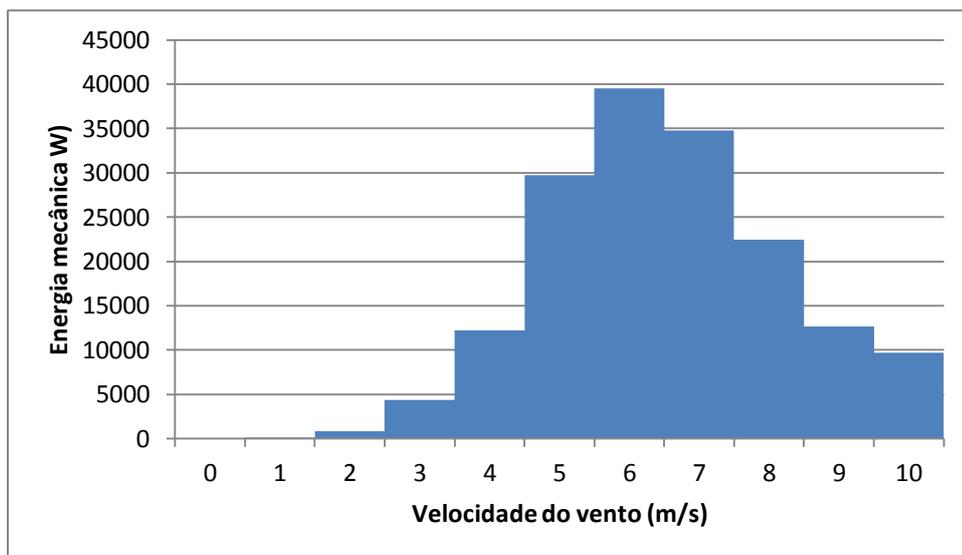


Gráfico 4.7 – Estimativa da produção de energia da turbina

Fazendo uma comparação entre os Gráficos 4.1 e 4.7, é possível verificar que a velocidade do vento de 4 m/s, apesar de não fornecer uma energia considerável em relação às demais velocidades, é a velocidade do vento que possui a maior frequência de ocorrência, e por esse motivo será incluída na faixa de velocidades. É também possível verificar que, apesar da velocidade de 7 m/s apresentar uma frequência de ocorrência de apenas 7,66% do período avaliado, a mesma apresenta a segunda maior produção de energia, como mostrado no

Gráfico 4.7 e por esse motivo, será incluída na faixa de velocidades. A velocidade do vento de 8 m/s foi descartada do estudo, pois ocorre em apenas 2,79% do período avaliado, e sua contribuição de energia não é tão considerável em relação às demais velocidades (de 5 a 7 m/s). Contudo, a faixa de velocidades definida para o estudo do ponto de operação de maior probabilidade de ocorrência compreende as velocidade do vento de 4 m/s a 7 m/s, que ocorre em 63,33% do período avaliado.

Definida a faixa de velocidade de vento, o ponto central de cada curva de velocidade do vento foi encontrado fazendo a divisão do comprimento total de cada curva por dois, considerando apenas os pontos do lado direito da mesma e as curvas correspondentes às velocidades do vento que estão dentro da faixa estabelecida, e aplicando o método de interpolação entre os dois pontos do segmento que guarda o resultado da divisão, para encontrar o ponto central da curva. O comprimento da curva foi calculado fazendo o somatório de todos os segmentos retilíneos que interligam cada par de pontos da curva. O ponto de maior probabilidade de ocorrência de operação, que corresponde ao ponto nominal de operação da turbina foi então calculado fazendo a média de todos os pontos centrais encontrados para cada curva de velocidade do vento, ponderada pela frequência de ocorrência de cada velocidade do vento da faixa estabelecida. Os resultados obtidos para as coordenadas do ponto nominal foram os seguintes: 53,99 rpm e 51,46 W. Então, a potência mecânica nominal da turbina foi definida como sendo igual a 51,46W.

O Gráfico 4.8 faz uma representação dos pontos centrais e do ponto de maior probabilidade de ocorrência de operação na curva de potência mecânica em função da velocidade de rotação.

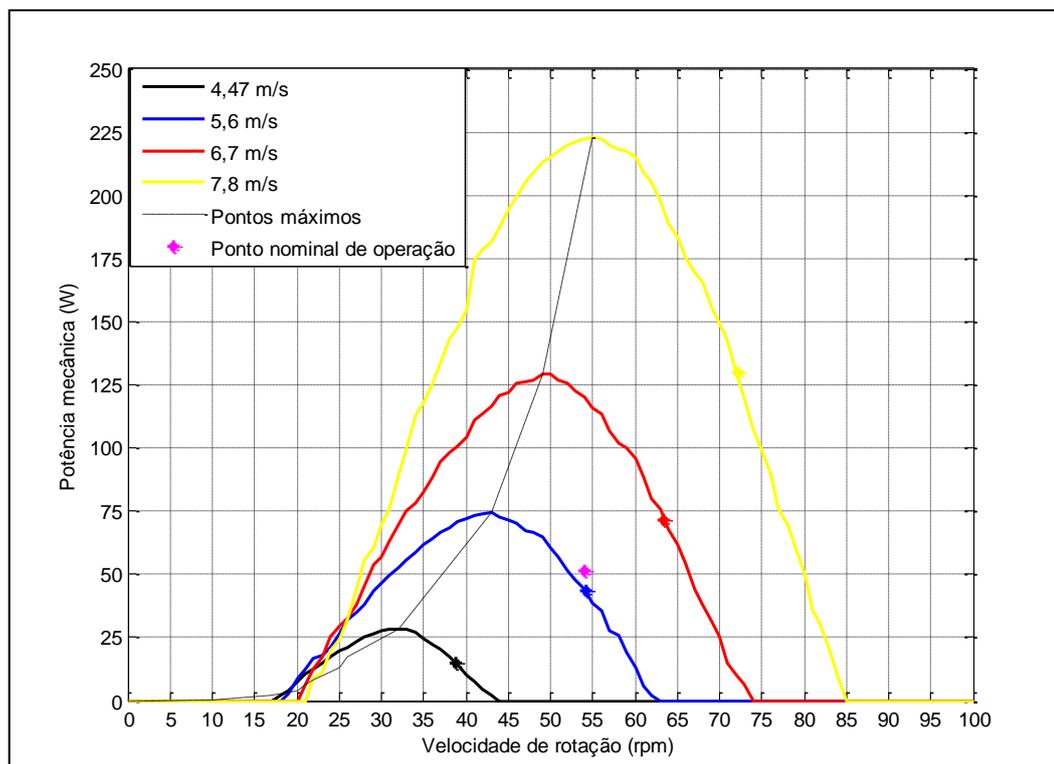


Gráfico 4.8 – Representação do ponto central de cada curva e o ponto de maior probabilidade de ocorrência de operação na curva de Potência mecânica x Velocidade de rotação

É importante ressaltar que o ponto nominal da turbina não se refere ao ponto máximo de operação da turbina, e sim, ao ponto no qual a turbina tem maior chance de operar em serviço contínuo, com produção significativa de energia e com pouco risco de instabilidade.

4.5.3. Gerador elétrico

Definido o ponto nominal de operação da turbina, o próximo passo é escolher um gerador elétrico apropriado para a turbina. Esse deverá ter uma potência nominal com valor a cima do valor obtido para a potência nominal da turbina e ser capaz de atender a potência pedida pela carga. O valor acima do ponto nominal da turbina é para não sofrer danos por sobrecargas ou não ficar com produção limitada em ventos superiores aos da região do ponto de operação nominal.

Como a carga elétrica máxima que ocorre durante o dia é de 325W, cada gerador do sistema eólico composto por sete turbinas deverá ter uma potência nominal em torno de 50W.

O gerador elétrico que será utilizado para operar em conjunto com a turbina Lenz é um gerador de imã permanente trifásico de 53W de potência nominal, da empresa Ctturbine New Energy [29]. Na Tabela 4.5 estão especificadas algumas características elétricas do gerador. A curva de potência elétrica em função da velocidade de rotação está mostrada no Gráfico 4.9. Da Tabela 4.5, nota-se que a tensão de saída do gerador já é retificada em 14V.

Potência nominal (W)	53
Velocidade de rotação nominal (rpm)	200
Torque de partida (N.m)	0,15
Tensão nominal (V)	14 (CC)
Eficiência (%)	85

Tabela 4.5 – Especificações do gerador de imã permanente de 50W [29]

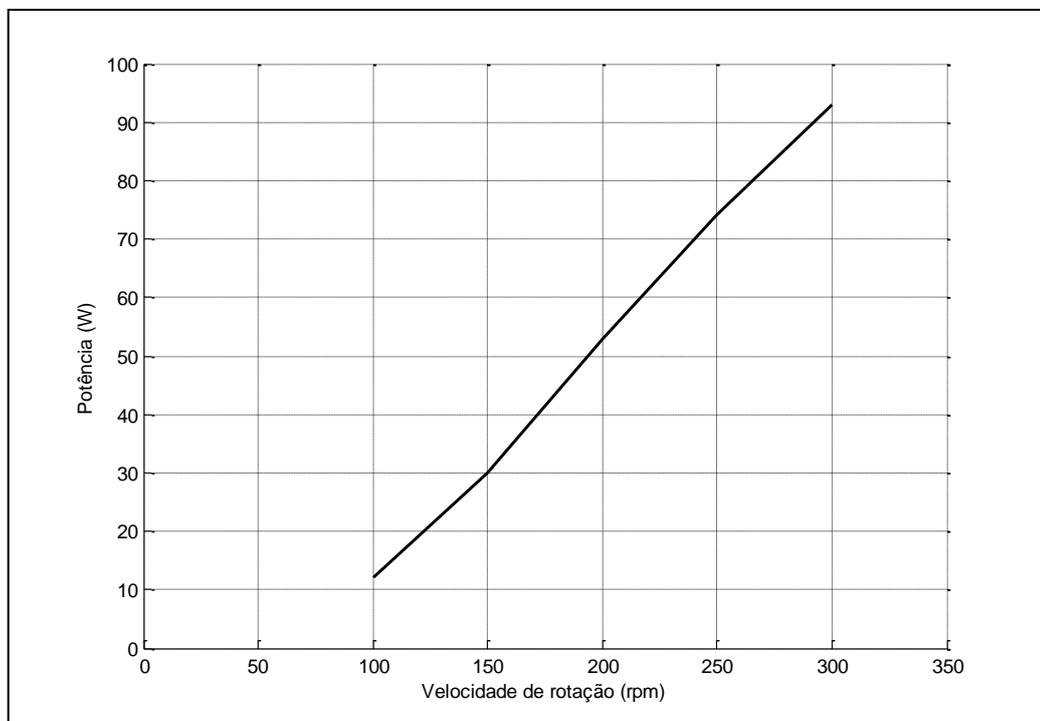


Gráfico 4.9 – Curva de potência do gerador de imã permanente de 50W [29]

Nota-se pelo Gráfico 4.9, que após alcançar o seu ponto nominal, o gerador ainda é capaz de gerar potência até 93W.

Devido à baixa velocidade de rotação da turbina, o acoplamento entre a turbina e o gerador elétrico será realizado através de um sistema de multiplicação de velocidades, que irá transferir toda a potência do eixo de baixa rotação para o eixo de alta rotação, onde está acoplado o gerador elétrico. A transmissão pode ser realizada por engrenagens ou por polias, sendo a primeira a mais utilizada em sistemas eólicos. Neste projeto será utilizado o sistema de transmissão por polias, devido ao seu baixo custo em relação às engrenagens.

A relação do sistema de multiplicação pode ser determinada por:

$$k = \frac{d_{\text{polia turbina}}}{d_{\text{polia gerador}}} = \frac{n_{\text{gerador}}}{n_{\text{turbina}}} \quad (4.11)$$

A velocidade de rotação da turbina pode ser extraída da curva de potência mecânica traçada no Gráfico 4.8. Considerando os rendimentos do gerador e do sistema de multiplicação de velocidades de 85% e 95%, respectivamente, a potência mecânica da turbina que deve ser convertida em 53W de potência elétrica pelo gerador deve ter um valor igual a 65,63W. No Gráfico 4.8, a potência mecânica de 65,63W é alcançada a uma velocidade de rotação de 41 rpm. Se o gerador requer 200 rpm para fornecer a potência nominal de 53W, a qual é alcançada pela turbina a uma velocidade de rotação de 41 rpm, então a transmissão deverá possuir uma relação de 4,9:1.

Fazendo a multiplicação da relação de transmissão da velocidade de rotação da turbina e descontando as perdas referentes ao sistema de multiplicação de velocidades, é possível encontrar a curva de potência mecânica do eixo do gerador, que foi transmitida pela turbina eólica.

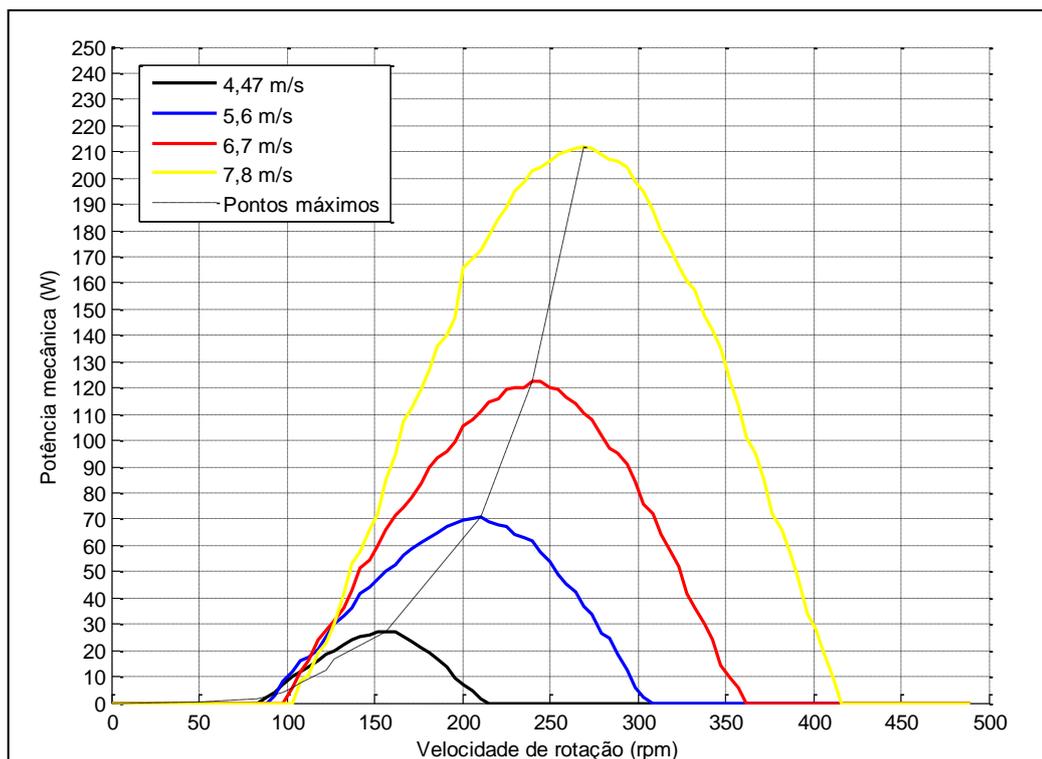


Gráfico 4.10 – Potência mecânica fornecida pela turbina ao eixo do gerador

Nota-se pelo Gráfico 4.9 que a velocidade de rotação máxima que o gerador é capaz de alcançar é de 300 rpm, e por esse motivo, a curva de potência mecânica do eixo do gerador deverá ser limitada a uma velocidade de rotação de 300 rpm. O Gráfico 4.10 mostra que se a carga for mantida constante na potência nominal do gerador de 65,63W e ocorre aumento na velocidade do vento, a turbina tende a acelerar até o ponto de operação alcançar a nova curva de velocidade do vento. Se a turbina ultrapassar a velocidade de rotação máxima de 300 rpm, o sistema de freio deverá ser acionado para a que velocidade de rotação da turbina seja reduzida.

A curva de potência elétrica do conjunto turbina-gerador pode ser encontrada fazendo a multiplicação do rendimento do gerador elétrico pela curva de potência mecânica do eixo do gerador do Gráfico 4.10. O resultado dessa multiplicação está mostrado no Gráfico 4.11, que representa curva de potência elétrica do conjunto turbina-gerador.

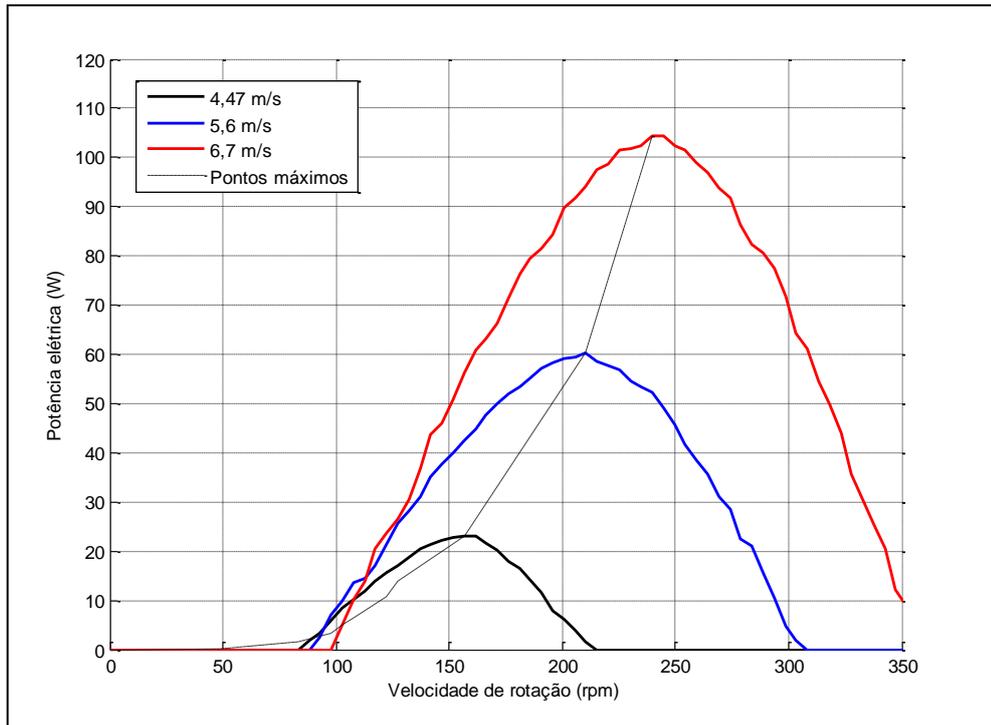


Gráfico 4.11 – Potência elétrica do conjunto turbina-gerador

Uma vez que a potência nominal do gerador é igual a 53W, esta potência deverá ser limitada por uma reta constante, no Gráfico 4.11, a partir da velocidade de rotação de 200 rpm, que corresponde a velocidade de rotação na qual a potência nominal é alcançada.

De acordo com a Tabela 4.5, o gerador possui um torque de partida de 0,15 N.m. Para que o mesmo seja acionado, é necessário um torque mecânico do eixo de transmissão maior do que 0,15 N.m, para que seja possível vencer o torque de partida do gerador. O torque mecânico do eixo de transmissão pode ser calculado por:

$$T_{\text{mec eixo}} = \frac{60 \cdot \eta_m \cdot P_{\text{mec}}}{2\pi \cdot k \cdot n_{\text{turbina}}} \quad (4.12)$$

A partir da equação 4.12, calculou-se o torque mecânico do eixo para cada potência mecânica e a correspondente velocidade de rotação da curva de pontos máximos do Gráfico 4.10, e verificou-se que o torque de partida é vencido pela turbina a uma velocidade do vento

de 2,5 m/s, a 98 rpm, com um torque mecânico do eixo de transmissão de 0,154 N.m. A curva do torque mecânico do eixo de transmissão está mostrada no Gráfico 4.12. É a partir da velocidade do vento de 2,5 m/s que a turbina iniciará a sua geração de energia.

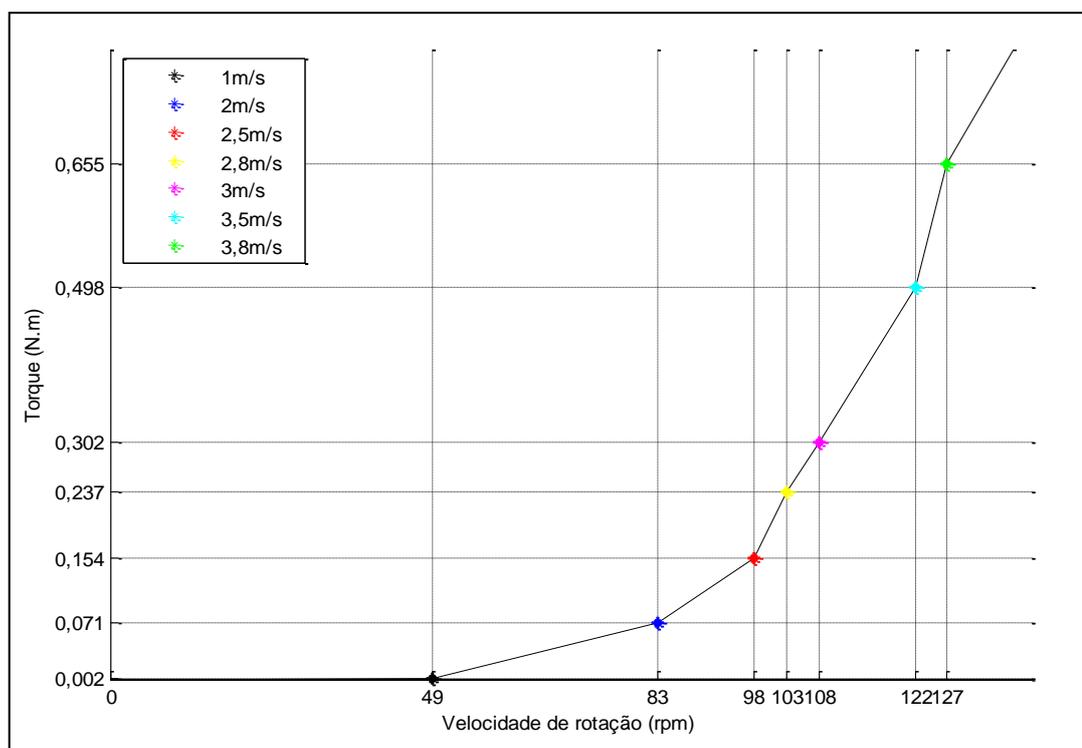


Gráfico 4.12 – Torque mecânico do eixo de transmissão

De posse de todos os dados para a construção da curva de desempenho, é possível traçar a mesma, colocando a curva de potência elétrica do Gráfico 4.11 em função da velocidade do vento. Esta curva irá representar o quanto de potência elétrica o aerogerador será capaz de gerar.

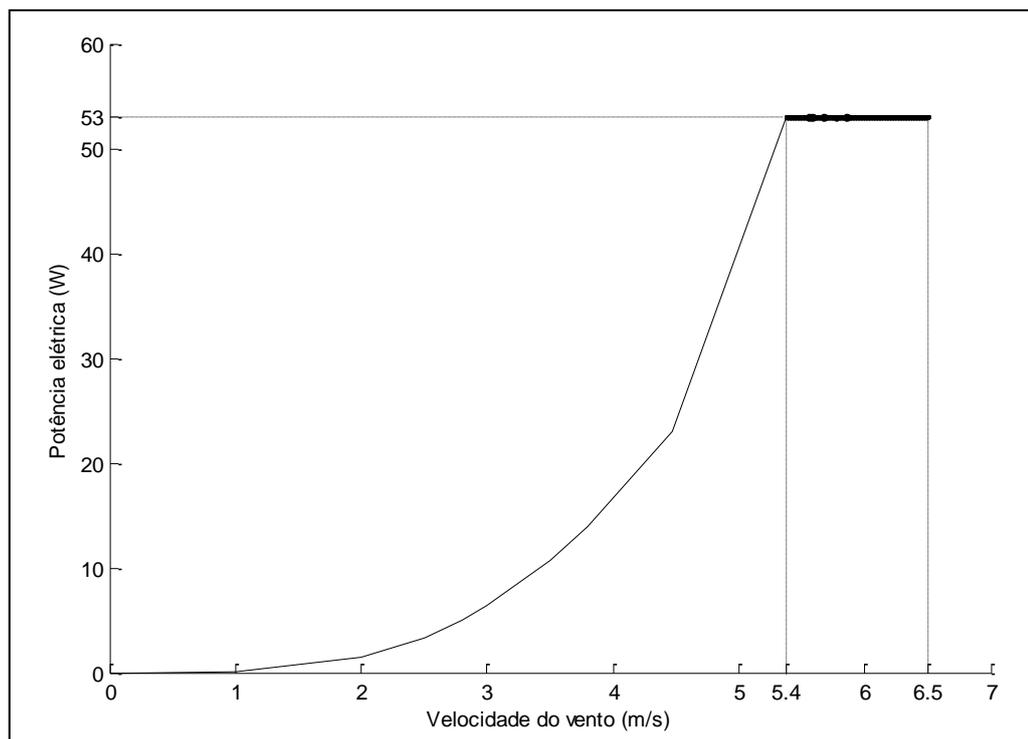


Gráfico 4.13 – Curva de desempenho do aerogerador

A curva do Gráfico 4.13 mostra que o aerogerador é capaz de gerar uma potência até 53W, a qual é alcançada a 5,4 m/s. O aerogerador continua a fornecer a potência nominal até a velocidade do vento de 6,5 m/s, acima dessa velocidade do vento o gerador não é mais capaz de trabalhar corretamente e os sistemas de freios deverão atuar para reduzir a velocidade de rotação da turbina ou até mesmo retirar a mesma de operação. A maioria das turbinas eólicas utilizam sistemas de frenagem que podem atuar mecanicamente, no eixo da turbina, ou aerodinamicamente, nas pás da turbina. Os sistemas de freio não fazem parte do escopo deste trabalho e por este motivo, não serão estudados neste trabalho.

4.6. Sistema eólico com armazenamento de energia

O sistema eólico da vila de pescadores será composto por um conjunto de turbinas, que irá alimentar a carga elétrica do sistema e carregar o banco de baterias nos momentos em que há sobra de energia. O banco de baterias será responsável por atender a carga nos momentos em

que não há geração ou em que a velocidade do vento não é suficiente para atender a demanda de energia. Um controlador de carga será colocado no sistema para gerenciar o fluxo de energia e preservar a integridade física de cada componente do sistema. A Figura 4.2 faz uma representação do sistema eólico com armazenamento de energia.

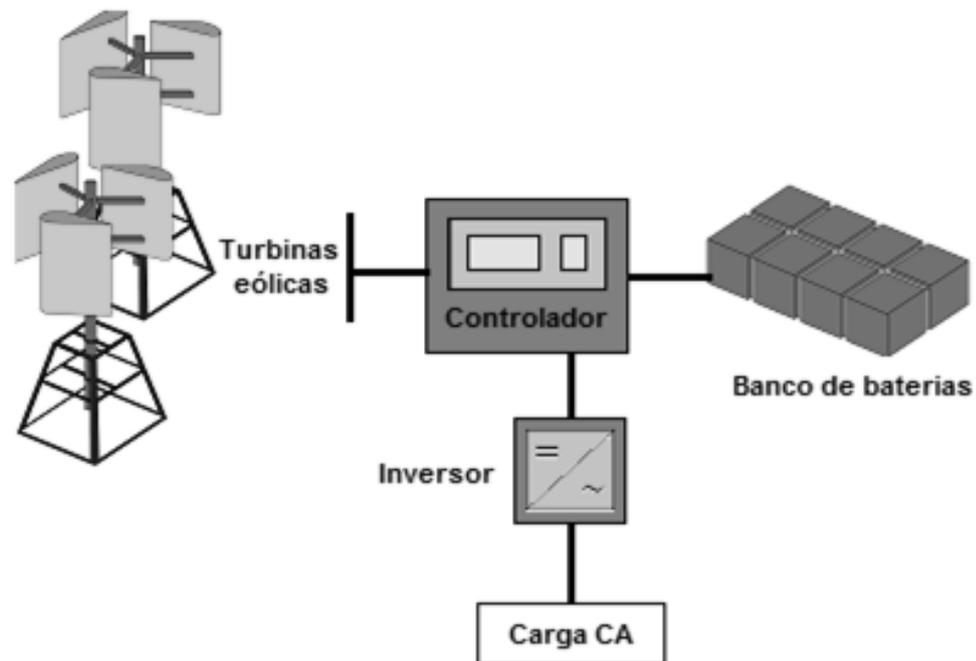


Figura 4.2 - Sistema eólico com armazenamento de energia

4.7. Dimensionamento do banco de baterias

Conforme já foi mencionado no item anterior, o banco de baterias é o componente do sistema que é responsável pelo suprimento da carga elétrica nos momentos em que não há geração de energia elétrica por parte das turbinas eólicas.

O seu dimensionamento consiste na determinação de uma série de parâmetros, como a capacidade do banco de baterias, o número e o tipo de baterias que serão utilizadas e a forma como elas serão agrupadas no banco. Para a determinação desses parâmetros será feito um

estudo de comparação entre geração e consumo de energia por dia para verificar os horários que as baterias devem operar e a capacidade que as mesmas devem ter para atender a carga elétrica do sistema.

4.7.1. Balanço de energia entre geração e carga elétrica

A primeira etapa do dimensionamento de um sistema de baterias é o cálculo do balanço de energia entre geração e consumo de energia por dia, para que seja possível conhecer o excedente de energia da geração e verificar se essa energia de sobra será suficiente para recarregar as baterias. Para isso será necessário conhecer a geração diária de energia e o consumo da carga ao longo do dia.

O Gráfico 4.14 faz uma representação da média horária da velocidade do vento para o período em estudo, cujos valores também estão mostrados na Tabela 4.6. Nota-se pela Tabela 4.6 que as velocidades do vento estão variando de três em três horas. Isso se deve ao fato de que as velocidades do vento foram coletadas em intervalos de três em três horas e a velocidade mostrada no intervalo de tempo de três horas representa a velocidade média do vento do intervalo.

A média horária da velocidade do vento mostrada na Tabela 4.6 será adotada como um perfil de vento para o cálculo da geração de energia ao longo do dia.

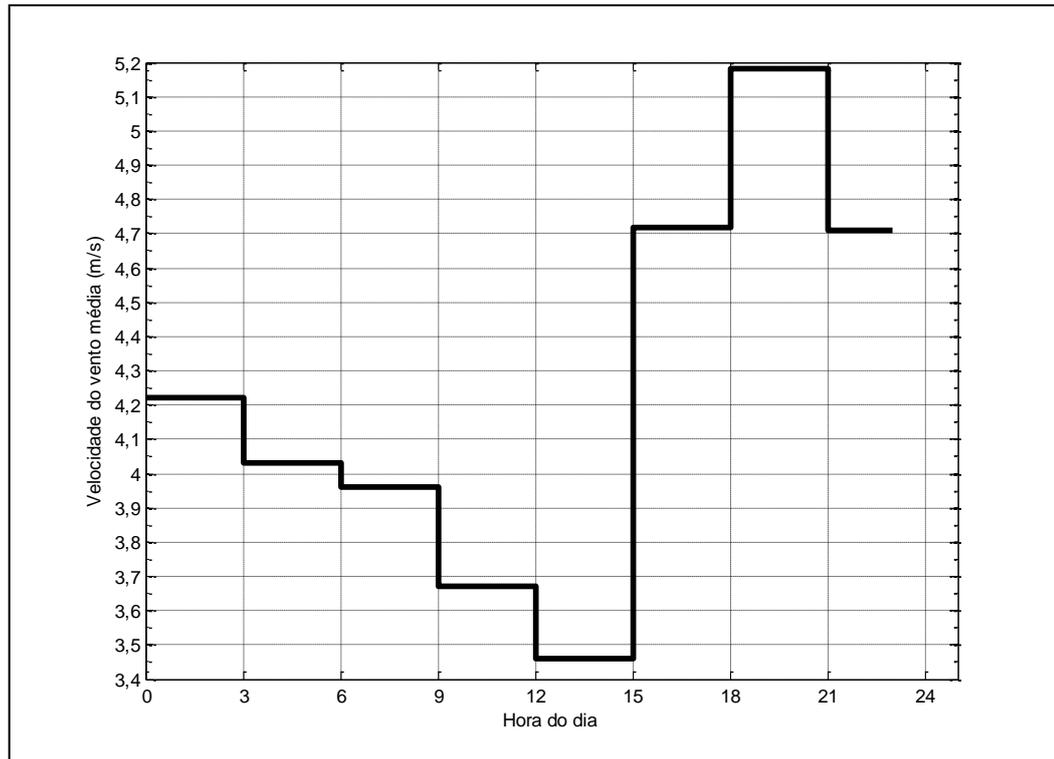


Gráfico 4.14 – Média horária da velocidade do vento no período avaliado

Hora do dia	00:00	3:00	6:00	9:00	12:00	15:00	18:00	21:00
Velocidade do vento média (m/s)	4,22	4,03	3,96	3,67	3,46	4,72	5,18	4,71

Tabela 4.6 – Média horária da velocidade do vento no período avaliado.

A distribuição diária da potência elétrica foi calculada levando em consideração a média horária da velocidade do vento no período avaliado e o número de turbinas do sistema eólico. Uma vez que a turbina Lenz possui um coeficiente de potência para a velocidade média do vento de 4,4 m/s com valor menor do que o da turbina Giromill dimensionada no item 4.4.3 e que o gerador elétrico a ser utilizado em conjunto com a turbina Lenz possui um rendimento de 85%, menor do que o rendimento adotado no dimensionamento da turbina Giromill, cujo valor adotado foi de 90%, então será necessário adicionar uma turbina ao sistema eólico para corrigir a potência total que será gerada pelo sistema. A potência elétrica gerada diariamente pelo sistema eólico pode ser calculada por:

$$P_{e \text{ sistema eólico}} = \frac{1}{2} \rho A v^3 c_p \eta_g \eta_m N_{\text{turbinas}} \quad (4.13)$$

No cálculo da potência elétrica gerada pelo sistema foi levada em consideração a capacidade de geração da turbina para cada velocidade do vento. Uma maneira alternativa de se obter a potência elétrica gerada pelo sistema eólico é extrair da curva de desempenho de cada aerogerador, mostrada no Gráfico 4.13, a potência elétrica correspondente a cada velocidade do vento do perfil de vento, e multiplica-la pelo número total de turbinas do sistema. O resultado do cálculo da potência elétrica gerada pelo sistema eólico está mostrado na Tabela 4.7 e representado graficamente no Gráfico 4.15.

Hora do dia	00:00	3:00	6:00	9:00	12:00	15:00	18:00	21:00
Velocidade do vento média (m/s)	4,22	4,03	3,96	3,67	3,46	4,72	5,18	4,71
Potência elétrica gerada pelo sistema eólico (W)	157,28	137,02	129,6	100,21	81,66	250,91	372,08	247,75

Tabela 4.7 – Potência elétrica gerada pelo sistema eólico diariamente

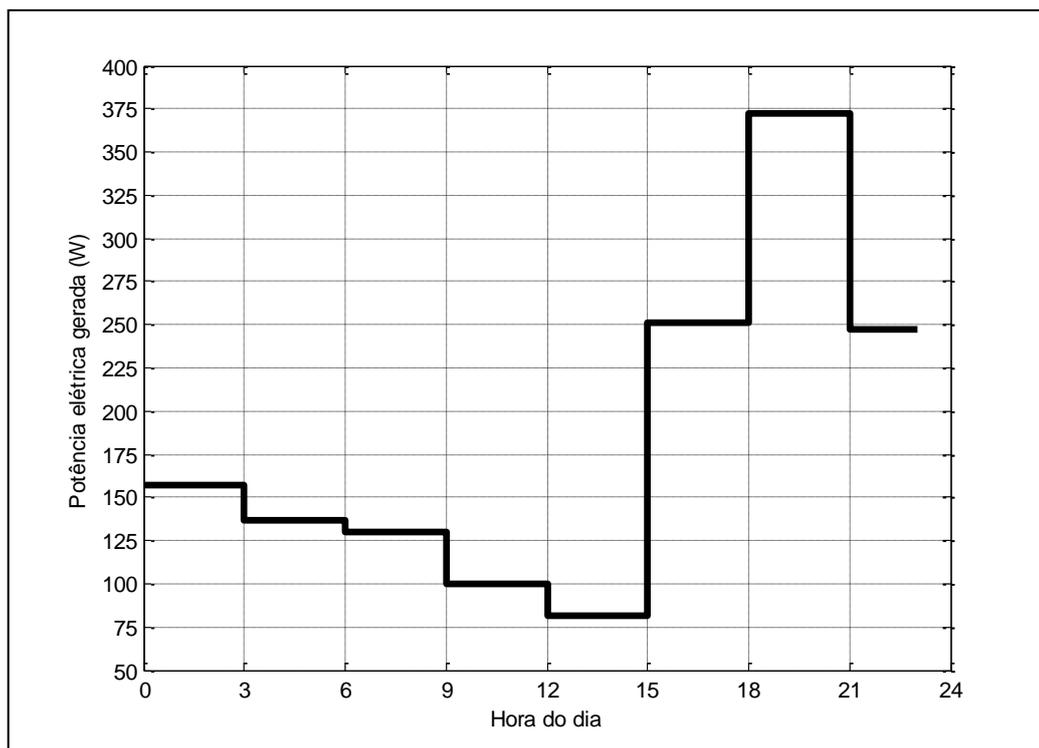


Gráfico 4.15 – Distribuição diária da potência elétrica gerada pelo sistema eólico

Pelo Gráfico 4.15, pode-se obter a produção média de energia por dia fazendo a soma de cada energia média gerada no intervalo de tempo de três horas do dia. A produção média de energia por dia é de 4.429,52Wh.

O balanço de energia entre geração e carga foi feito sobrepondo a curva da potência elétrica gerada ao longo do dia e a curva de consumo da carga elétrica ao longo do dia, conforme mostrado no Gráfico 4.16. Como as cargas do sistema são alimentadas por corrente alternada, foi necessário considerar o rendimento do inversor no cálculo do balanço de energia. Para auxiliar no cálculo, ao invés de multiplicar a curva de geração pelo rendimento do inversor, a carga elétrica foi aumentada dividindo a sua energia de consumo no dia pelo rendimento do inversor. A energia total de consumo da carga no dia, aumentada pelo rendimento do inversor, é então igual a 3217,65Wh. O resultado do balanço de energia está mostrado no Gráfico 4.17.

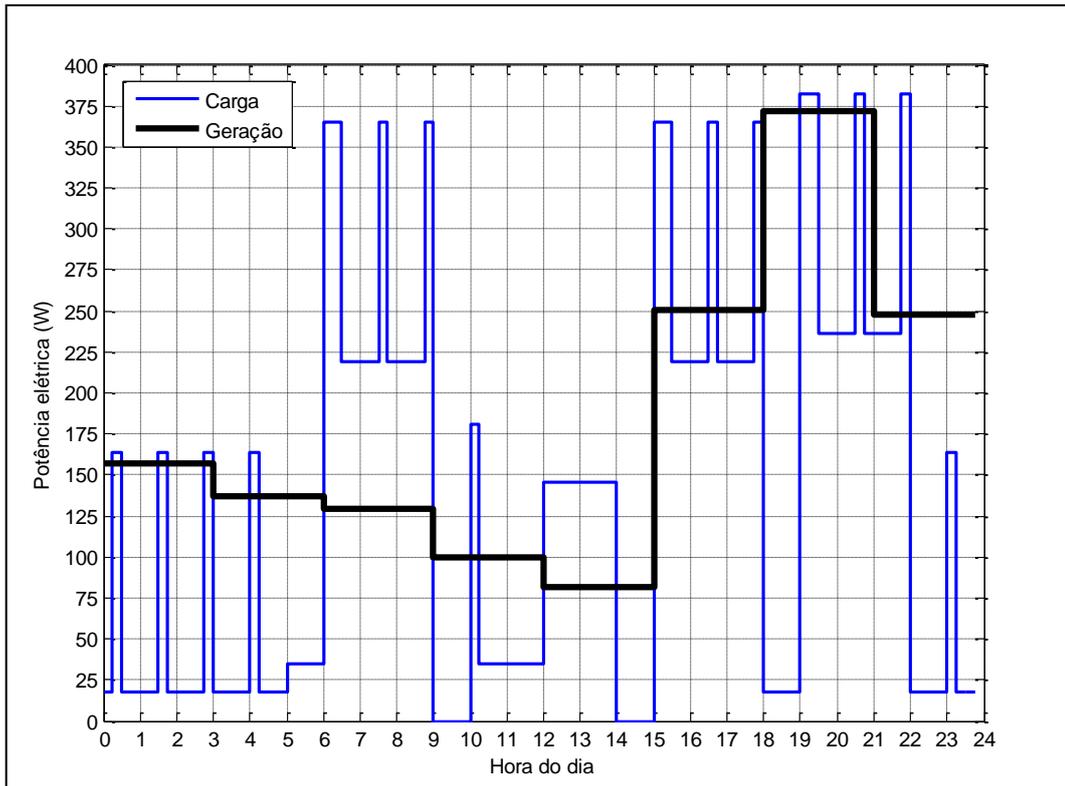


Gráfico 4.16 – Balanço de energia

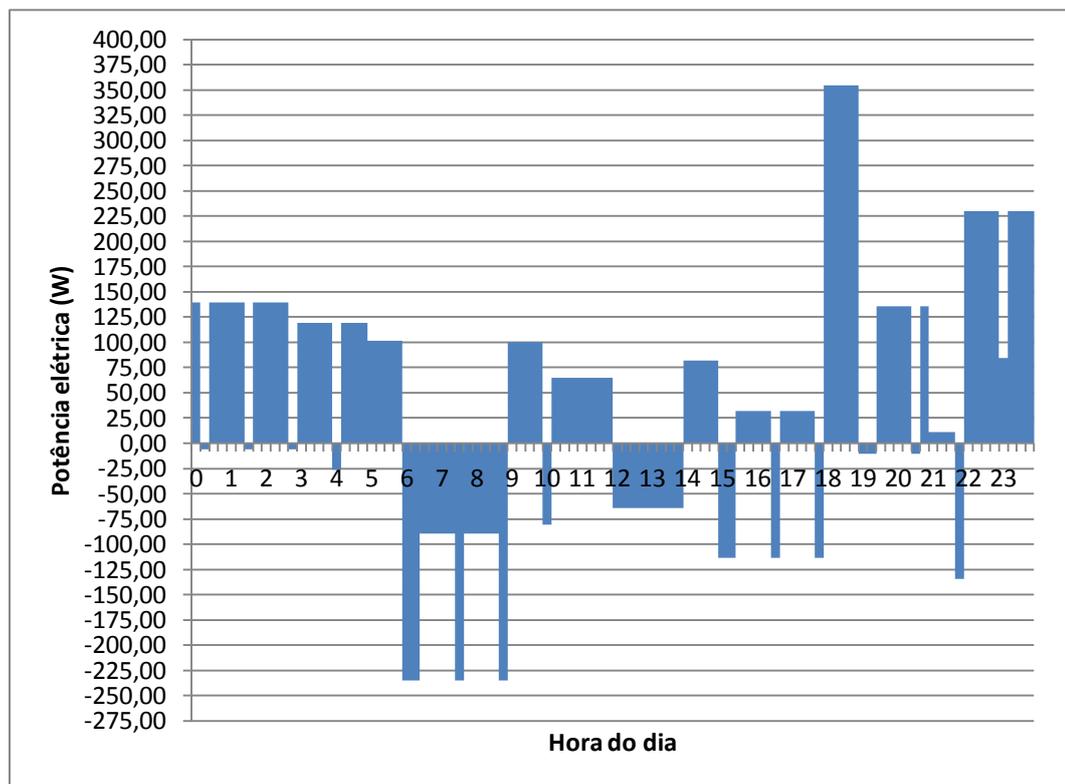


Gráfico 4.17 – Resultado do balanço de energia entre geração e carga elétrica

No Gráfico 4.17, o excedente de energia, representado pela parte positiva do gráfico, corresponde a um valor de 1211,87Wh. A parte negativa do gráfico representa a quantidade de energia que a turbina não é capaz de fornecer para atender a carga, e corresponde a um valor de 728,70Wh.

A parcela da energia da carga que o sistema eólico é capaz de atender pode ser calculada fazendo a subtração do consumo de energia do dia pela energia correspondente a parte negativa do gráfico do balanço de energia. Para o perfil de vento adotado, o sistema eólico é capaz de atender apenas 77,35% do consumo total de energia da carga elétrica, que corresponde a uma energia de 2488,95Wh.

4.7.2. Capacidade do banco de baterias

As baterias deverão ser dimensionadas de forma a atender a carga elétrica do sistema nos momentos em que a geração não é suficiente para atender a mesma. Para o dimensionamento serão consideradas duas situações em que a carga deverá ser atendida pelo banco de baterias: quando a carga não é atendida pelo sistema eólico nos horários do dia em que há ventos de calmaria e quando a carga não é atendida pelo sistema eólico durante vários dias sem vento satisfatório para a geração de energia elétrica. Então, o sistema de armazenamento será composto por dois bancos de baterias, um para o suprimento da carga nos horários do dia em que há ventos de calmaria e o outro para o suprimento da carga durante os dias em que não há geração de energia. Para auxiliar na explicação do dimensionamento o primeiro será referenciado como *banco de baterias de retaguarda* e o segundo como *banco de baterias de reserva*.

O cálculo da capacidade de armazenamento de um banco de baterias é feito levando em consideração a profundidade de descarga das baterias, frequentemente referida por DOD (*Depth of Discharge*), que representa o quanto de energia que deve ser descarregada das baterias para que a vida útil das mesmas não seja comprometida. Quanto menor for a profundidade de descarga maior será a vida útil das baterias.

A capacidade de armazenamento de um banco de baterias é calculada pela seguinte expressão:

$$C_{\text{banco baterias}} \geq \frac{\text{Consumo(Ah/dia)}}{\text{DOD}} \quad (4.14)$$

Para o dimensionamento do banco de baterias de retaguarda, será necessário determinar a energia que a carga precisará nos horários do dia em que a energia gerada não é suficiente para atendê-la. Essa energia corresponde a parte negativa do Gráfico 4.17, que representa a parcela da energia que ficou faltando para alimentar a carga nesses horários. O banco de baterias deverá então dispor de uma energia que seja no mínimo igual a essa energia negativa do Gráfico 4.17, cujo valor é de 728,70Wh. Uma vez que já foi considerado o rendimento do inversor no cálculo do balanço de energia, para o cálculo da capacidade do banco de baterias de retaguarda não será necessário considerar novamente o rendimento do inversor.

Considerando que serão utilizadas baterias estacionárias de 12V com profundidade de descarga de 80%, a capacidade de armazenamento do banco de baterias pode ser calculada por:

$$C_{\text{banco baterias retaguarda}} = \frac{\frac{728,70}{12}}{0,80} = 76\text{Ah} \quad (4.15)$$

Ou seja, o banco de baterias será capaz de armazenar uma energia de 911Wh. Considerando que cada bateria possuirá uma capacidade de 45Ah (para 20h de descarga), serão utilizadas duas baterias agrupadas em paralelo.

Para o dimensionamento do banco de baterias de reserva será necessário considerar a sua autonomia, que será determinada a partir do estudo da velocidade do vento do local.

No estudo da velocidade do vento, observou-se que durante o período avaliado houve apenas uma ocorrência de dois dias consecutivos sem vento satisfatório para a geração. Uma vez que essa situação ocorreu apenas uma vez, não será levada em consideração neste trabalho, pois a consideração dos dois dias irá aumentar os custos referentes às baterias, decorrentes do aumento da quantidade das mesmas. Então, será considerada uma autonomia de um dia para o banco de baterias de reserva. Caso venha a acontecer a situação de não

ocorrer vento durante dois dias consecutivos ou mais, o pescador deverá recorrer a outros meios para não atrapalhar a sua atividade, como por exemplo, comprar gelo para conservar a produção.

Como o banco de baterias de reserva deverá ser capaz de atender todo o consumo de energia do dia, então deverá dispor de uma energia que seja no mínimo igual à energia total que será consumida pela carga, cujo valor é de 2.735Wh. Considerando que serão utilizadas baterias estacionárias de 12V com profundidade de descarga de 90% e considerando o rendimento do inversor de 85%, a capacidade de armazenamento do banco de baterias de reserva é calculada por:

$$C_{\text{banco baterias reserva}} = \frac{2735}{\frac{12 \times 0,85}{0,90}} \times 1 \text{ dia de autonomia} \quad (4.16)$$

$$C_{\text{banco baterias reserva}} = 298\text{Ah} \quad (4.17)$$

Ou seja, o banco de baterias será capaz de armazenar uma energia de 3.575Wh. Considerando que cada bateria possuirá uma capacidade de 150 Ah (para 20h de descarga), serão utilizadas duas baterias agrupadas em paralelo.

4.7.3. Recarga do banco de baterias

O banco de baterias de retaguarda é sempre recarregado nos momentos em que há excedente de energia e finaliza a sua recarga ao atingir a sua capacidade de armazenamento. Somente após o banco ter atingido a sua capacidade de armazenamento é que o banco de baterias de reserva iniciará o seu processo de recarga.

Quando o sistema eólico não é mais capaz de atender a carga, devido a ausência de vento no local, o banco de baterias de retaguarda alimentará a carga até atingir seu limite de

descarga. Após esse momento o banco de baterias de reserva passa a atuar para atender a carga até a turbina voltar a atender a carga novamente ou até atingir o seu limite de descarga. Conforme já foi determinado no item anterior, ele é capaz de atender a carga durante um dia inteiro sem geração. A partir do momento em que a velocidade do vento voltar a aumentar, a turbina retomará a sua geração e passará a alimentar a carga e recarregar o banco de baterias de retaguarda.

Conforme mencionado no item 4.6, será necessário utilizar um controlador de carga para gerenciar e controlar o processo de carga e descarga das baterias. O mesmo deverá limitar a descarga das baterias de ambos os bancos até o valor de 20% (profundidade de descarga de 80%) da capacidade do banco de baterias de retaguarda e 10% (profundidade de descarga de 90%) da capacidade do banco de baterias de reserva, assegurando assim, uma longa vida útil das baterias.

Como o banco de baterias de retaguarda deve estar sempre sendo carregado nos momentos em que há excedente de geração, será feito um estudo para verificar se em um dia esse banco de baterias será capaz de repor a energia que perdeu. Visto que no balanço de energia o excedente de geração é muito maior do que a energia que ele precisa para ser carregado, em um dia o banco de baterias será capaz de recuperar o que foi perdido.

A Tabela 4.8 faz um estudo do processo de descarga e recarga do banco de baterias de retaguarda quando o sistema eólico está submetido ao perfil de vento adotado neste projeto. As duas últimas colunas da Tabela 4.8 mostram o processo de recarga e descarga do banco de baterias de retaguarda ao longo do dia. A penúltima coluna mostra o comportamento do banco de baterias de retaguarda ao iniciar o dia completamente carregado e a última coluna mostra o seu comportamento ao iniciar o dia descarregado, com apenas 20% da sua capacidade de armazenamento.

Hora do dia	V vento (m/s)	E gerada (Wh)	E carga (Wh)	E balanço (Wh)	Sistema eólico alimentando a carga (Wh)	Banco de baterias alimentando a carga (Wh)	Banco de baterias retaguarda carregado (Wh)	Banco de baterias retaguarda descarregado até 20% da sua capacidade (Wh)
0:00	4,22	39,32	4,41	34,91	4,41	0,00	1080,00	250,91
0:15	4,22	39,32	40,88	-1,56	39,32	1,56	1078,44	249,35
0:30	4,22	39,32	4,41	34,91	4,41	0,00	1080,00	284,25
0:45	4,22	39,32	4,41	34,91	4,41	0,00	1080,00	319,16
1:00	4,22	39,32	4,41	34,91	4,41	0,00	1080,00	354,07
1:15	4,22	39,32	4,41	34,91	4,41	0,00	1080,00	388,98
1:30	4,22	39,32	40,88	-1,56	39,32	1,56	1078,44	387,42
1:45	4,22	39,32	4,41	34,91	4,41	0,00	1080,00	422,32
2:00	4,22	39,32	4,41	34,91	4,41	0,00	1080,00	457,23
2:15	4,22	39,32	4,41	34,91	4,41	0,00	1080,00	492,14
2:30	4,22	39,32	4,41	34,91	4,41	0,00	1080,00	527,05
2:45	4,22	39,32	40,88	-1,56	39,32	1,56	1078,44	525,49
3:00	4,03	34,25	4,41	29,84	4,41	0,00	1080,00	555,33
3:15	4,03	34,25	4,41	29,84	4,41	0,00	1080,00	585,17
3:30	4,03	34,25	4,41	29,84	4,41	0,00	1080,00	615,01
3:45	4,03	34,25	4,41	29,84	4,41	0,00	1080,00	644,86
4:00	4,03	34,25	40,88	-6,63	34,25	6,63	1073,37	638,23
4:15	4,03	34,25	4,41	29,84	4,41	0,00	1080,00	668,07
4:30	4,03	34,25	4,41	29,84	4,41	0,00	1080,00	697,91
4:45	4,03	34,25	4,41	29,84	4,41	0,00	1080,00	727,75
5:00	4,03	34,25	8,82	25,43	8,82	0,00	1080,00	753,18
5:15	4,03	34,25	8,82	25,43	8,82	0,00	1080,00	778,62
5:30	4,03	34,25	8,82	25,43	8,82	0,00	1080,00	804,05
5:45	4,03	34,25	8,82	25,43	8,82	0,00	1080,00	829,48
6:00	3,96	32,40	91,18	-58,78	32,40	58,78	1021,22	770,70
6:15	3,96	32,40	91,18	-58,78	32,40	58,78	962,45	711,92
6:30	3,96	32,40	54,71	-22,31	32,40	22,31	940,14	689,62

Hora do dia	V vento (m/s)	E gerada (Wh)	E carga (Wh)	E balanço (Wh)	Sistema eólico alimentando a carga (Wh)	Banco de baterias alimentando a carga (Wh)	Banco de baterias retaguarda carregado (Wh)	Banco de baterias retaguarda descarregado até 20% da sua capacidade (Wh)
6:45	3,96	32,40	54,71	-22,31	32,40	22,31	917,84	667,31
7:00	3,96	32,40	54,71	-22,31	32,40	22,31	895,53	645,01
7:15	3,96	32,40	54,71	-22,31	32,40	22,31	873,22	622,70
7:30	3,96	32,40	91,18	-58,78	32,40	58,78	814,45	563,92
7:45	3,96	32,40	54,71	-22,31	32,40	22,31	792,14	541,62
8:00	3,96	32,40	54,71	-22,31	32,40	22,31	769,84	519,31
8:15	3,96	32,40	54,71	-22,31	32,40	22,31	747,53	497,01
8:30	3,96	32,40	54,71	-22,31	32,40	22,31	725,22	474,70
8:45	3,96	32,40	91,18	-58,78	32,40	58,78	666,45	415,92
9:00	3,67	25,05	0,00	25,05	0,00	0,00	691,50	440,98
9:15	3,67	25,05	0,00	25,05	0,00	0,00	716,55	466,03
9:30	3,67	25,05	0,00	25,05	0,00	0,00	741,60	491,08
9:45	3,67	25,05	0,00	25,05	0,00	0,00	766,66	516,13
10:00	3,67	25,05	45,29	-20,24	25,05	20,24	746,41	495,89
10:15	3,67	25,05	8,82	16,23	8,82	0,00	762,64	512,12
10:30	3,67	25,05	8,82	16,23	8,82	0,00	778,87	528,35
10:45	3,67	25,05	8,82	16,23	8,82	0,00	795,10	544,57
11:00	3,67	25,05	8,82	16,23	8,82	0,00	811,33	560,80
11:15	3,67	25,05	8,82	16,23	8,82	0,00	827,56	577,03
11:30	3,67	25,05	8,82	16,23	8,82	0,00	843,78	593,26
11:45	3,67	25,05	8,82	16,23	8,82	0,00	860,01	609,49
12:00	3,46	20,42	36,47	-16,05	20,42	16,05	843,96	593,43
12:15	3,46	20,42	36,47	-16,05	20,42	16,05	827,90	577,38
12:30	3,46	20,42	36,47	-16,05	20,42	16,05	811,85	561,32
12:45	3,46	20,42	36,47	-16,05	20,42	16,05	795,79	545,27
13:00	3,46	20,42	36,47	-16,05	20,42	16,05	779,74	529,22
13:15	3,46	20,42	36,47	-16,05	20,42	16,05	763,68	513,16
13:30	3,46	20,42	36,47	-16,05	20,42	16,05	747,63	497,11

Hora do dia	V vento (m/s)	E gerada (Wh)	E carga (Wh)	E balanço (Wh)	Sistema eólico alimentando a carga (Wh)	Banco de baterias alimentando a carga (Wh)	Banco de baterias retaguarda carregado (Wh)	Banco de baterias retaguarda descarregado até 20% da sua capacidade (Wh)
13:45	3,46	20,42	36,47	-16,05	20,42	16,05	731,58	481,05
14:00	3,46	20,42	0,00	20,42	0,00	0,00	751,99	501,47
14:15	3,46	20,42	0,00	20,42	0,00	0,00	772,41	521,88
14:30	3,46	20,42	0,00	20,42	0,00	0,00	792,82	542,30
14:45	3,46	20,42	0,00	20,42	0,00	0,00	813,24	562,72
15:00	4,72	62,73	91,18	-28,45	62,73	28,45	784,79	534,27
15:15	4,72	62,73	91,18	-28,45	62,73	28,45	756,34	505,82
15:30	4,72	62,73	54,71	8,02	54,71	0,00	764,36	513,84
15:45	4,72	62,73	54,71	8,02	54,71	0,00	772,38	521,86
16:00	4,72	62,73	54,71	8,02	54,71	0,00	780,40	529,88
16:15	4,72	62,73	54,71	8,02	54,71	0,00	788,43	537,90
16:30	4,72	62,73	91,18	-28,45	62,73	28,45	759,98	509,45
16:45	4,72	62,73	54,71	8,02	54,71	0,00	768,00	517,47
17:00	4,72	62,73	54,71	8,02	54,71	0,00	776,02	525,49
17:15	4,72	62,73	54,71	8,02	54,71	0,00	784,04	533,52
17:30	4,72	62,73	54,71	8,02	54,71	0,00	792,06	541,54
17:45	4,72	62,73	91,18	-28,45	62,73	28,45	763,61	513,09
18:00	5,18	93,02	4,41	88,61	4,41	0,00	852,22	601,70
18:15	5,18	93,02	4,41	88,61	4,41	0,00	940,83	690,30
18:30	5,18	93,02	4,41	88,61	4,41	0,00	1029,44	778,91
18:45	5,18	93,02	4,41	88,61	4,41	0,00	1080,00	867,52
19:00	5,18	93,02	95,59	-2,57	93,02	2,57	1077,43	864,95
19:15	5,18	93,02	95,59	-2,57	93,02	2,57	1074,86	862,38
19:30	5,18	93,02	59,12	33,90	59,12	0,00	1080,00	896,29
19:45	5,18	93,02	59,12	33,90	59,12	0,00	1080,00	930,19
20:00	5,18	93,02	59,12	33,90	59,12	0,00	1080,00	964,09
20:15	5,18	93,02	59,12	33,90	59,12	0,00	1080,00	997,99

Hora do dia	V _{vento} (m/s)	E _{gerada} (Wh)	E _{carga} (Wh)	E _{balanço} (Wh)	Sistema eólico alimentando a carga (Wh)	Banco de baterias alimentando a carga (Wh)	Banco de baterias retaguarda carregado (Wh)	Banco de baterias retaguarda descarregado até 20% da sua capacidade (Wh)
20:30	5,18	93,02	95,59	-2,57	93,02	2,57	1077,43	995,42
20:45	5,18	93,02	59,12	33,90	59,12	0,00	1080,00	1029,33
21:00	4,71	61,94	59,12	2,82	59,12	0,00	1080,00	1032,15
21:15	4,71	61,94	59,12	2,82	59,12	0,00	1080,00	1034,97
21:30	4,71	61,94	59,12	2,82	59,12	0,00	1080,00	1037,79
21:45	4,71	61,94	95,59	-33,65	61,94	33,65	1046,35	1004,14
22:00	4,71	61,94	4,41	57,53	4,41	0,00	1080,00	1061,66
22:15	4,71	61,94	4,41	57,53	4,41	0,00	1080,00	1080,00
22:30	4,71	61,94	4,41	57,53	4,41	0,00	1080,00	1080,00
22:45	4,71	61,94	4,41	57,53	4,41	0,00	1080,00	1080,00
23:00	4,71	61,94	40,88	21,06	40,88	0,00	1080,00	1080,00
23:15	4,71	61,94	4,41	57,53	4,41	0,00	1080,00	1080,00
23:30	4,71	61,94	4,41	57,53	4,41	0,00	1080,00	1080,00
23:45	4,71	61,94	4,41	57,53	4,41	0,00	1080,00	1080,00

Tabela 4.8 – Comportamento do banco de baterias de retaguarda ao longo do dia

Pelo estudo realizado na Tabela 4.8 verificou-se que para o perfil de vento adotado, se o banco de baterias de retaguarda iniciar o dia completamente carregado, ele é capaz de fornecer a energia pedida pela carga e recuperar toda a energia perdida durante o dia até o final do dia. Se ele iniciar o dia apenas com 20% da sua capacidade, é capaz de recarregar o suficiente para atender as cargas do dia e recarregar por completo até o final do dia. É importante ressaltar que 20% da capacidade do banco de baterias se refere ao limite mínimo de descarga que ele irá alcançar, para não comprometer a vida útil das baterias.

O Gráfico 4.18 faz uma representação do comportamento do banco de baterias de retaguarda ao longo do dia para o perfil de vento adotado, de acordo com o que foi explicado na Tabela 4.8.

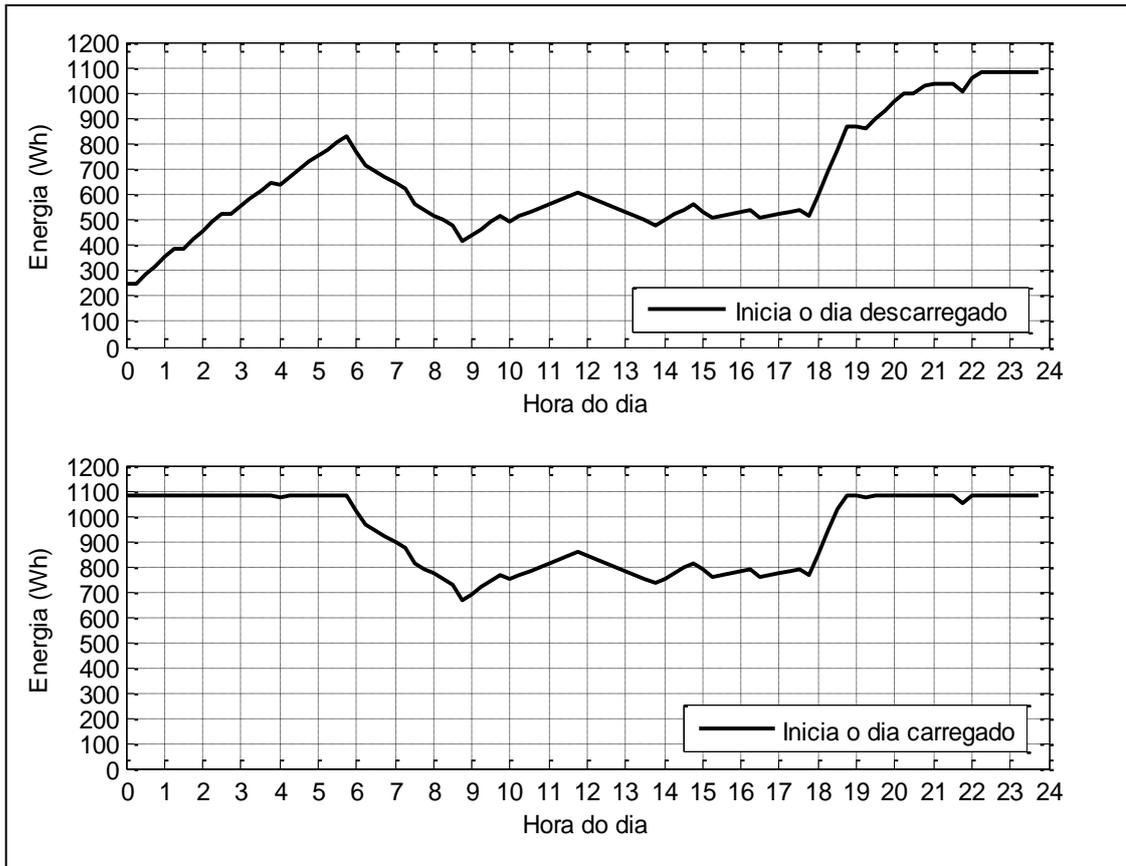


Gráfico 4.18 – Comportamento do banco de baterias de retaguarda ao longo do dia para o perfil de vento adotado

A mesma análise deverá ser feita para o banco de baterias de reserva. Após atender a carga durante um dia inteiro sem geração, o banco de baterias deverá ser recarregado durante os demais dias em que ocorre vento satisfatório. A energia que o banco deve ser capaz de recuperar a cada dia é a energia que sobra da geração após o banco de baterias de retaguarda ter sido carregado por completo. A partir do estudo que foi feito do comportamento dos bancos de baterias ao longo do dia, para o perfil de vento em estudo, a energia de sobra no final do primeiro dia após o dia sem geração foi calculada fazendo o somatório de todas as energias de sobra em cada horário do dia. O resultado do somatório foi uma energia de sobra de 347,87Wh. Considerando que nos próximos dias até o carregamento das baterias, o perfil de vento é repetido, a energia de sobra por dia para a recarga do banco de baterias de reserva é de 1211,87Wh/dia.

No primeiro dia após o dia inteiro sem geração o banco de baterias é capaz de recarregar apenas uma parcela da sua capacidade. Para encontrar o número de dias que são necessários para recarregar as baterias após o 1º dia de recarga, considerando que nos próximos dias o perfil de vento é repetido, deve-se fazer a divisão do que faltou de energia para completar a carga do banco de baterias após o 1º dia de recarga pela energia de sobra de cada dia após o 1º dia de recarga. A soma do 1º dia de recarga com o resultado da divisão resulta no número de dias que serão necessários para carregar o banco de baterias de reserva por completo.

$$\text{Nº de dias} = 1 \text{ dia} + \frac{E_{\text{bateria de reserva}} - E_{\text{sobra 1º dia}}}{E_{\text{sobra/dia}}} \quad (4.18)$$

$$\text{Nº de dias} = 1 + \frac{3600 - 347,87}{1211,87} \cong 4 \text{ dias} \quad (4.19)$$

Então, o banco de baterias levará quatro dias para recuperar a energia perdida em um dia de autonomia, para o perfil de vento adotado. Dependendo do perfil da velocidade do vento na semana, o banco de baterias poderá levar cerca de alguns dias ou até semanas para recuperar a energia que foi perdida em um dia de autonomia.

A Tabela 4.9 mostra com mais detalhes o processo de recarga do banco de baterias de reserva nos dias após o dia em que o mesmo foi descarregado até o seu limite de descarga. No estudo da recarga do banco de baterias de reserva foi considerado que o perfil de vento adotado se repete nos próximos dias até o banco ser carregado por completo.

Hora do dia	Banco de baterias retaguarda após ser descarregado	Banco de baterias retaguarda 2º dia após ser descarregado	Banco de baterias retaguarda 3º dia após ser descarregado	Banco de baterias retaguarda 4º dia após ser descarregado	1º dia de recarga do banco de baterias reserva	2º dia de recarga do banco de baterias reserva	3º dia de recarga do banco de baterias reserva	4º dia de recarga do banco de baterias reserva
0:00	250,91	1080,00	1080,00	1080,00	360,00	742,78	1954,65	3166,525
0:15	249,35	1078,44	1078,44	1078,44	360,00	742,78	1954,65	3166,525
0:30	284,25	1080,00	1080,00	1080,00	360,00	776,13	1988,00	3199,871
0:45	319,16	1080,00	1080,00	1080,00	360,00	811,03	2022,91	3234,779
1:00	354,07	1080,00	1080,00	1080,00	360,00	845,94	2057,81	3269,687
1:15	388,98	1080,00	1080,00	1080,00	360,00	880,85	2092,72	3304,595
1:30	387,42	1078,44	1078,44	1078,44	360,00	880,85	2092,72	3304,595
1:45	422,32	1080,00	1080,00	1080,00	360,00	914,20	2126,07	3337,941
2:00	457,23	1080,00	1080,00	1080,00	360,00	949,11	2160,98	3372,849
2:15	492,14	1080,00	1080,00	1080,00	360,00	984,01	2195,89	3407,758
2:30	527,05	1080,00	1080,00	1080,00	360,00	1018,92	2230,79	3442,666
2:45	525,49	1078,44	1078,44	1078,44	360,00	1018,92	2230,79	3442,666
3:00	555,33	1080,00	1080,00	1080,00	360,00	1047,20	2259,07	3470,946
3:15	585,17	1080,00	1080,00	1080,00	360,00	1077,04	2288,92	3500,788
3:30	615,01	1080,00	1080,00	1080,00	360,00	1106,89	2318,76	3530,63
3:45	644,86	1080,00	1080,00	1080,00	360,00	1136,73	2348,60	3560,472
4:00	638,23	1073,37	1073,37	1073,37	360,00	1136,73	2348,60	3560,472
4:15	668,07	1080,00	1080,00	1080,00	360,00	1159,94	2371,81	3583,686
4:30	697,91	1080,00	1080,00	1080,00	360,00	1189,78	2401,66	3600
4:45	727,75	1080,00	1080,00	1080,00	360,00	1219,63	2431,50	3600
5:00	753,18	1080,00	1080,00	1080,00	360,00	1245,06	2456,93	3600
5:15	778,62	1080,00	1080,00	1080,00	360,00	1270,49	2482,36	3600
5:30	804,05	1080,00	1080,00	1080,00	360,00	1295,92	2507,79	3600
5:45	829,48	1080,00	1080,00	1080,00	360,00	1321,35	2533,22	3600
6:00	770,70	1021,22	1021,22	1021,22	360,00	1321,35	2533,22	3600
6:15	711,92	962,45	962,45	962,45	360,00	1321,35	2533,22	3600
6:30	689,62	940,14	940,14	940,14	360,00	1321,35	2533,22	3600
6:45	667,31	917,84	917,84	917,84	360,00	1321,35	2533,22	3600
7:00	645,01	895,53	895,53	895,53	360,00	1321,35	2533,22	3600
7:15	622,70	873,22	873,22	873,22	360,00	1321,35	2533,22	3600
7:30	563,92	814,45	814,45	814,45	360,00	1321,35	2533,22	3600
7:45	541,62	792,14	792,14	792,14	360,00	1321,35	2533,22	3600
8:00	519,31	769,84	769,84	769,84	360,00	1321,35	2533,22	3600
8:15	497,01	747,53	747,53	747,53	360,00	1321,35	2533,22	3600
8:30	474,70	725,22	725,22	725,22	360,00	1321,35	2533,22	3600
8:45	415,92	666,45	666,45	666,45	360,00	1321,35	2533,22	3600

Hora do dia	Banco de baterias retaguarda após ser descarregado	Banco de baterias retaguarda 2º dia após ser descarregado	Banco de baterias retaguarda 3º dia após ser descarregado	Banco de baterias retaguarda 4º dia após ser descarregado	1º dia de recarga do banco de baterias reserva	2º dia de recarga do banco de baterias reserva	3º dia de recarga do banco de baterias reserva	4º dia de recarga do banco de baterias reserva
9:00	440,98	691,50	691,50	691,50	360,00	1321,35	2533,22	3600
9:15	466,03	716,55	716,55	716,55	360,00	1321,35	2533,22	3600
9:30	491,08	741,60	741,60	741,60	360,00	1321,35	2533,22	3600
9:45	516,13	766,66	766,66	766,66	360,00	1321,35	2533,22	3600
10:00	495,89	746,41	746,41	746,41	360,00	1321,35	2533,22	3600
10:15	512,12	762,64	762,64	762,64	360,00	1321,35	2533,22	3600
10:30	528,35	778,87	778,87	778,87	360,00	1321,35	2533,22	3600
10:45	544,57	795,10	795,10	795,10	360,00	1321,35	2533,22	3600
11:00	560,80	811,33	811,33	811,33	360,00	1321,35	2533,22	3600
11:15	577,03	827,56	827,56	827,56	360,00	1321,35	2533,22	3600
11:30	593,26	843,78	843,78	843,78	360,00	1321,35	2533,22	3600
11:45	609,49	860,01	860,01	860,01	360,00	1321,35	2533,22	3600
12:00	593,43	843,96	843,96	843,96	360,00	1321,35	2533,22	3600
12:15	577,38	827,90	827,90	827,90	360,00	1321,35	2533,22	3600
12:30	561,32	811,85	811,85	811,85	360,00	1321,35	2533,22	3600
12:45	545,27	795,79	795,79	795,79	360,00	1321,35	2533,22	3600
13:00	529,22	779,74	779,74	779,74	360,00	1321,35	2533,22	3600
13:15	513,16	763,68	763,68	763,68	360,00	1321,35	2533,22	3600
13:30	497,11	747,63	747,63	747,63	360,00	1321,35	2533,22	3600
13:45	481,05	731,58	731,58	731,58	360,00	1321,35	2533,22	3600
14:00	501,47	751,99	751,99	751,99	360,00	1321,35	2533,22	3600
14:15	521,88	772,41	772,41	772,41	360,00	1321,35	2533,22	3600
14:30	542,30	792,82	792,82	792,82	360,00	1321,35	2533,22	3600
14:45	562,72	813,24	813,24	813,24	360,00	1321,35	2533,22	3600
15:00	534,27	784,79	784,79	784,79	360,00	1321,35	2533,22	3600
15:15	505,82	756,34	756,34	756,34	360,00	1321,35	2533,22	3600
15:30	513,84	764,36	764,36	764,36	360,00	1321,35	2533,22	3600
15:45	521,86	772,38	772,38	772,38	360,00	1321,35	2533,22	3600
16:00	529,88	780,40	780,40	780,40	360,00	1321,35	2533,22	3600
16:15	537,90	788,43	788,43	788,43	360,00	1321,35	2533,22	3600
16:30	509,45	759,98	759,98	759,98	360,00	1321,35	2533,22	3600
16:45	517,47	768,00	768,00	768,00	360,00	1321,35	2533,22	3600
17:00	525,49	776,02	776,02	776,02	360,00	1321,35	2533,22	3600
17:15	533,52	784,04	784,04	784,04	360,00	1321,35	2533,22	3600
17:30	541,54	792,06	792,06	792,06	360,00	1321,35	2533,22	3600
17:45	513,09	763,61	763,61	763,61	360,00	1321,35	2533,22	3600

Hora do dia	Banco de baterias retaguarda após ser descarregado	Banco de baterias retaguarda 2º dia após ser descarregado	Banco de baterias retaguarda 3º dia após ser descarregado	Banco de baterias retaguarda 4º dia após ser descarregado	1º dia de recarga do banco de baterias reserva	2º dia de recarga do banco de baterias reserva	3º dia de recarga do banco de baterias reserva	4º dia de recarga do banco de baterias reserva
18:00	601,70	852,22	852,22	852,22	360,00	1321,35	2533,22	3600
18:15	690,30	940,83	940,83	940,83	360,00	1321,35	2533,22	3600
18:30	778,91	1029,44	1029,44	1029,44	360,00	1321,35	2533,22	3600
18:45	867,52	1080,00	1080,00	1080,00	360,00	1359,39	2571,26	3600
19:00	864,95	1077,43	1077,43	1077,43	360,00	1359,39	2571,26	3600
19:15	862,38	1074,86	1074,86	1074,86	360,00	1359,39	2571,26	3600
19:30	896,29	1080,00	1080,00	1080,00	360,00	1388,16	2600,03	3600
19:45	930,19	1080,00	1080,00	1080,00	360,00	1422,06	2633,93	3600
20:00	964,09	1080,00	1080,00	1080,00	360,00	1455,96	2667,83	3600
20:15	997,99	1080,00	1080,00	1080,00	360,00	1489,86	2701,74	3600
20:30	995,42	1077,43	1077,43	1077,43	360,00	1489,86	2701,74	3600
20:45	1029,33	1080,00	1080,00	1080,00	360,00	1521,20	2733,07	3600
21:00	1032,15	1080,00	1080,00	1080,00	360,00	1524,02	2735,89	3600
21:15	1034,97	1080,00	1080,00	1080,00	360,00	1526,84	2738,71	3600
21:30	1037,79	1080,00	1080,00	1080,00	360,00	1529,66	2741,53	3600
21:45	1004,14	1046,35	1046,35	1046,35	360,00	1529,66	2741,53	3600
22:00	1061,66	1080,00	1080,00	1080,00	360,00	1553,53	2765,41	3600
22:15	1080,00	1080,00	1080,00	1080,00	399,19	1611,06	2822,93	3600
22:30	1080,00	1080,00	1080,00	1080,00	456,71	1668,59	2880,46	3600
22:45	1080,00	1080,00	1080,00	1080,00	514,24	1726,11	2937,98	3600
23:00	1080,00	1080,00	1080,00	1080,00	535,29	1747,17	2959,04	3600
23:15	1080,00	1080,00	1080,00	1080,00	592,82	1804,69	3016,56	3600
23:30	1080,00	1080,00	1080,00	1080,00	650,35	1862,22	3074,09	3600
23:45	1080,00	1080,00	1080,00	1080,00	707,87	1919,74	3131,62	3600

Tabela 4.9 – Recarga do banco de baterias de reserva

O Gráfico 4.19 faz uma representação do processo de recarga por dia do banco de baterias de reserva, que foi explicado na Tabela 4.9, após o dia em que não houve geração e ambos os bancos de baterias ficaram descarregados até os seus limites de descarga.

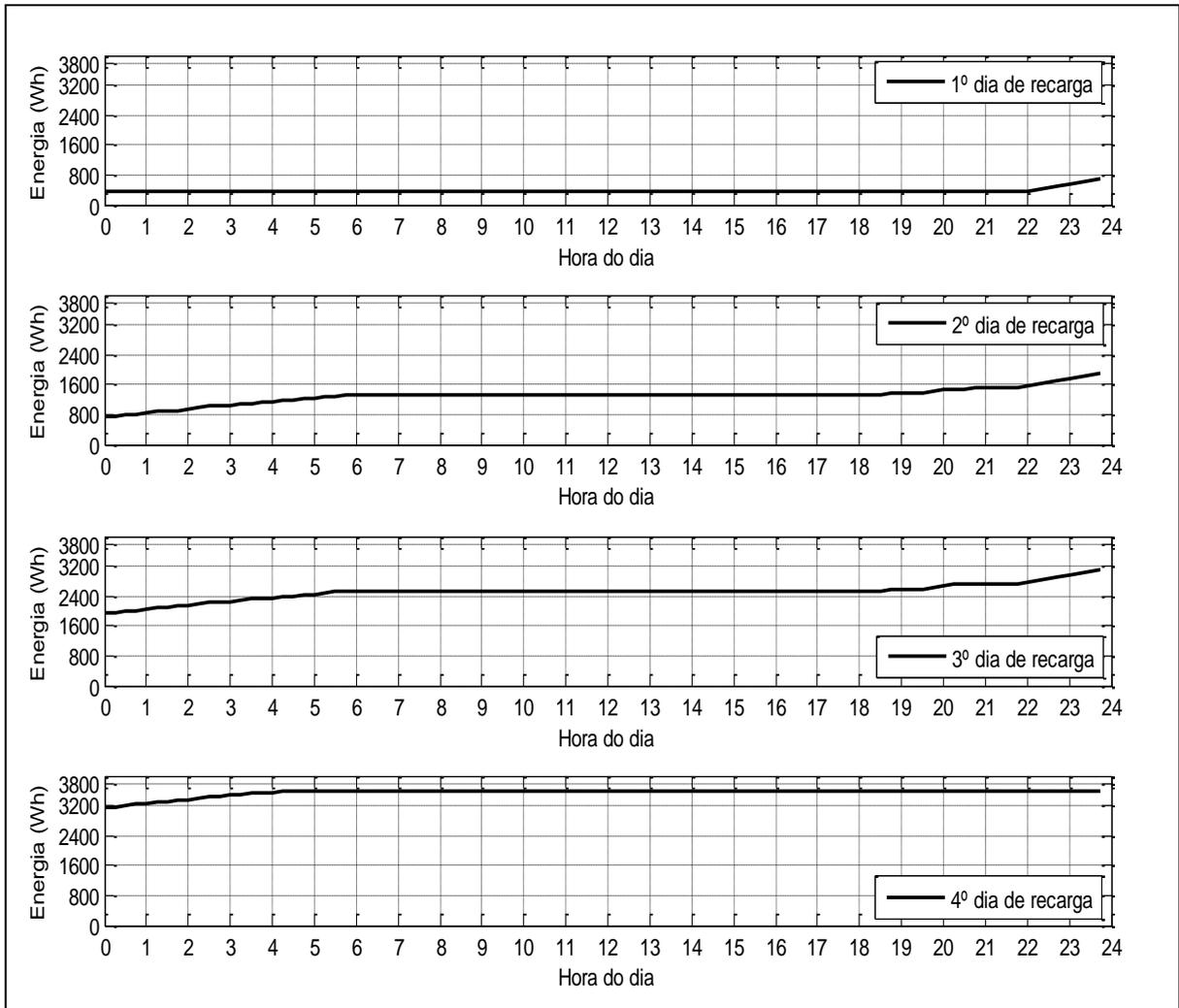


Gráfico 4.19 – Recarga do banco de baterias de reserva

5. Conclusões

Neste trabalho foram abordados conceitos fundamentais para os estudos referentes à energia eólica. Inúmeros dispositivos de captação da energia dos ventos e novas tecnologias de geração de energia eólica foram apresentados. Foi mostrada também a simplicidade da construção e da possibilidade de utilização de turbinas artesanais para a geração de energia elétrica, em especial as turbinas de configuração vertical.

Foram estudados dois tipos de turbinas de configuração vertical, a turbina Giromill e a turbina Lenz. A turbina Giromill foi tomada como referência para o dimensionamento da turbina que seria utilizada para atender a carga elétrica da colônia de pesca de Zacarias. A princípio a turbina Giromill foi escolhida para atender a carga da cooperativa, porém diante das dificuldades encontradas na parte construtiva da turbina, a turbina Lenz foi adotada, uma vez que era requerido um dispositivo de construção simples, de baixo custo e que pudesse ser construído de forma artesanal, para que os próprios pescadores fossem capazes de repará-lo quando danificado.

O trabalho apresentou um dispositivo de geração de energia eólica diferente dos dispositivos eólicos comumente encontrados em operação: uma turbina de configuração vertical, eficiente e de baixo custo, apropriada para locais em que é difícil a utilização das turbinas convencionais. A turbina Lenz dimensionada no trabalho se mostrou capaz de gerar a potência requerida pela carga máxima do sistema, de 325W, porém para velocidades do vento em torno de 8 m/s.

Os estudos do perfil de vento do local da instalação mostraram que o perfil de vento do local é caracterizado por velocidades entre 3 a 6 m/s. Diante desse perfil do vento, a grande dificuldade encontrada no trabalho foi compatibilizar o porte da turbina com o perfil de vento do local da instalação e com o atendimento da carga do sistema. Como o principal objetivo do trabalho era dimensionar um dispositivo de geração eólica artesanal e com dimensões reduzidas, a solução encontrada foi a utilização de oito turbinas em conjunto para atender a carga total do sistema.

Uma metodologia própria foi desenvolvida para o cálculo do ponto de operação nominal da turbina eólica. Foram levados em consideração conceitos de probabilidade de ocorrência para a determinação do ponto nominal de operação da turbina. Essa metodologia se mostrou

bastante consistente, uma vez que foi determinado um ponto no qual a turbina teria maior chance de operar em serviço contínuo e com produção significativa de energia, eliminando desta forma, uma possível determinação de um ponto de operação nominal com valor maior, o qual a turbina dificilmente alcançaria diante do perfil de vento do local. O gerador elétrico foi escolhido com base no ponto de operação nominal da turbina. Escolheu-se um gerador de 53W de potência nominal, valor superior e próximo ao valor obtido para o ponto nominal de operação da turbina e acima da carga máxima de 41W exigida para cada gerador.

O trabalho também apresentou um estudo do funcionamento do sistema de geração de energia e do sistema de armazenamento de energia através de baterias, este dimensionado de forma a atender à demanda de energia da carga nos horários em que o sistema eólico não é capaz de supri-la. O excedente de energia obtido no balanço de energia entre geração e consumo para o perfil de vento adotado, baseado na média horária da velocidade do vento do período em estudo, mostrou-se bastante propício para a recarga do banco de baterias ao longo do dia.

Alguns itens deixaram de ser estudados neste trabalho e foram deixados para serem estudados futuramente em trabalhos que poderão dar continuidade a este, tais como:

- Estudo dos sistemas de freio do protótipo da turbina Lenz;
- Estudo do sistema de controle do ponto de operação da turbina na curva de potência mecânica da mesma;
- Estudo do sistema de controle do conjunto de turbinas;
- Teste do protótipo da turbina Lenz;
- Comparação dos resultados obtidos experimentalmente com os calculados teoricamente.

Foram analisados vários modelos, sendo selecionada e estudada a utilização da turbina Lenz para atender à necessidade energética da comunidade pesqueira de Zacarias. O estudo desembocou no desenvolvimento de um projeto completo de um sistema de geração com a referida turbina. O projeto elaborado foi simulado e mostrou satisfatória viabilidade de operação e de execução. Um protótipo da turbina Lenz foi montado e o seu processo de montagem está explicado no Anexo deste trabalho. Alguns itens do sistema, tais como a caixa de multiplicação de velocidades, o gerador elétrico, os freios e o sistema de controle de carga, tensão e armazenamento de energia deixaram de ser conectados, porém foram todos especificados e sua aquisição e montagem não foi colocada em prática pela falta de recursos

financeiros. É certo que tais itens são dispositivos de uso convencional, não representando incógnitas a serem desveladas. Todos foram incluídos nas simulações indicando ser o sistema gerador projetado uma ótima solução.

Os estudos realizados ainda se mostraram contributivos de metodologias próprias para a determinação de condições de operação e de métodos de análise operacionais a serem mais bem investigadas e avaliadas pelo meio acadêmico, para a sua possível generalização.

Espera-se que este projeto contribua com o desenvolvimento de novos dispositivos de geração de energia elétrica através da força dos ventos. Conforme foi apresentado neste trabalho, existem inúmeras variedades de dispositivos eólicos que podem ser utilizados para a geração de energia elétrica. A existência de tais variedades pode contornar os obstáculos referentes aos custos e a complexidade da construção dos dispositivos de geração de energia eólica.

6. Bibliografia

- [1] TRAJANO, Rafael Castro; BARROS, Vítor Castro de Albuquerque. “*Estudo Preliminar de Implantação de Parque Eólico*”. Trabalho de conclusão de curso. Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, Dezembro de 2009.
- [2] GWEC, GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. “*Global Wind Report*”, 2011.
- [3] “Potencial eólico do país supera o hidrelétrico”. *O Globo*, RJ, 24 jul. 2011. Disponível em: http://www.epe.gov.br/imprensa/Clipping/20110724_a.pdf
- [4] CRESESB, CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO. “*Energia Eólica Princípios e Tecnologia*”. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_eolica_2008_e-book.pdf
- [5] CARVALHO, Paulo. “*Geração Eólica*”. Imprensa Universitária, 2003. 146p.
- [6] MARQUES, F. C. P; SANTOS, F. N; VALENTE, I. B; JESUS, R. C; ANDRADE, V. H. M.. *Energia Eólica: Aerogerador de Eixo Horizontal*. Disponível em: <http://www.evolucaoenergiaeolica.wordpress.com>
- [7] DOS REIS, Lineu Bélico. “*Geração de Energia Elétrica*”. 2ª Edição. Barueri, SP: Manole, 2011.
- [8] GWEC, GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. “*Global Wind Report*”, 2010.
- [9] <http://www.magenn.com>
- [10] DARRIEUS wind turbine. In: Wikipedia the free encyclopedia. Disponível em: http://en.wikipedia.org/wiki/Darrieus_wind_turbine
- [11] <http://www.reuk.co.uk/Giromill-Darrieus-Wind-Turbines.htm>
- [12] SAVONIUS wind turbine. In: Wikipedia the free encyclopedia. Disponível em: http://en.wikipedia.org/wiki/Savonius_wind_turbine
- [13] LENZ, Edwin. *Lenz2 Turbine*. Disponível em: http://www.windstuffnow.com/main/lenz2_turbine.htm

- [14] LENZ, Edwin. *VAWT - "Yet another VAWT...The Lenz Turbine"*. Disponível em: <http://www.windstuffnow.com/main/vawt.htm>
- [15] <http://www.windenergy.com>
- [16] <http://www.superwind.com/swe/index.htm>
- [17] SKYWING WIND TURBINE. *VAWT-300W Wind Turbine*. Disponível em: <http://www.solar-airconditioner.com/wp-content/uploads/2011/10/300W-Vertical-Axis-Wind-Turbine.pdf>
- [18] WINDSIDE. *WS-0,15 Range*. Disponível em: http://www.windside.com/products/ws-0_15
- [19] <http://www.gogreensolar.com/products/wepower-falcon-600w-off-grid-vertical-axis-wind-turbine>
- [20] WEPOWER. *Falcon 600W Vertical Axis Wind Turbine*. Disponível em: <http://www.wepower.us/products/falcon/falcon-600w.htm>
- [21] RIBEIRO, Felipe. *"Estudo da Aplicação de Transmissão Continuamente Variável (CVT) em Geradores Eólicos de Médio Porte"*. 80fls. Dissertação de mestrado. Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas, Universidade Federal do ABC, Santo André, 2010.
- [22] DÍEZ, Pedro Fernandez. *"Energía Eólica"*. 135p. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética, Universidad de Cantabria, 2000.
- [23] CASTRO, Rui M. G.. *"Introdução à Energia Eólica: Energias Renováveis e Produção Descentralizada"*. Edição 3.1. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 2008.
- [24] FUNDAÇÃO PROZEE; OGX. *Maricá Pesca: A Pesca no Município de Maricá/RJ*. Disponível em: http://issuu.com/scintilla.lima/docs/ogx_livro_pesca
- [25] <http://www.celpe.com.br>
- [26] www.light.com.br
- [27] <http://www.everest.ind.br/maquinasdegelo>

- [28] <http://loja.consul.com.br>
- [29] <http://www.ctturbine.com>
- [30] <http://enersud.com.br/>
- [31] <http://www.bjerga.fi>
- [32] CASTILLO, Javier. “*Small-scale Vertical Axis Wind Turbine Design*”. 54p. Bachelor’s Thesis (Degree Programme in Aeronautical Engineering). Tampere University of Applied Sciences, December 2011.
- [33] TEIXEIRA, Mauri M.; RUAS, Renato A. A.. “*Mecanismos de Transmissão de Potência e Lubrificantes*”. Departamento de Engenharia Agrícola, Área de Mecanização Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Novembro de 2006.
- [34] http://www.fc-solar.com/?page_id=1554
- [35] <http://www.solenerg.com.br/produtos-inversores-de-corrente.html>
- [36] <http://www.bayatenergy.co.uk>
- [37] <http://www.solar-airconditioner.com/wp-content/uploads/2011/10/300W-Vertical-Axis-Wind-Turbine.pdf>
- [38] http://www.windgreenergy.com/product_info.asp?pid=10
- [39] <http://www.windturbinestar.com/300w-vertical-wind-turbine.html>
- [40] CARMO, Diogo Manuel F. G. M.. “*Projeto de uma Turbina Eólica de Eixo Vertical para Aplicação em Meio Urbano*”. Dissertação de mestrado (Grau de Mestre em Engenharia Mecânica). Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Julho de 2012.
- [41] CATAPULT DESIGN. “*Wind Turbine Test Report*”. San Francisco, December 2010.
- [42] SÁ, Antônio Leite; LOPES, José Dermeval Saraiva. “*Energia Eólica para Geração de Eletricidade e Bombeamento de Água*”. Viçosa, CPT, 2001. 96p.

- [43] AGARD, ADVISORY GROUP FOR AEROSPACE RESEARCH & DEVELOPMENT. “*Fluid Dynamic Aspects of Wind Energy Conversion: AGARDograph N° 243*”. AGARD, July 1979.
- [44] AMBROSIO, Marco D’; MEDAGLIA, Marco. “*Vertical Axis Wind Turbine: History, Technology and Applications*”. Master thesis in Energy Engineering. Halmstad University, May 2010.
- [45] VERTICAL Axis Wind Turbine. In: Wikipedia the free encyclopedia. Disponível em: http://en.wikipedia.org/wiki/Vertical_axis_wind_turbine
- [46] <http://www.neosolar.com.br/bateria-estacionaria-freedom-df2500.html>
- [47] <http://pt.scribd.com/doc/54407558/banco-baterias-2>
- [48] <http://pt.windfinder.com/forecast/marica>
- [49] SILVA, Guilherme B. O.. “*Desenvolvimento de uma turbina eólica de eixo vertical*”. Dissertação de mestrado (Grau de mestre em Engenharia Aeroespacial). Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Julho de 2011.
- [50] <http://minhacasasolar.lojavirtualfc.com.br>
- [51] ENERGIA Eólica. In: Wikipédia A enciclopédia livre. Disponível em: http://pt.wikipedia.org/wiki/Energia_eólica
- [52] <http://www.allsmallwindturbines.com/>
- [53] “Wind Turbine Market 2008: Types, Technical Characteristics and prices”. Erneuerbare Energien, Special Report 45852, 15 Jahrgang.

ANEXO

Montagem da Turbina Lenz

Neste anexo será explicado o processo de montagem da turbina Lenz que foi dimensionada no capítulo anterior. Uma vez que um dos objetivos do projeto é estudar a possibilidade de utilização de uma turbina artesanal de pequeno porte para atender a atividade pesqueira de algumas comunidades de pescadores da cidade de Maricá, foi construído um protótipo da turbina Lenz para que seja possível conhecer melhor o seu comportamento e verificar a possibilidade da sua utilização.



Figura A.1 - Protótipo da turbina Lenz

A escolha dos materiais foi baseada em alguns critérios como baixo peso, baixo custo e disponibilidade no mercado. Para a construção foram realizadas algumas pesquisas referentes

à parte de montagem, materiais e acessórios que poderiam ser utilizados. Dentre os materiais e acessórios, estão:

- Folha de PVC ou folha de alumínio para o acabamento da pá;
- Madeira pinus, madeira balsa ou alumínio para a construção da estrutura da pá;
- Flanges de aço ou madeira para o suporte das pás;
- Barras chatas ou cantoneiras para a montagem das hastes que sustentam as pás e para a construção da torre de sustentação da turbina;
- Mancais e rolamentos.

Pás

Para a fabricação das pás foi utilizada a folha de PVC com espessura de 1 mm e a madeira pinus para a construção da estrutura da pá. Na Figura 2 está ilustrado o formato da pá e as dimensões utilizadas para a construção da mesma. A geometria da pá foi baseada na turbina Lenz2 construída por Edwin Lenz.

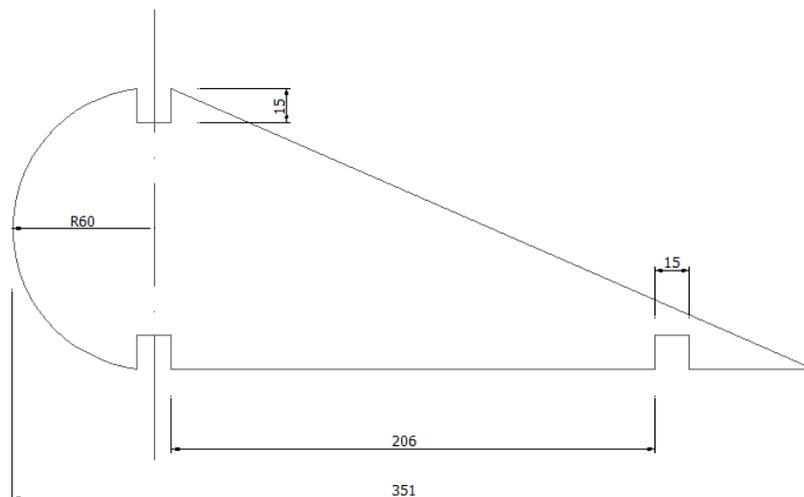


Figura A.2 – Geometria da pá (dimensões em milímetros)

Para a montagem da estrutura de cada pá foram utilizados quatro pedaços de madeira cortados com o formato de uma gota, como ilustrado na Figura 2, e três varas de madeira com dimensões 15×15×183 mm para serem encaixadas nas ranhuras.

Após a montagem da estrutura de cada pá, uma parte da estrutura foi coberta com folha de PVC e a outra parte foi mantida em aberto. Uma vantagem da pá não ser totalmente coberta é a economia que é conseguida durante a utilização da folha de PVC. Para a construção das cinco pás, apenas três folhas de PVC de 1×2 m foram suficientes.

Foi necessário utilizar cola fórmica, grampos e tachinhas para fixar a folha de PVC na estrutura. É importante que o PVC esteja bem preso na estrutura, para que a pá não se desmonte quando submetida a ventos fortes.

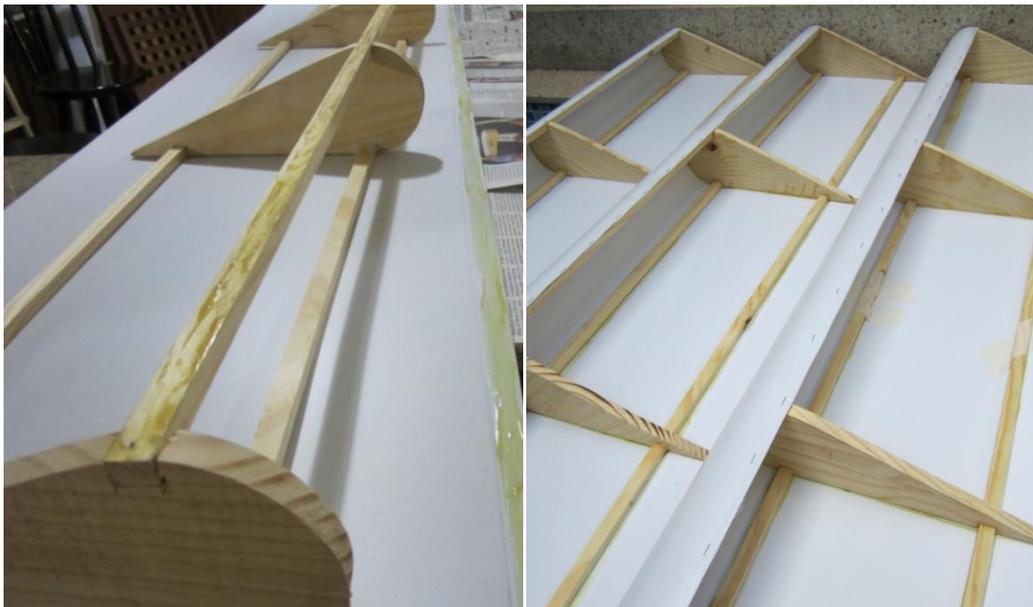


Figura A.3 – Construção das pás da turbina

Suporte de fixação das pás e eixo do rotor

Para a montagem do suporte de fixação das pás foram utilizadas dez cantoneiras de alumínio de 0,60 m de comprimento e 1/16 pol. de espessura e dois flanges de aço moldados

em forma de estrela. Em cada flange foram acopladas cinco cantoneiras e em cada cantoneira foi fixada uma pá.



Figura A.4 – Suporte de fixação das pás

Durante o acoplamento das pás ao suporte, as pás foram posicionadas de tal forma que fosse possível conseguir um bom rendimento aerodinâmico. Nas experiências realizadas por Edwin Lenz, as pás foram testadas para diferentes ângulos de passo e encontrou-se um bom rendimento para um ângulo igual a 9° . Com base na turbina Lenz construída por Edwin Lenz, as pás foram posicionadas a um ângulo de 9° em relação ao plano perpendicular a haste de sustentação.

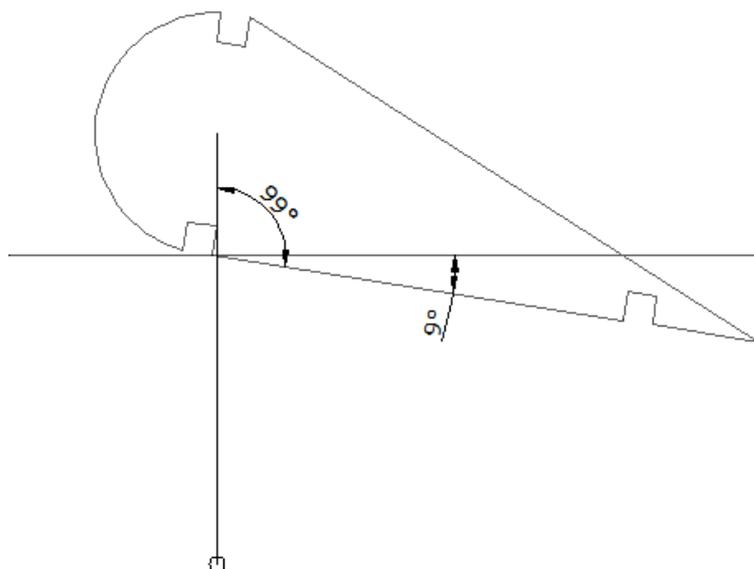


Figura A.5 – Ângulo de posicionamento das pás

O eixo do rotor foi construído com um tubo de ferro galvanizado de comprimento igual a 1,85 m. Ao eixo foram acoplados os dois suportes das pás e a torre de sustentação da turbina. O acoplamento entre o eixo e a torre de sustentação foi realizado com o auxílio de dois mancais ajustáveis com rolamentos axiais de 34 mm de diâmetro.

Entre os suportes das pás foram adicionadas barras chatas dispostas em diagonal, como mostrado na Figura 6, para assegurar a estabilidade da turbina.



Figura A.6 – Rotor da turbina

Torre

A torre foi construída com cantoneiras de 1 ½ pol. de largura e 3/16 pol. de espessura. A princípio foi construída uma torre com seção transversal retangular de altura igual a 1,20 m para a realização dos testes. Porém, quando a turbina for colocada em operação, será necessário elevá-la a uma altura de 8 a 10 m, para permitir a captação de ventos constantes pela turbina. Para esta altura será necessário construir uma torre treliçada e estaiada para garantir a segurança da turbina e do ambiente em que será instalada.



Figura A.7 – Torre de sustentação da turbina

Custo do protótipo

Como foram escolhidos materiais de custo baixo para a construção das pás, o custo da turbina, sem o gerador elétrico e sem a torre de sustentação foi de R\$330,00. Os itens que

foram utilizados na construção do rotor da turbina estão listados na Tabela 1 com os seus respectivos preços.

Material	Preço (R\$)
3 placas PVC 2m×1m×1mm	66,00
Madeira Pinus 2,96m	36,00
1 cano de ferro galvanizado	72,50
2 luvas de ferro galvanizado	10,10
2 mancais com rolamentos axiais de 34mm de diâmetro	80,00
2 arruelas lisas 1 3/8"	4,00
1 barra chata 3m×5/8"×1/8"	30,45
1 kg de barra de alumínio 1 3/8"	15,00
1,5 kg de cantoneira de alumínio 1 1/2"×1/16"	14,50
Total	328,55

Tabela A.1 – Custo dos materiais utilizados na construção do rotor da turbina

Os componentes que aumentam o custo da turbina eólica são a torre e o gerador elétrico. Uma torre de 4m de altura treliçada possui custo de cerca de R\$1.000,00, e por este motivo, para o teste da turbina foi construída uma torre de apenas 1,20m, cujo custo foi de R\$150,00. O gerador de imã permanente de 50W que será utilizado em conjunto com a turbina possui um custo de US\$175.

Os sistemas de freio ainda não foram acoplados ao protótipo, pois requerem estudos mais específicos que foram deixados para serem estudados nos próximos trabalhos que darão sequência a este.