



FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO ANALÍTICO DE PARÂMETROS RELATIVOS À
AEROGERAÇÃO DE ENERGIA

Por:

Gabriel Rodrigues de Freitas

Mariana da Silva Moreira

Mariana Ferreira Damasceno Gama

VOLTA REDONDA, 2017



FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO ANALÍTICO DE PARÂMETROS RELATIVOS À AEROGERAÇÃO DE ENERGIA

Monografia apresentada ao Curso de
Engenharia Mecânica do UniFOA como
requisito à obtenção do título de bacharel
em Engenharia Mecânica.

Alunos:

Gabriel Rodrigues de Freitas

Mariana da Silva Moreira

Mariana Ferreira Damasceno Gama

VOLTA REDONDA, 2017.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Alunos:

Gabriel Rodrigues de Freitas

Mariana da Silva Moreira

Mariana Ferreira Damasceno Gama

ESTUDO ANALÍTICO DE PARÂMETROS RELATIVOS À AEROGERAÇÃO DE ENERGIA

Orientador:

Prof. Alexandre Fernandes Habibe

Banca Examinadora:

Prof. Doutor Alexandre Fernandes Habibe

Prof. Doutor Alexandre Alvarenga Palmeira

Prof. Esp. Antônio de Pádua Sobreira Leal

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente a Deus por nos abençoar com saúde e sabedoria para superar todas as dificuldades e conseguir chegar onde estamos hoje, pois sem Ele nada disso seria possível.

Aos nossos pais, pelo amor, paciência, apoio e suporte que nos deram durante todo o período da faculdade, sempre nos incentivando, pois sem eles, jamais alcançaríamos resultados melhores.

Aos orientadores Alexandre Alvarenga Palmeira e Alexandre Fernandes Habibe por ter nos estimulado a sempre ir em busca de melhores resultados para ampliar os nossos conhecimentos, pois sem eles, o nosso caminho teria sido mais árduo.

Aos nossos queridos amigos por nos compreenderem, apoiarem e estarem sempre juntos durante esta caminhada, pois sem eles jamais conheceríamos o significado da palavra companheirismo.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1. Cenário	12
1.2. Objetivos Gerais	13
1.3. Objetivos Específicos	13
1.4. Relevância	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1. Alternativas Energéticas	15
2.2. Matriz Energética Brasileira	16
2.3. Energia Eólica – Contexto Histórico	20
2.3.1. Potencial Eólico Mundial	26
2.3.2. Potencial Eólico Brasileiro	28
2.3.3. Ventos	30
2.4. Aerogeradores	41
2.4.1. Aerogeradores de Eixo Vertical	45
2.4.2. Aerogeradores de Eixo Horizontal	47
2.4.3. Energia e Potência Extraídas dos Ventos	49
2.4.4. Densidade de Potência	51
2.4.5. Coeficiente de Potência (C_p)	52
2.4.6. Número de Pás	52
2.4.7. A Solidez de uma Turbina Eólica	53
2.4.8. Limite de Betz	55
2.4.9. Potência Real	56
2.4.10. Curva de Potência	57
2.4.11. Energia Produzida	58
2.4.12. Perfil Aerodinâmico das Pás	61
2.4.13. Direcionamento da Turbina (Yaw drive)	71
2.4.14. Materiais das Construção das Pás	72
2.4.15. Aplicações do sistema Eólico	76
3. METODOLOGIA	81
3.1. Fluxograma	81
4. DESENVOLVIMENTO	83
4.1. Altura da Torre	83
4.1.1. Velocidade em Função da Altura	84
4.1.2. Potência Real Extraída dos Ventos	85

4.2. Diâmetro do Rotor.....	88
4.3. Número de Pás	91
5. CONCLUSÃO	97
6. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	99
7. ANEXO.....	1034

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Perfil da matriz energética do Brasil no ano de 2017	18
Figura 2 - Ranking Mundial de capacidade acumulada de geração eólica em 2016.....	19
Figura 3 – Cata-vento Bruch	20
Figura 4 – Cata-vento Smith	21
Figura 5 – Cata-vento Gedser.....	22
Figura 6 – Cata-vento Hutter.....	22
Figura 7 - Turbina Darrieus.....	23
Figura 8 - Turbina Savonius.....	24
Figura 9 - Primeira Turbina instalada no Brasil, Fernando de Noronha	25
Figura 10 - Central Eólica instalada no Morro do Camelinho	25
Figura 11 - Variação da Capacidade Acumulada Mundial do ano de 2001 a 2016	26
Figura 12 - Distribuição do Potencial Eólico Brasileiro em Relação à Velocidade do Vento	29
Figura 13 - Perfil vertical de velocidade do vento	31
Figura 14 - Perfis verticais de velocidade do vento para diferentes níveis de rugosidade.....	33
Figura 15 - Interferência no escoamento do vento causado por um obstáculo.....	33
Figura 16 - Escoamento do vento em uma montanha	34
Figura 17 - Distribuição dos ventos constantes no globo terrestre.....	36
Figura 18 - Histograma de velocidades do vento	38
Figura 19 - Distribuição de Rayleigh para diferentes valores de velocidade média	39
Figura 20 - Distribuição de Weibull para $V_{med} = 6$ m/s (esquerda) e $V_{med} = 7,5$ m/s (direita)	40
Figura 21 - Distribuições de Weibull e Rayleigh.....	41
Figura 22 - Etapas da conversão de energia em um aerogerador	42
Figura 23 - Crescimento da potência dos aerogeradores nos últimos anos	43
Figura 24 – Principais componentes de um aerogerador	43
Figura 25 - Representação da turbina de eixo vertical tipo Savonius	45
Figura 26 - Representação da turbina de eixo vertical tipo Darrieus	46
Figura 27 - Representação da turbina de eixo vertical tipo Darrieus H	47
Figura 28 - Representação de Aerogeradores de Eixo Horizontal	48
Figura 29 - Representação do aerogerador de eixo horizontal tipo Upwind.....	48
Figura 30 - Representação do aerogerador de eixo horizontal tipo Downwind	49
Figura 31 - Gráfico relacionando “Velocidade do vento x Densidade de potência”.....	51
Figura 32 - Ilustração da Lei de Betz	55
Figura 33 - Gráfico C_p x V_2/V_1	56
Figura 34 - Curva de potência de uma turbina de 660 kw.....	57
Figura 35 - Curvas de potência para diferentes massas específicas do ar	58
Figura 36 - Distribuição de energia gerada anualmente por velocidade do vento	59
Figura 37 - Escoamento do vento sobre o perfil aerodinâmico.....	62
Figura 38 - Perfil aerodinâmico ou aerofólio	62
Figura 39 - Forças aerodinâmicas atuantes no perfil da pá	63
Figura 40 - Força de sustentação segundo teorema de Bernoulli.....	65
Figura 41 - Ângulo de ataque em um perfil aerodinâmico.....	65
Figura 42 - Ângulos de ataque (α) e de passo (β) em um perfil aerodinâmico	66
Figura 43 - Movimento das pás no eixo longitudinal.....	67
Figura 44 - Controle de passo hidráulico	68
Figura 45 - Controle de passo por engrenagens	69
Figura 46 - Fluxo de ar descolado do perfil da pá (stall)	70

Figura 47 - Turbina eólica com leme de direcionamento.....	71
Figura 48 - Sistema de guinada ativo com 4 motores /	72
Figura 49 - Moinho de madeira europeu do ano de 1920.	73
Figura 50 - Aerogerador com pás feitas de metal	74
Figura 51 - Pás de aerogeradores constituídas de fibra de vidro.....	75
Figura 52 - Considerações sobre o tamanho dos aerogeradores e suas principais aplicações	76
Figura 53 - Representação esquemática de um sistema isolado.....	77
Figura 54 - Configurações de um sistema híbrido solar-eólico-diesel.	78
Figura 55 - Parque eólico conectado a rede situado em Prainha, CE.....	79
Figura 56 - Sistema Offshore localizado em Block Island, EUA.....	80
Figura 57 - Turbina Siemens SWT-3.2-108 montada com rotores a 70, 90 e 110 m de altura.....	84
Figura 58 - Curva de potência da turbina Siemens SWT-3.2-108	86
Figura 59 - Comparação da potência real em função da altura do rotor	88
Figura 60 - Turbinas com diâmetros de rotor de 101 e 108 m	89
Figura 61 - Comparação das potências disponível e real em função do diâmetro do rotor	91
Figura 62 - Coeficiente de solidez x TSR	92
Figura 63 - Coeficiente de potência do rotor x Razão da velocidade de ponta da pá.....	93
Figura 64 - Turbina Siemens SWT-3.2-108 montada com uma, duas, três e quatro pás	93
Figura 65 - Coeficiente de potência x TSR	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores da Capacidade Instalada de Energia no Brasil e sua origem	17
Tabela 2 - Valores de rugosidade para os diferentes tipos de terrenos	83

RESUMO

Historicamente, o ser humano buscou criar novas tecnologias que o ajudassem a exercer determinadas tarefas, para facilitar o seu trabalho. Porém, a produção dessas tecnologias agrediu seriamente o meio ambiente, sendo as limitações dos recursos disponíveis naquela época outro problema a ser considerado.

Para isso, iniciou-se uma busca por um melhor aproveitamento da força da natureza como fonte de energia, sendo a Energia Eólica uma das fontes mais utilizadas entre as energias renováveis. Neste trabalho, iremos detalhar um pouco sobre a energia eólica, desde a sua origem histórica, passando pela sua construção, mostrando como se dá a distribuição mundial para esta forma de energia sustentável e que, através de uma pesquisa bibliográfica, foi feita a aquisição de informações e dados para a comparação das diferentes configurações de aerogeradores visando destacar a influência dos principais parâmetros de projeto sobre o seu rendimento.

Palavras chave: Energia Eólica; distribuição mundial; turbinas eólicas; geradores.

ABSTRACT

Historically, the mankind sought to create new technologies to help him to do certain tasks, to facilitate their work. However, the production of these technologies seriously damaged the environment, and the limited resources available at that time is another problem to be considered.

Then, it was started a search for a better use of the force of nature as an energy source, as the Wind Power being one of the most used between the renewable energy sources. In this monograph, we'll detail a little about the Wind Power, since it historically origin, its construction, showing how is the global distribution of this type of renewable energy and, through a literature research, was made the acquisition of information and data for the comparison of the different configurations of the wind turbines in order to highlight the influence of the main design parameters on their performance.

Key words: Wind Power; global distribution; wind turbines; generators

1. INTRODUÇÃO

1.1. Cenário

Segundo GWEC (2016), nos anos 1970 surgiu a preocupação das fontes de combustíveis fósseis se tornarem limitadas, bem como os impactos ambientais a eles associados. Devido a essa cada vez mais crescente preocupação, veio à tona o interesse em explorar as fontes renováveis para abastecer o constante aumento de demanda mundial de eletricidade. Somado a isso, o surgimento da crise do petróleo entre 1973 a 1979 evidenciou ainda mais o problema.

As fontes convencionais de energia como gás natural, óleo, carvão e energia nuclear são consideradas finitas e poluentes ao planeta. Aliado a isto, há uma forte resistência popular contra o crescimento da energia nuclear em várias partes do mundo. Sendo assim, devido à tensão envolvendo as questões ambientais e a escassez dos combustíveis fósseis, houve a necessidade de migrar para fontes alternativas. Nesse cenário, começam a ser exploradas as fontes renováveis, que se distinguem das convencionais por serem limpas e abundantes e terem uma grande importância diante da crescente demanda energética do futuro. A ausência de emissão de certos poluentes em direção à atmosfera terrestre devido à geração renovável é tida como uma significativa vantagem comparada às usinas de combustíveis fósseis. Dentre o universo das fontes renováveis, a energia eólica se destacou mundialmente, principalmente pelos bons resultados obtidos em países como Alemanha e Dinamarca. Entre outras razões, este destaque se deve a características atrativas, como: sustentabilidade ambiental durante a operação, segurança de fornecimento e custo relativo à produção.

No Brasil, ao longo dos últimos anos, houve acentuado crescimento na capacidade instalada, chegando a figurar em quinto lugar no ranking mundial da energia eólica instalada, com uma expansão de 2014 MW. Este crescimento é devido a programas de incentivo, que impulsionam tanto o desenvolvimento tecnológico quanto a capacitação profissional. Dentre estes programas destaca-se o PROINFA – Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica – cujo objetivo é a diversificação e ampliação da matriz energética nacional.

1.2. Objetivos Gerais

O presente trabalho estabelece uma análise técnica comparativa dos fatores de projeto capazes de alterar o rendimento das turbinas de aerogeração de eixo horizontal (TEEH) de grande porte, visto que estas são usualmente as mais utilizadas na produção de energia elétrica nos parques eólicos por possuírem maior rendimento em relação aos de eixo vertical.

A análise aplicada é construída mediante a variação dos diferentes parâmetros de projeto, registrando sua conseqüente alteração no rendimento da turbina com posterior plotagem em gráficos para melhor visualização.

1.3. Objetivos Específicos

Para análise comparativa são considerados três dos principais parâmetros de projeto que influenciam no rendimento dos aerogeradores:

- a) Altura da torre
- b) Diâmetro do rotor
- c) Número de pás

1.4. Relevância

A opção por empregar a energia dos ventos requer uma cautelosa análise que propicie sua viabilidade técnica. A importância deste processo deve ser sempre respeitada, uma vez que a disponibilidade da energia dos ventos é de complexa avaliação por conta de seu caráter fortemente dependente das condições climáticas.

No entanto, o conhecimento obtido ao longo dos anos com estudos e experimentos, teve como consequência um amplo desenvolvimento tecnológico. Consequentemente, o aproveitamento dos ventos como uma fonte de energia pode ser apontado como uma alternativa viável, tanto do ponto de vista técnico como também da parte econômica; ou seja, dispõe de uma tecnologia pronta para uso e economicamente competitiva.

Segundo PINTO (2013), desde o ano de 1980, quando os primeiros aerogeradores comerciais começaram a ser desenvolvidas, aprimoraram-se bastante suas características de eficiência, design e capacidade instalada. As configurações de cada turbina são ajustadas conforme o projeto para que foi desenvolvida e a mínima alteração em uma de suas

características é capaz de gerar diferença em sua potência. Por conta disso, o presente trabalho trata as comparações de diferentes características de aerogeradores com sua merecida importância, agregando como um estudo para posteriores projetos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Alternativas Energéticas

Segundo CEMIG (2012), o desenvolvimento da sociedade está intimamente ligado ao domínio das tecnologias e das fontes energéticas. Prova disso é o crescimento mundial decorrente da revolução industrial, que aconteceu na Europa entre os séculos XVIII e XIX e, quase paralelamente, com o surgimento da indústria petrolífera nos Estados Unidos, a partir de 1859. A partir de então, tanto os países europeus quanto os Estados Unidos se tornaram potências globais.

Contudo o uso de fontes energéticas derivadas do petróleo e do carvão mineral despertam preocupações quanto à poluição do meio ambiente e também à futura escassez destes recursos, visto que não são renováveis.

Visando o uso sustentável e racional dos recursos naturais, surge o conceito de alternativas energéticas, o qual contempla, além de fontes alternativas de energia, as tecnologias de transformação, conversão, armazenagem, automação e controle, bem como eficiência energética. O uso dessas alternativas traz como benefícios: a redução de poluição do meio ambiente através das “energias limpas”; a preservação dos recursos naturais esgotáveis, como petróleo e carvão mineral, mediante o uso controlado dos mesmos; autonomia energética para países não produtores de petróleo; criação de novos postos de trabalho; desenvolvimento econômico do país; entre outros.

Fontes de energia alternativa como eólica, solar, oceânica, geotérmica e biomassa, aliadas à eficiência energética nas instalações, nos veículos e nas indústrias, e também ao uso de redes inteligentes contribuem diretamente para a redução da utilização de combustíveis fósseis e, conseqüentemente, dos impactos ambientais negativos a eles associados.

A utilização de alternativas energéticas em todo o mundo está associada à disponibilidade de recursos naturais necessários para o seu funcionamento de forma viável. Por exemplo, áreas situadas próximas a regiões tropicais experimentam maior incidência dos raios solares, favorecendo a instalação de centrais solares de energia. Da mesma forma, as regiões litorâneas possuem um elevado potencial eólico que pode ser aproveitado com a instalação de parques eólicos. Regiões costeiras com elevada amplitude de ondas e de marés favorecem a obtenção de energia através dos oceanos. Regiões próximas a grandes áreas de cultivo (principalmente de cana de açúcar) favorecem a obtenção de energia e outros subprodutos através da biomassa.

Várias medidas estão sendo implementadas em todo o mundo almejando ampliar a utilização das alternativas energéticas. Entre elas está a criação do PROINFA – Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica –, programa criado visando expandir os horizontes da atual matriz energética brasileira, mediante a utilização de fontes alternativas, tais como eólica, solar, biomassa e a implantação de pequenas centrais hidrelétricas (PCH's). Além de promover o incentivo do uso das fontes alternativas, sendo principalmente a energia eólica, o PROINFA previa um total de 60% da nacionalização das empresas, o que contribuiu de forma preponderante para o desenvolvimento e para o fortalecimento da indústria nacional.

Seguindo esta linha, a organização ambiental WWF Brasil, em parceria com a consultoria Ecofys, desenvolveu o “Relatório de Energia 2050” (2011), o qual aponta para um cenário ambicioso, que revela ser tecnicamente possível alcançar quase 100% de geração de energia elétrica apenas com o uso das fontes renováveis.

2.2. Matriz Energética Brasileira

Atualmente, o cenário mundial evidencia com grande importância as questões ambientais relacionadas à emissão de gases agravadores do efeito estufa, dentre eles destaca-se o dióxido de carbono, que é produzido prevalentemente pela queima de combustíveis fósseis. Por conta disso, a demanda de energia limpa é crescente e constante, conforme refletido nas estatísticas fornecidas pela Agência Internacional de Energia (AIE) em 2015: A energia limpa representa cerca de metade da nova capacidade de geração de eletricidade instalada em 2014, constituindo a segunda fonte mundial de eletricidade, superada apenas pelo carvão. Também de acordo com a AIE, a demanda mundial de eletricidade aumentará em 70% até 2040, aumentando sua participação no consumo final de energia de 18% para 24% no mesmo período, estimulada principalmente pelas regiões emergentes (Índia, China, África, Oriente Médio e Sudeste Asiático). O desenvolvimento de energia limpa é essencial para combater as alterações climáticas e limitar os seus efeitos mais devastadores. Fontes renováveis exprimem fontes de energia inesgotável, limpa e cada vez em maior crescimento. E por conta disso, é fundamental analisar e conhecer a matriz energética de um determinado país, pois ela é útil para analisar e comparar o consumo de energia ao longo do tempo, ou para comparação com outros países e é uma ferramenta indispensável para o planejamento.

A matriz energética pode ser entendida como a representação quantitativa do total de energia utilizada por um país e indica a ocorrência relativa das fontes de onde cada tipo de energia provém: geotérmica, fóssil, nuclear, solar, hidrelétrica, eólica e biomassa, como

petróleo, gás e carvão. Uma representação esquemática da matriz energética brasileira é apresentada na Tabela 1.

Fonte		Capacidade Total Instalada		
Origem	Fonte Nível 1	Nº de Usinas	(KW)	%
Biomassa	Agroindustriais	416	11.036.225	6,8831
	Biocombustíveis Líquidos	3	4.670	0,0029
	Floresta	87	2.830.248	1,7651
	Resíduos animais	11	2.099	0,0013
	Resíduos sólidos urbanos	16	117.380	0,0732
Eólica	Cinética do vento	427	10.434.043	6,5075
Fóssil	Carvão Mineral	23	3.803.995	2,3724
	Gás Natural	161	13.012.617	8,1157
	Outros Fósseis	1	147.300	0,0918
	Petróleo	2208	10.035.860	6,2592
Hídrica	Potencial Eólico	1263	98.729.390	61,575
Nuclear	Urânio	2	1.990.000	1,2411
Solar	Radiação Solar	44	23.761	0,0148
Importação	Paraguai		8.170.000	5,0954
	Argentina			
	Venezuela			
	Uruguai			

Tabela 1 - Valores da capacidade instalada de energia no Brasil e sua origem – ANEEL, 2017.

Fonte:

Com os dados da tabela 1, é plotado o gráfico da Figura 1, para melhor entendimento da matriz energética nacional no ano de 2017.

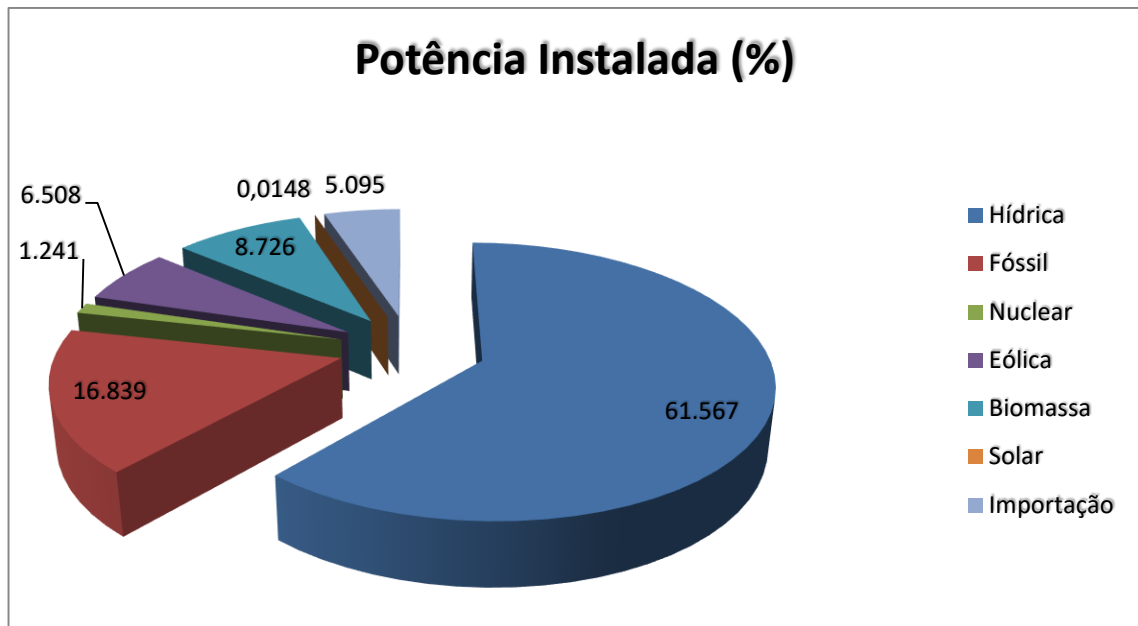


Figura 1 – Perfil da matriz energética do Brasil no ano de 2017 – Fonte: ANEEL, 2017.

Segundo a ANEEL (2017), além do grande potencial brasileiro na produção e obtenção de energia que tem sua origem nas fontes não renováveis, isto é, dos combustíveis fósseis, o país já possui uma parte significativa de sua matriz energética oriunda de fontes de energia renováveis, visto que possui um grande número de usinas hidrelétricas em seu território, que juntas produzem a maioria da energia do país. O país adotou a opção pelo modelo alternativo hidrelétrico por conta da assiduidade de rios de grande extensão e de planalto, que formam uma das mais cobiçadas reservas hídricas do mundo. As usinas hidrelétricas em 2017 correspondem a 61,5% da potência instalada no país. Além disso, o Brasil possui uma grandiosa capacidade de exploração de Urânio para usinas nucleares. Porém, o processo é problemático devido às questões ambientais, importação de tecnologia e investimento de alto custo, atrasando assim a provável construção de usinas nucleares. Para instituir um novo e favorável quadro da matriz energética brasileira, as energias eólica e solar retratam que possuem enormes potencialidades nas fontes renováveis. A Organização Internacional Especializada em Energia Eólica, Global Wind Energy Council (GWEC), publicou um ranking que indica uma expansão no ano de 2016 de 2.014 MW na produção eólica no Brasil e isso levou o país à ocupação do quinto lugar na classificação mundial no que diz a respeito à capacidade instalada dessa energia. Este ranking é ilustrado na Figura 2.



Figura 2 - Ranking Mundial de capacidade acumulada de geração eólica em 2016 – Fonte: ANEEL, 2017.

Segundo um estudo realizado pelo Greenpeace Brasil, ao chegarmos aos 2050, algumas medidas de eficiência energética diminuiriam em 29% a produção de eletricidade e 88% do fornecimento da eletricidade total seria de origem renovável. Conforme estatísticas, a geração de eletricidade estaria separada da seguinte forma: 38% proveniente das hidrelétricas, 26% proveniente de biomassa, 20% de eólica e 4% de energia solar fotovoltaica. A partir desse contexto, a produção de eletricidade advinda de carvão, óleo diesel e nuclear seria totalmente eliminada da matriz.

2.3. Energia Eólica – Contexto Histórico

Segundo HAU (2005), a energia eólica é extraída a partir dos ventos, compondo o quadro das fontes renováveis, sendo limpa e disponível no mundo todo. Um dos primeiros registros históricos dessa fonte energética foi no século V na Pérsia, no bombeamento de água e também na moagem de grãos através da utilização de cata-ventos, os quais eram compostos apenas por uma hélice vertical que ao ser impulsionado pelos ventos acionava uma bomba de sucção de água, para um reservatório, esta água era reaproveitada nas atividades agrícolas. Esses moinhos de ventos se disseminaram pela Europa no século XI, no retorno das cruzadas. No século XII, no território holandês, começaram a ser aplicados moinhos de ventos com eixos horizontais que também se espalharam rapidamente pela Europa. Com o funcionamento dos moinhos de vento, além de influenciar na economia agrícola, o seu desenvolvimento tecnológico aperfeiçoou várias atividades empregando-se a força motriz do vento.

O primeiro cata-vento para geração de energia elétrica foi criado por Charles F. Bruch no final do século XIX, como ilustrado na Figura 3. Este mecanismo fornecia 12 KW em correntes contínuas para o carregamento de baterias e a roda principal do moinho tinha 144 pás. Em 1908 este sistema foi desativado.

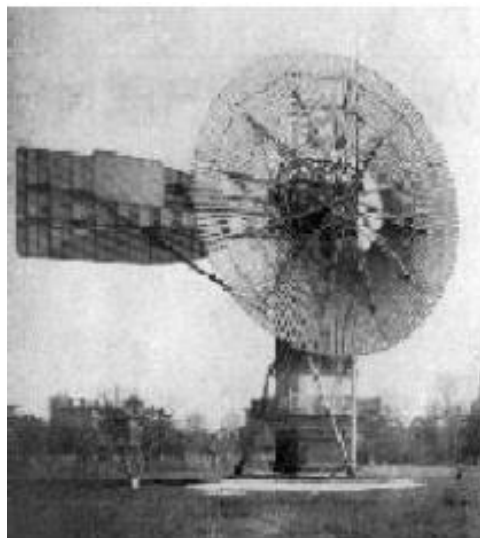


Figura 3 - Cata-vento Bruch - Fonte: MARQUES, 2004.

No final século XIX, com a Revolução industrial e conseqüentemente a implantação das máquinas a vapor, veio o declínio dos moinhos de ventos na Europa. Com o intuito de preservação dos moinhos de vento em 1923, foi criada uma sociedade holandesa para aprimorar e conservar a utilização efetiva dos moinhos holandeses.

Durante o período de 1920 – 1970, surgiram diferentes plantas de grande escala para a geração de eletricidade, porém a maioria foram reprovadas na prática para a produção de energia eólica em grande escala, dentre estes, pode-se citar os moinhos de ventos de eixos horizontal, denominados de Balacrava, Smith-Putnam, Gedser e Hutter, também as turbinas de eixos verticais, denominadas Darrieus e Savonius.

Em 1931 foi desenvolvido o aerogerador Balacrava, que era um avançado modelo de 100 kW interligado por uma linha de transmissão até uma usina termelétrica. Este foi o início para os modelos de aerogeradores de médio e grande porte.

Os países começaram a se empenhar para produzir aerogeradores cada vez mais potentes e de diferentes formas, os Estados Unidos, por exemplo, surgiram com o projeto para construção da maior turbina até então projetada, era o chamado aerogerador Smith-Putnam de 1,25MW, ilustrado na Figura 4 e possuía duas pás com um rotor com 53 m, foi instalada em Vermont.



Figura 4 – Cata-vento Smith – Fonte: HAU, 2005.

Em meados de 1956, Johannes Juul criou um protótipo da turbina eólica Gedser, montada com três pás, desenvolvendo uma potência nominal na faixa de 200 KW e com um gerador de corrente alternada assíncrono girando a uma velocidade quase constante. Este aerogerador é representado na Figura 5.



Figura 5 – Cata-vento Gedser – Fonte: MARQUES, 2004.

Segundo CRESESB (2008), entre os anos de 1955 e 1968, foi construída na Alemanha a turbina eólica considerada com a maior quantidade de inovações tecnológicas até o momento. Ela possuía 34 m de diâmetro, e operava com potência de 100KW e com duas pás feitas de materiais compósitos que as deixaram com maior eficiência e menos pesos. Este aerogerador era chamado de cata-vento Hutter, e é representado através da Figura 6.



Figura 6 – Cata-vento Hutter – Fonte: HAU, 2005.

As turbinas de eixos verticais apresentavam certas desvantagens em relação às turbinas de eixos horizontais, dentre essas podemos citar, a queda no desempenho, menor aproveitamento de maiores velocidades de vento devido às torres de sustentação serem baixas, dificuldade no desenho da turbina, pois a modelagem matemática é bastante complexa e entre outras.

As turbinas tipo Darrieus foram patenteadas em 1927, na França. Essas turbinas possuem perfil aerodinâmico esquematizado de forma semelhante às asas dos aviões, criando sustentação para se movimentarem e gerar energia. Ela deve suportar diferentes esforços ao longo do eixo, pois quanto maior a altura maior o vento. São ilustradas conforme a Figura 7.



Figura 7 - Turbina Darrieus - Fonte: MÜLLER, 2015.

Segundo MÜLLER (2015), os aerogeradores verticais de modelo Savonius tiveram seu desenvolvimento ocorrido na Finlândia em 1924. As mesmas giram principalmente pela força de arrasto do ar sobre o lado interno das pás. Essa turbina, conforme ilustrado na Figura 8, trabalha em baixa velocidade e com alto torque.

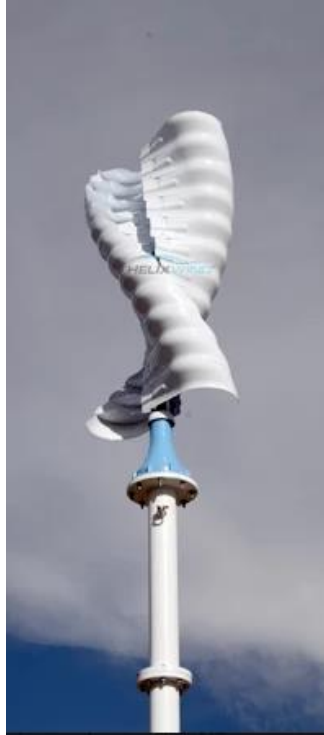


Figura 8 - Turbina Savonius – Fonte: MÜLLER, 2015.

Durante a Segunda Guerra Mundial (1939-1945) e após a crise do petróleo em 1970, com a falta de combustíveis fósseis, as fontes renováveis voltaram a se destacar. Com os avanços tecnológicos foi possível o desenvolvimento dos componentes mecânicos tornando-se os mesmos mais complexos, o sistema elétrico, o controle de turbina, entre outros.

A primeira turbina eólica a ser instalada no território brasileiro foi datada de 1992, em Fernando de Noronha, pela Companhia Energética de Pernambuco (CELPE), ilustrada na Figura 9, em parceria firmada com a entidade Dinamarquesa Folkcenter e o Grupo de estudos de Energia Eólica da UFPE. Esta turbina atendia 10% da demanda da ilha, com potência instalada de 75 KW, três pás de 17 metros de diâmetro e torres com 23 metros de altura.



Figura 9 - Primeira turbina instalada no Brasil, Fernando de Noronha – Pesquisado em:
<<http://www.memoriadaeletricidade.com.br>>

Em 1994, foi construída a Central Eólica experimental do Morro do Camelinho, em Gouveia em Minas Gerais, a implantação foi uma parceria com a Companhia elétrica de Minas Gerais (CEMIG) com o Governo Alemão, operando com 04 turbinas eólicas de 250 KW, potência de 1MW, três pás com diâmetro do rotor de 26m e torre tubular cônica de 30m de altura. Este foi o primeiro parque eólico na escala de megawatt instalado no Brasil, e é ilustrado na Figura 10.



Figura 10 - Central Eólica instalada no Morro do Camelinho – Pesquisado em:
<<https://www.cemig.com.br>>.

Segundo ANEEL (2005), durante o período de 1996 – 1999 foram instaladas mais algumas centrais eólicas podem citar o parque eólico de Mucuripe - CE, com uma potência de instalação de 1,2 MW, construído com quatro turbinas de 300 KW e três pás com diâmetro do rotor de 33 metros; Na América Latina, foi instalado o maior parque eólico, em Aquiraz no Ceará, o Parque eólico da Prainha, constituído de 20 turbinas eólicas cada uma com 500 KW, resultando em uma potência instalada de 5MW; O Parque eólico de Taíba, localizado no município cearense de São Gonçalo do Amarante, composto por 10 aerogeradores de 500 kW, totalizando uma potência instalada de 5MW; Os parques eólicos de Prainha e de Taíba foram construídos sobre dunas. O Parque eólico de palmas, em Paraná é composto por cinco turbinas de 500KW, com uma potência instalada na faixa de 2.5 MW.

Em setembro de 2003, no Brasil havia apenas seis centrais eólicas em operação no país, destacando-se as centrais de Taíba e Prainha, localizadas no Estado do Ceará, representando 68% da capacidade eólica nacional.

2.3.1. Potencial Eólico Mundial

O Conselho Global de Energia Eólica (GWEC) divulgou que em 2016, foram implantados mais de 54 GW de energia eólica em todo o mercado mundial, que atualmente conta com mais de 90 países, e dentre eles, nove com mais de 10 GW instalados e outros 29 que passaram de 1.000 MW. A Figura 11 mostra que capacidade eólica acumulada subiu 12,6%, chegando a um total de 486,8 GW.

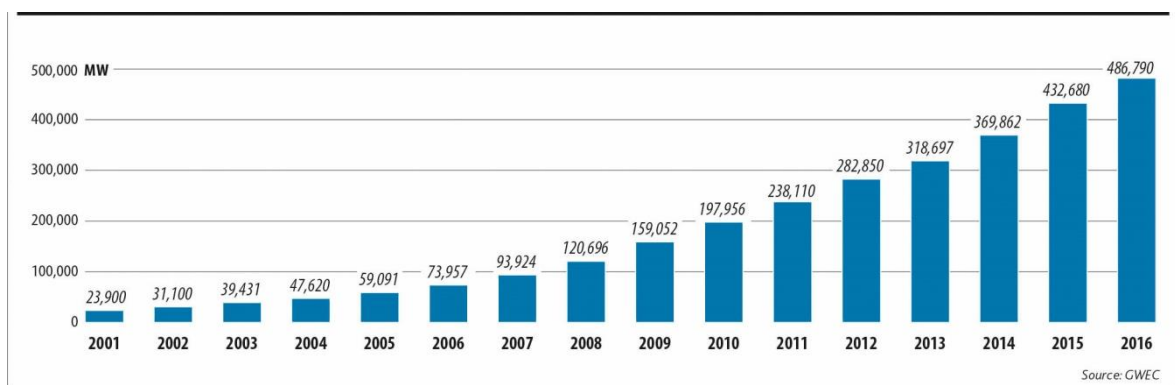


Figura 11 - Variação da Capacidade Acumulada Mundial do ano de 2001 a 2016 –
Fonte: GWEC, 2005.

Liderados pela China, EUA, Alemanha e Índia e com demonstrações surpreendentemente fortes da França, Turquia e Holanda, o mercado global consumidor de energia eólica em 2016 foi, no entanto, menor do que havia em 2015.

Os prognósticos de cinco anos da GWEC preveem quase 60 GW de novas instalações eólicas em 2017, chegando a um mercado anual de cerca de 75 GW até 2021, para aumentar a capacidade instalada acumulada de mais de 800 GW no prazo de até 2021. O crescimento continuará sendo liderado pela Ásia: a China persistirá na liderança de todos os mercados, mas a Índia também apresentará avanços para as instalações, se destacando. A Índia marcou um novo recorde nacional com 3.612 MW de novas instalações, o quarto maior mercado de 2016; isso traz o total do país para 28.700 MW, consolidando sua 4ª posição no total de instalações cumulativas também.

Segundo a GWEC, a evolução da energia eólica tem sido conduzida especialmente pelo desenvolvimento incessante da China, o qual se tornou o primeiro país no ranking de capacidade eólica instalada no mundo inteiro. O governo chinês apropriou-se do compromisso com o progresso dos recursos eólicos do país, parcialmente motivado pela obrigação de aumentar a capacidade de produção para escorar uma economia em crescimento e incentivar o desenvolvimento econômico rural. O compromisso político teve aprovação de políticas promissoras do desenvolvimento da energia eólica, e este fato resultou em um grande crescimento no setor. Além disso, a Europa continuou a liderar o mercado offshore, mas os preços baixos atraíram a atenção de todos em todo o mundo, especialmente na Ásia e na América do Norte. Apesar dos problemas políticos e econômicos do Brasil, outros países da região preencheram a lacuna, especialmente o Uruguai, o Chile e o novo mercado mais emocionante da região na Argentina. O Brasil voltou a liderar o mercado da América Latina, mesmo com os problemas políticos e econômicos do país, mas que ainda sim chegou à marca de 10 GW quando terminou o ano com 10,740 MW. O Chile registrou um ano recorde com 513 MW instalados, elevando o total do país para 1.424 MW, e o Uruguai adicionou 365 MW para um total de 1.210 MW no final do ano. Peru (93 MW), a República Dominicana (50 MW) e a Costa Rica (20 MW) também obtiveram significativas instalações no ano anterior. Enquanto a Argentina não tinha novas instalações em 2016, agora tem mais de 1.400 MW, que será construído nos próximos dois anos.

As instalações dos EUA (8.203 MW) foram quase iguais ao mercado forte de 2015, trazendo o total dos EUA para mais de 82 GW. A indústria dos EUA agora emprega mais de 100.000 pessoas e tem mais de 18 GW em construção ou em estágios avançados de

desenvolvimento, um presságio para um mercado forte novamente em 2017. O Canadá (702 MW) e o México (454 MW) registraram ganhos sólidos, porém modestos.

2.3.2. Potencial Eólico Brasileiro

Além de possuir uma forte característica alternativa com a presença de hidrelétricas, o Brasil possui condições geográficas favoráveis à instalação da energia eólica. O país tem uma vasta costa litorânea no seu território, beneficiando-se assim de uma frequência de ventos adequadas e estáveis para o aperfeiçoamento de tal atividade.

O potencial eólico característico de uma determinada região é avaliado com base em trabalhos demasiadamente detalhados de coleta e verificação de dados em associação à gestão de ventos e à velocidade. Usualmente, esta avaliação minuciosa solicita pesquisas específicas, porém dados recolhidos em estações meteorológicas, aeroportos e outras aplicações semelhantes podem disponibilizar uma primeira aproximação do potencial teórico ou bruto de proveito da energia eólica.

Segundo GRUBB (1993), a fim de que a energia eólica desenvolvida por certa usina seja considerada conveniente é necessário que ela possua uma densidade maior ou igual a 500 W/m², a uma altura de 50 m, e isto solicita uma velocidade de 7 a 8 m/s.

Conforme o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, o Brasil dispõe de 140 GW de potencial eólico, a 50 metros de altura. Assim, é possível observar na Figura 13 as áreas do Brasil onde os ventos atingem as melhores condições para geração de energia eólica.

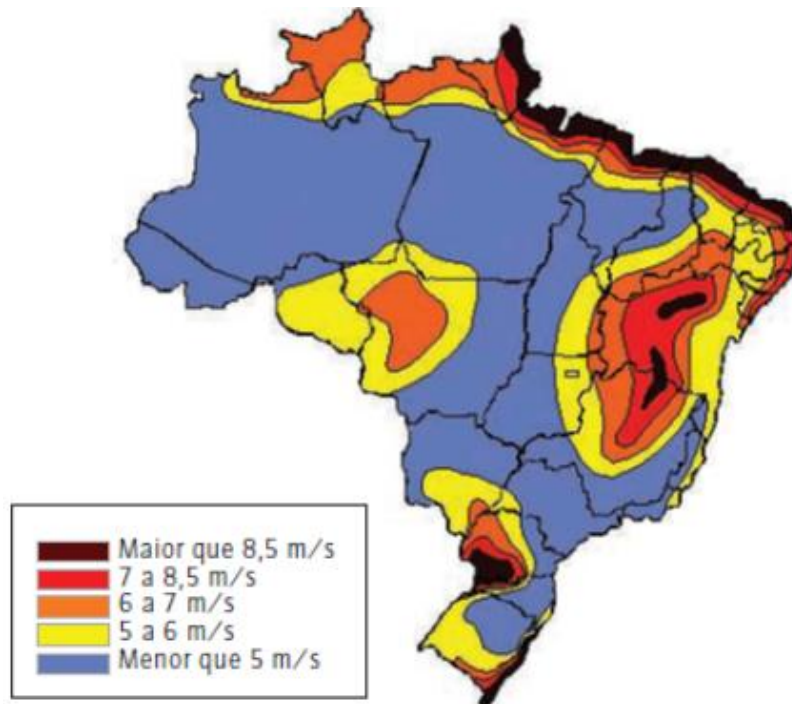


Figura 12 - Distribuição do Potencial Eólico Brasileiro em Relação à Velocidade do Vento –
Fonte: AMARANTE, 2001.

Analisando a Figura 12, tem-se que os melhores potenciais de energia eólica estão presentes nas regiões Norte e Nordeste, nas quais a velocidade média do vento é superior a 8,5 m/s a 50m do solo. Além de possuir este valor maior que a velocidade essencial para geração eólica, o vento nessas regiões é unidirecional e estável, resultando assim em uma constante geração de energia. O país também possui avanços nas tecnologias para esta produção, temos de exemplo o aumento das torres de geradores nos últimos anos, segundo a ANEEL, estas passaram de 50m para 100 a 120m e, simultaneamente, tiveram maior facilidade em obter ventos com maiores velocidades. Concomitantemente, a potência das máquinas aumentou em três vezes, para 3 megawatts. Além do mais, os geradores mais eficientes tiveram o custo da energia eólica reduzido. Atualmente, o preço médio diminuiu em 45% se comparado há 10 anos. Dessa forma, a energia eólica tornou a segunda mais barata no Brasil, perdendo apenas para hidrelétrica.

Segundo a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), foram inauguradas 81 novas usinas eólicas no ano de 2016, completando 2.013,97 megawatts. Os estados gratificados com as novas construções foram Rio Grande do Norte, Piauí, Pernambuco, Bahia, Ceará e Rio Grande do Sul.

O fator de capacidade obtido nas centrais eólicas em regiões localizadas onde o vento é superior a 8,5m/s, atinge 40% e, em algumas temporadas pode atingir até 60%, significando um excelente fator. No país, os períodos de menor capacidade das hidrelétricas, correspondem aos períodos de maiores ventos e conseqüentemente de maior geração de energia provinda das usinas eólicas.

Essa correlação já comprovada fortalece uma maior estabilidade e confiabilidade do sistema elétrico brasileiro.

2.3.3. Ventos

O vento é considerado uma das várias formas indiretas de utilização da energia solar, bem como a energia hidrelétrica, a biomassa e os combustíveis fósseis, uma vez que todas elas dependem de alguma forma da energia fornecida pelo sol. Basicamente, o vento é o deslocamento de determinada massa de ar que acontece em todas as camadas atmosféricas.

Segundo JERVELL (2008), a formação dos ventos se dá através do aquecimento irregular da superfície terrestre, causada, entre outros fatores, pelo direcionamento dos raios solares e pelo movimento de rotação do planeta. O gradiente de temperaturas nas massas de ar gera, conseqüentemente, uma diferença de pressão atmosférica e assim o deslocamento do ar iniciando-se no ponto de maior pressão em direção ao de pressão mais baixa.

Existem várias formas de se aproveitar a energia disponível nos ventos, das quais se pode citar: impulsão de barcos a velas, energia mecânica para bombeamento de água, energia mecânica em moinhos de vento e, atualmente, para geração de eletricidade através de aerogeradores.

2.3.3.1. Fatores que Influenciam as Características dos Ventos

De acordo com GASCH (2011), camada mais baixa da atmosfera, a qual faz fronteira com a superfície terrestre é denominada camada limite atmosférica. Esta camada caracteriza-se por um escoamento turbulento das massas de ar, e é justamente onde se situam as turbinas eólicas. Nesta camada limite, alguns fatores têm influência sobre os ventos, como rugosidade aerodinâmica do terreno, orografia – que causa efeitos de aceleração ou desaceleração do ar – presença de obstáculos e estabilidade térmica vertical.

a) Variação da Velocidade do Vento com a Altura

Segundo GASCH (2011), O escoamento das massas de ar sobre a superfície terrestre pode ser bem interpretado como o conceito de Mecânica dos Fluidos de escoamento sobre uma placa plana, o qual estabelece que as camadas de um fluido escoando sobre uma superfície sofrem cisalhamento devido à força de atrito nas camadas próximas à placa, formando um gradiente de velocidades. Na camada imediatamente próxima à placa, a velocidade relativa é considerada zero. A Figura 13, mostra como se dá o escoamento do ar no limite da superfície terrestre.

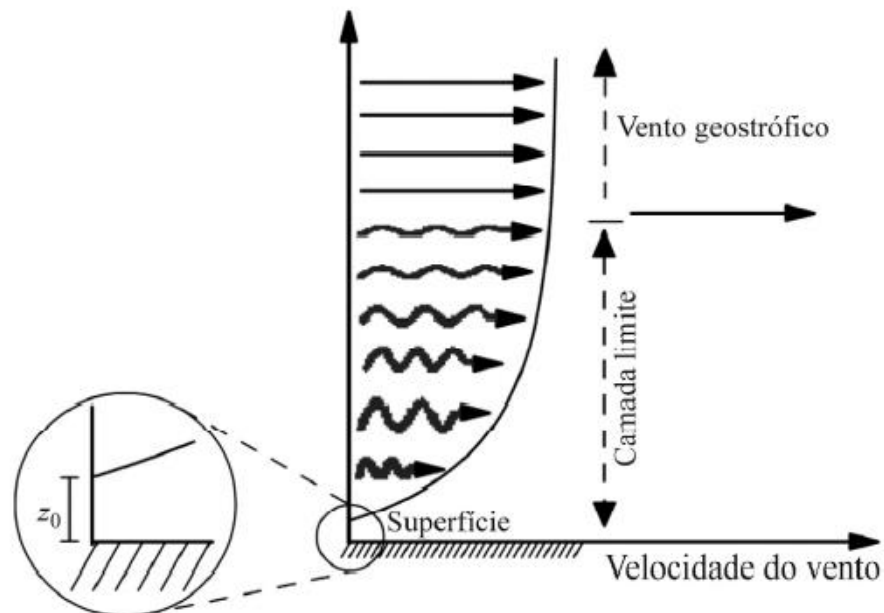


Figura 13 - Perfil vertical de velocidade do vento – Fonte: MARTINS, GUARNIERI e PEREIRA, 2007.

Segundo HIRATA (2004) e PINTO (2013), existem modelos matemáticos capazes de aproximar de forma razoável a distribuição vertical das velocidades do vento na camada limite da atmosfera. Os modelos mais utilizados são a “Lei de Potência” e a “Lei Logarítmica”. Entre estes modelos, o mais simples é a “Lei de Potência”, que possui mais fácil aplicação, porém apresenta uma precisão menor, quando comparado à Lei Logarítmica. A fórmula matemática da Lei de Potência é dada pela Equação 1:

$$V(z) = V(Z_r) * \left(\frac{z}{Z_r}\right)^n \quad (1)$$

Onde:

$V(z)$ = velocidade do vento na altura z

$V(z_r)$ = velocidade do vento em uma altura de referência

n = Fator associado à rugosidade da superfície

A velocidade estimada em uma determinada altura, de acordo com a Lei Logarítmica é calculada de forma mais complexa, utilizando o conceito de comprimento de rugosidade, e é caracterizada pela Equação 2:

$$V(Z) = V(Z_r) \frac{\ln\left(\frac{Z}{Z_0}\right)}{\ln\left(\frac{Z_r}{Z_0}\right)} \quad (2)$$

Onde:

$V(z)$ = velocidade do vento na altura z

$V(z_r)$ = velocidade do vento em uma altura de referência

Z_0 = comprimento da rugosidade

b) Rugosidade da Superfície

Segundo HIRATA (2004) e PINTO (2013), a rugosidade do plano terrestre pode ser comparada com o “grau de acabamento” de uma superfície qualquer. Fatores como vegetação rasteira, árvores, água espelhada, areia de praia, grama baixa e arbustos descrevem a rugosidade da superfície de determinado local, e são responsáveis pela maior ou menor resistência ao escoamento das massas de ar. A Figura 14 ilustra como a rugosidade superficial influencia diretamente na distribuição vertical de temperaturas, e é aplicada matematicamente tanto na Lei de Potência (n) quanto na Lei Logarítmica (z_0).

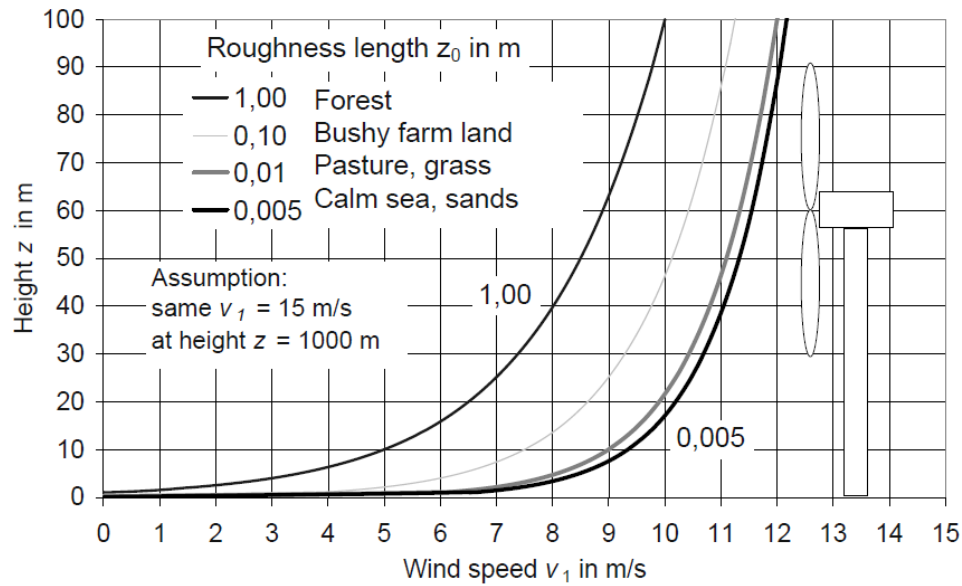


Figura 14 - Perfis verticais de velocidade do vento para diferentes níveis de rugosidade –
Fonte: GASCH, 2011.

c) Obstáculos

Segundo SILVA (1999) e PINTO (2013), a presença de obstáculos bloqueia o escoamento dos ventos, obrigando-os a contornar ao redor e acima destes obstáculos. Formações rochosas de grande volume, edificações e conjunto de árvores altas são considerados exemplos de obstáculos, e sua presença causa o chamado efeito de sombreamento. Fatores como a forma, rugosidade e distância entre os obstáculos influenciam no escoamento.

Considerando-se que determinado obstáculo possui forma retangular, o mesmo irá causar um descolamento do escoamento em suas arestas, originando zonas turbulentas de recirculação, conforme ilustrado na Figura 15.

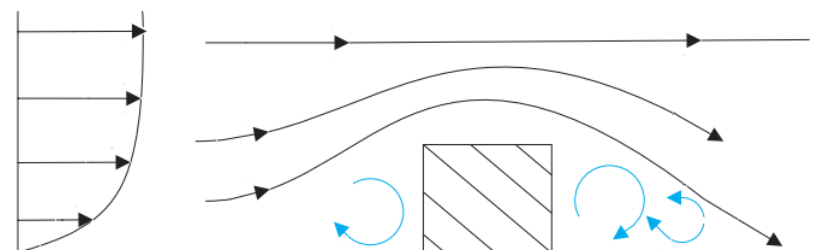


Figura 15 - Interferência no escoamento do vento causado por um obstáculo –
Fonte: JERVELL, 2008.

d) Orografia

Segundo SILVA (1999) e PINTO (2013), a Orografia é o relevo adjacente ao local considerado, que pode causar aceleração ou desaceleração do escoamento. Montanhas, colinas, depressões, vales e gargantas são bons exemplos de orografia. A Figura 16 traz como exemplo um perfil de velocidades, onde nota-se variação na aceleração e na inclinação dos ventos, além do surgimento de uma zona turbulenta.

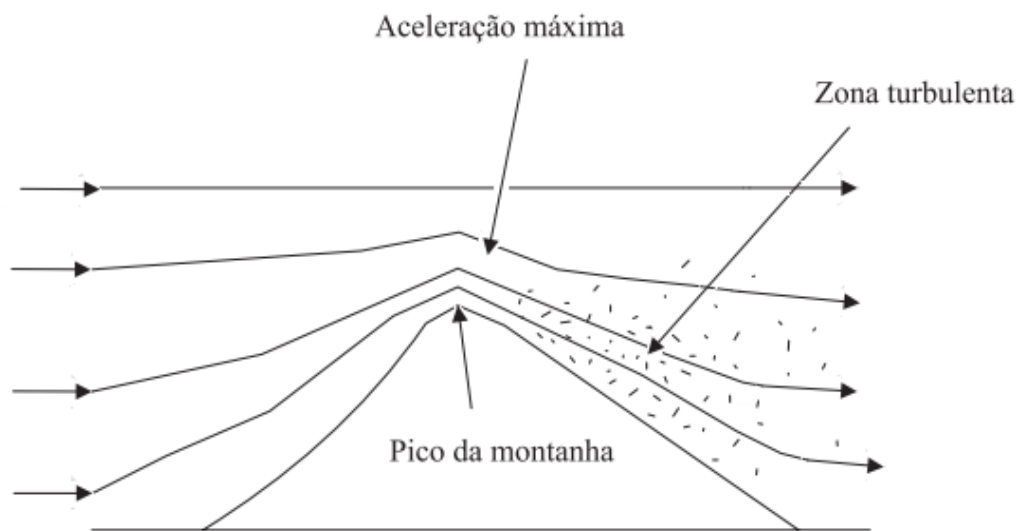


Figura 16 - Escoamento do vento em uma montanha – Fonte: JERVELL, 2008.

Portanto, deve-se estudar cuidadosamente a orografia do local antes de instalar uma turbina eólica, pois aspectos como turbulência e inclinação do escoamento (quando superior a 8° de acordo com a norma IEC-61400-1) podem causar danos à turbina, por submetê-la a esforços para os quais ela não foi especificada.

2.3.3.2. Regimes dos Ventos

Quanto ao seu regime, os ventos classificam-se em três subgrupos, que são: constantes, periódicos e locais (variáveis).

a) Ventos Constantes

Segundo HIRATA (2004), os ventos constantes – também chamados de ventos planetários - são aqueles que atuam de maneira permanente ao longo do tempo, pois as circunstâncias que os formam são sempre as mesmas, de uma forma geral. Entre eles existem as classificações a seguir:

i. Ventos Alísios

Segundo HIRATA (2004), os ventos alísios são aqueles que estão em constante deslocamento das regiões de elevada pressão dos trópicos em direção à região de baixa pressão próximas à linha do Equador, que é chamada de Zona de Convergência Intertropical, por esta ser a zona onde se encontram os ventos alísios do Sul e do Norte. Estes ventos transportam a umidade tropical para a região do Equador, além da poeira dos desertos africanos em direção ao Atlântico. Seu deslocamento ocorre nas camadas inferiores da atmosfera, próximo à superfície terrestre.

ii. Ventos Contra-Alísios

Segundo GASCH (2011), os ventos contra-alísios se deslocam em sentido oposto aos ventos alísios, ou seja, da Zona de Convergência Intertropical em direção aos polos. Seu deslocamento se dá em elevadas altitudes, invariavelmente acima de 3000 metros. Da mesma forma que os ventos alísios transportam a umidade em direção à zona equatorial, os contra-alísios transportam o ar seco em direção aos trópicos.

iii. Ventos de Oeste

Segundo GASCH (2011), os ventos de oeste sopram no sentido oeste-leste nos dois hemisférios em latitudes entre 35° e 65°. Suas velocidades são mais elevadas durante o inverno e mais baixas durante o verão, devido à pressão nos polos.

iv. Ventos Polares de Este

Segundo GASCH (2011), ventos polares de este são gerados devido à menor incidência dos raios solares nos polos, onde há alta pressão atmosférica e se deslocam de este para oeste em direção à linha do Equador (onde a pressão atmosférica é maior), mas se chocam com os

ventos de oeste nas zonas temperadas, próximas às latitudes de 60° norte e sul. A Figura 17 exemplifica a distribuição do perfil dos ventos constantes no globo terrestre.

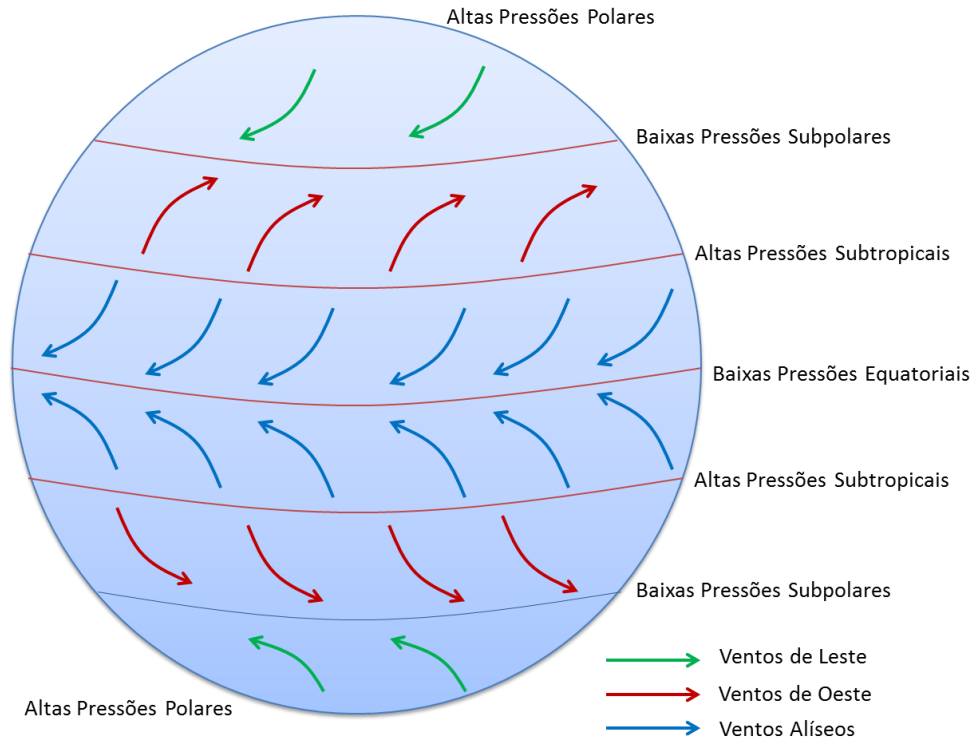


Figura 17 - Distribuição dos ventos constantes no globo terrestre – Pesquisado em: <http://www.old.knoow.net/cienterravida/geografia/ventosconstantes.htm>

b) Ventos Periódicos

Segundo CRESESB (2008), ventos periódicos são aqueles que possuem variação sazonal, ou seja, suas características são específicas para as estações do ano. Sua sazonalidade está relacionada à inclinação do eixo da Terra mediante o plano da sua órbita. São gerados devido à diferença de aquecimento entre o mar e o continente. Dentre os ventos periódicos existem as monções e as brisas.

i. Monções

Segundo PINTO (2013), são ventos periódicos os que, nas estações mais quentes, sopram dos oceanos em direção ao continente e nas estações mais frias sopram em sentido

oposto, dos continentes para os oceanos. Sua incidência é mais frequente na Austrália e em países da África e Ásia.

ii. Brisas

Segundo PINTO (2013), as brisas são ventos periódicos que tem origem em regiões costeiras por causa da diferença de temperatura entre o mar e a costa. Sua variação é diária, soprando do mar para a terra durante o dia, e da terra em direção ao mar à noite. Esta mudança no sentido do vento é explicada pelo aquecimento mais rápido da costa durante o dia, que causa certa queda na pressão, culminando na brisa marítima (que vai do oceano para a costa), contudo durante a noite a terra perde calor com mais facilidade do que o mar, e como consequência forma-se a brisa terrestre (da costa para o oceano).

c) Ventos Locais

Segundo CRESESB (2008), os ventos locais – também chamados de variáveis – são formados a partir de condições mais específicas de cada região, como as formas de relevo, florestas, centros urbanos, etc. São exemplos clássicos de ventos locais os que sopram entre montanhas e vales.

2.3.3.3. Distribuição Estatística de Velocidades

Segundo GASH (2011), para o dimensionamento adequado de aerogeradores, é necessário conhecer como a velocidade do vento varia. Com essa informação, os projetistas são capazes de especificar turbinas adequadas para cada localidade e, assim, otimizar os custos dos projetos.

Os dados eólicos são medidos através de anemômetros e armazenados em sistemas apropriados, que calculam a velocidade média do escoamento e o desvio padrão a cada 10 minutos. O período de análise deverá ser tão longo quanto possível, preferencialmente acima de 3 anos, pois desse modo, além das variações sazonais, serão computadas as variações anuais dos dados. Em posse destes dados é possível determinar graficamente na Figura 18 a distribuição da frequência das velocidades do vento plotadas em um histograma.

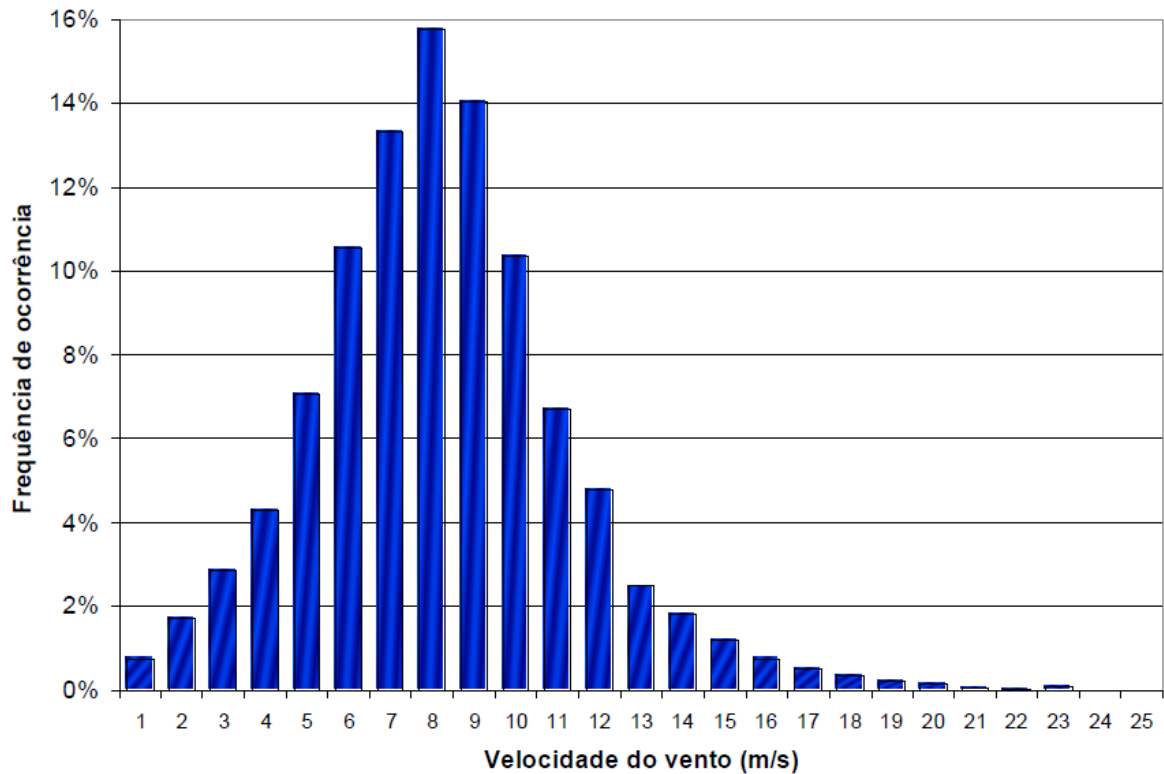


Figura 18 - Histograma de velocidades do vento – Fonte: CASTRO, 2003.

Entretanto, esta análise torna-se pouco prática, visto que os dados eólicos podem ser determinados estatisticamente, através de expressões analíticas que determinam a densidade de probabilidade. Segundo SILVA (1999), dentre as várias formas probabilísticas existentes para se estimar a frequência de velocidades, as mais próximas da realidade são as distribuições de Rayleigh e Weibull.

a) Distribuição de Rayleigh

A distribuição estatística de velocidades de Rayleigh também pode ser aplicada com boa precisão nos casos onde os ventos possuem velocidade moderada. Sua determinação é feita apenas conhecendo o valor da velocidade média, e obedece à Equação 3:

$$g(V) = \frac{\pi}{2} * \frac{V}{\bar{V}^2} * \exp \left[-\frac{\pi}{4} * \left(\frac{V}{\bar{V}} \right)^2 \right] \quad (3)$$

A aplicação da distribuição de Rayleigh é muitas vezes empregada devido à sua simplicidade, fato que em contrapartida torna seus resultados menos confiáveis quando se trata de regimes nos quais a velocidade dos ventos é mais alta. (GASCH, 2011). A Figura 19 exemplifica graficamente a distribuição de Rayleigh para diferentes valores de velocidade média.

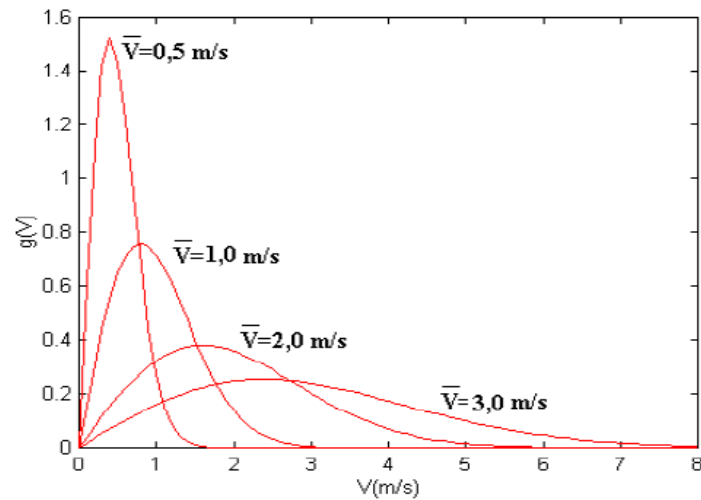


Figura 19 - Distribuição de Rayleigh para diferentes valores de velocidade média –
Fonte: SILVA, 1999.

b) Distribuição de Weibull

Segundo PINTO (2013), a distribuição estatística de Weibull apresenta maior precisão quando comparada à distribuição de Rayleigh, aproximando-se de forma razoável do histograma de velocidades do vento. Esta distribuição indica a probabilidade (em porcentagem) de ocorrer determinada velocidade. A função pode ser representada matematicamente pela Equação 4:

$$f(u) = \frac{k}{c} * \left(\frac{u}{c}\right)^{k-1} * e^{-\left(\frac{u}{c}\right)^k} \quad (4)$$

Esta maior precisão está associada à maior complexidade na representação matemática da função, que é caracterizada por dois parâmetros c e k . O parâmetro de escala c associa-se à velocidade média dos ventos (m/s), enquanto que o parâmetro de forma (k) é adimensional, indicando a uniformidade na distribuição de velocidades. (SILVA, 1999). Isso quer dizer que

para um fator de forma baixo haverá uma grande variação das velocidades do vento em relação à velocidade média, ao passo que em uma distribuição com fator de forma alto haverá maior concentração do perfil de velocidades em torno da velocidade média. A Figura 20 representa a distribuição de Weibull para velocidade média dos ventos de 6 m/s e 7,5 m/s.

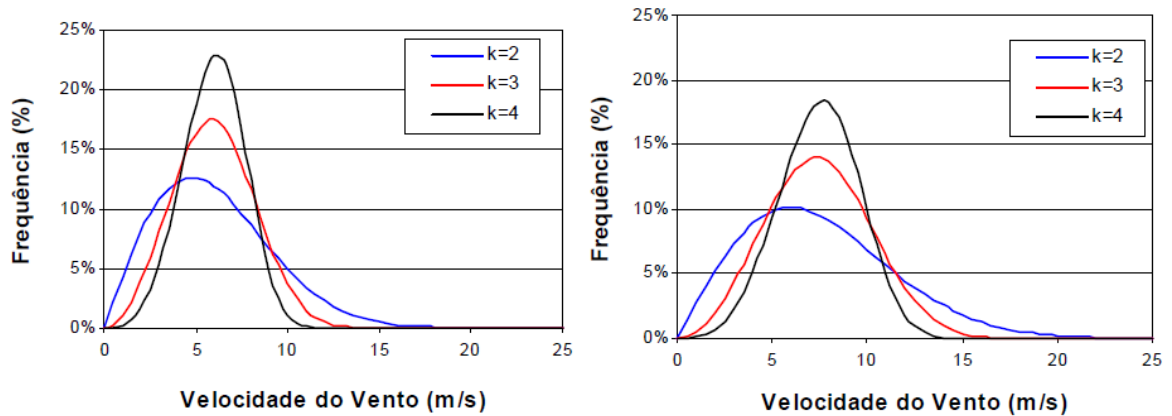


Figura 20 - Distribuição de Weibull para $V_{med} = 6$ m/s (esquerda) e $V_{med} = 7,5$ m/s (direita)
– Fonte: LEMOS, 2005.

De forma prática, a distribuição estatística de Rayleigh se trata da própria distribuição de Weibull, simplificada com o parâmetro de forma $k=2$, pois este valor se ajusta bem em regimes de ventos com velocidade moderada, conforme ilustra a Figura 21.

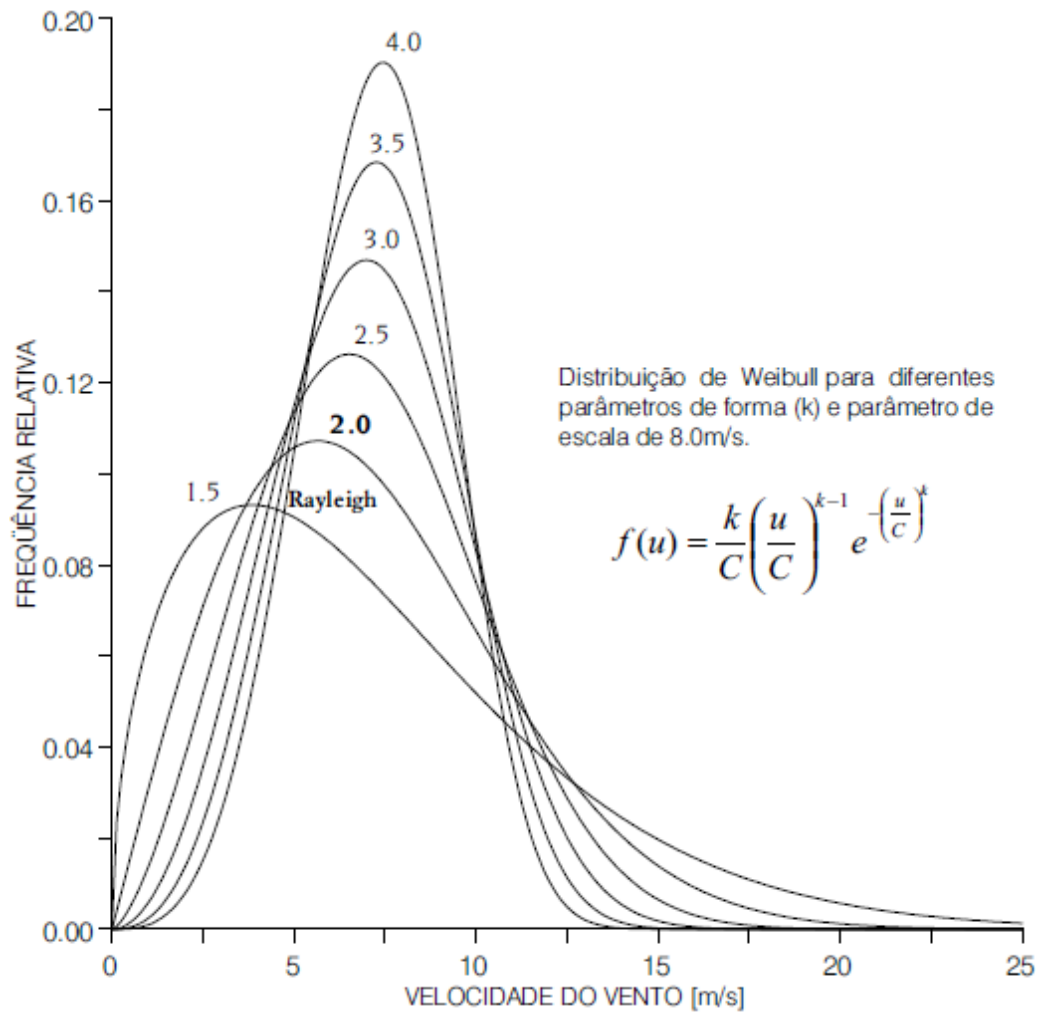


Figura 21 - Distribuições de Weibull e Rayleigh – Fonte: AMARANTE, 2002.

2.4. Aerogeradores

Segundo MARQUES (2004), durante as últimas décadas, com os avanços tecnológicos e se tratando de uma fonte de energética renovável, os aerogeradores tornam-se populares cada vez mais rápido. A função dos aerogeradores é converter a energia cinética provenientes dos ventos em eletricidade, o funcionamento é bem simples, o rotor capta a energia cinética dos ventos, passa pela caixa multiplicadora onde a energia mecânica será transmitida para o gerador com valores de torque e de velocidade adequados, em alguns modelos de aerogeradores este procedimento acontece sem a caixa multiplicadora, ou seja, a ligação da turbina é feita de forma direta no gerador deixando assim a rotação de ambos iguais. Na etapa de transmissão da energia mecânica para energia elétrica pode ser feita de duas formas de indução ou do tipo síncrono. Este funcionamento é representado esquematicamente pela Figura 22.

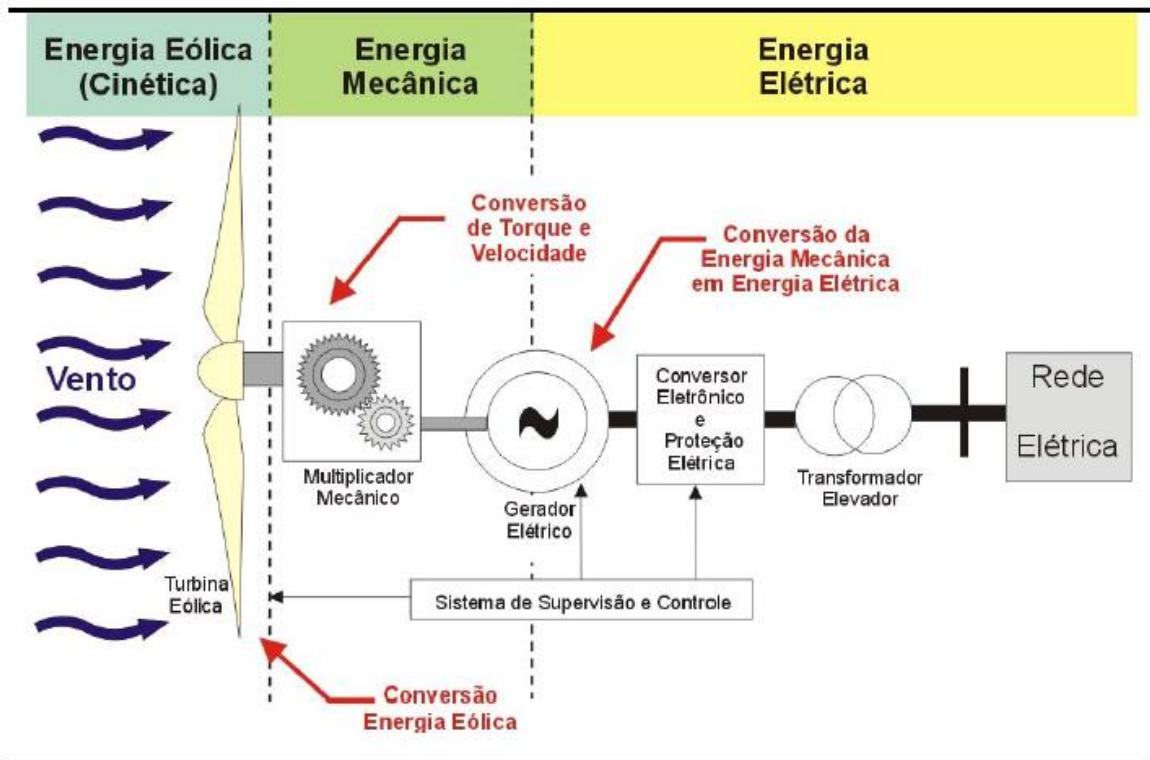


Figura 22 - Etapas da conversão de energia em um aerogerador – Fonte: PAVINATTO, 2005.

Atualmente as turbinas eólicas podem operar de duas formas distintas de acordo com a velocidade da sua rotação, se os mesmos operarem com velocidade de rotação constante, o gerador é ligado diretamente à rede elétrica somente utilizando um soft-starter ou se a velocidade da rotação for variável, ou seja, o rotor pode girar a qualquer velocidade dentro da admitida.

Segundo HANSEN (2001), o dinamarquês Riisager por volta da década de 90 projetou e desenvolveu uma turbina de 22 kW, para tornar um projeto de baixo custo ele utilizou peças de automóveis e tratores. Em busca por melhores eficiências, foram projetados aerogeradores com potências que variam de 500 e 1500 KW. Devido a isto a produção dos aerogeradores vem se desenvolvendo na potência das máquinas e na qualidade produzida.

Atualmente as turbinas mais utilizadas são as de grande porte e várias vezes são compostas de três pás montadas em um rotor horizontal. Entretanto, existem inúmeros tipos de aerogeradores que normalmente são utilizados para equipamentos de pequeno porte, como por exemplo as turbinas com eixo horizontal como as bipás, monopás, quadripás e multipás, além das turbinas Darrieus e Savonius, de eixo vertical, assim como vários outros dispositivos. A Figura 23 mostra graficamente a evolução dos valores de potência das turbinas em função do diâmetro do rotor e de acordo com o ano.

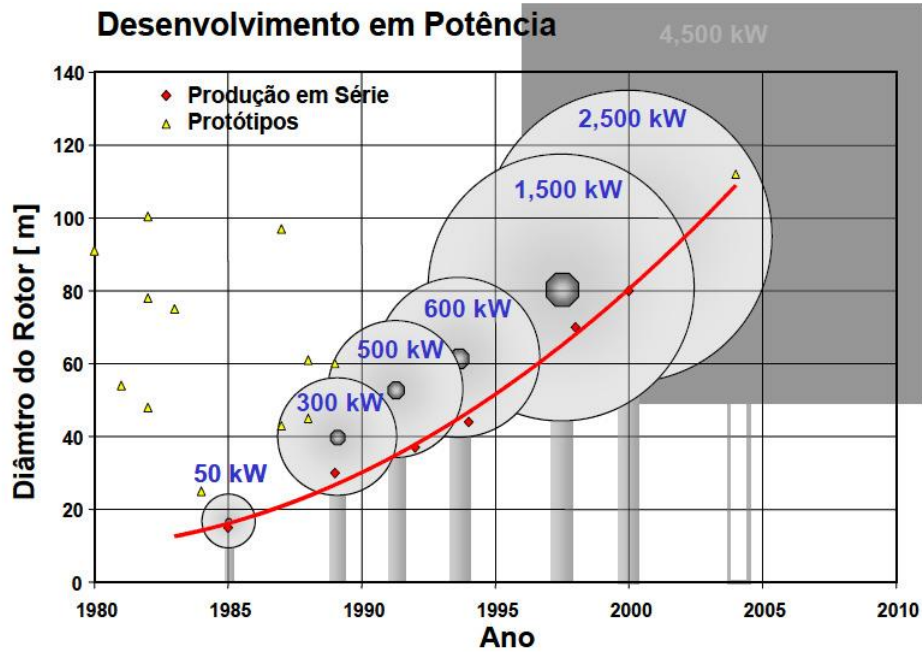


Figura 23 - Crescimento da potência dos aerogeradores nos últimos anos – Fonte: MOLLY, 2001.

Segundo CASTRO (2003), as partes responsáveis pelo funcionamento dos aerogeradores estão ilustradas na Figura 24.

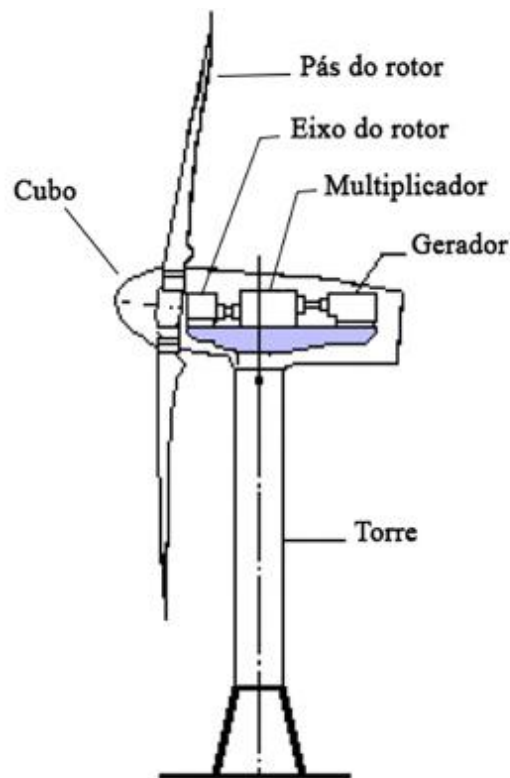


Figura 24 – Principais componentes de um aerogerador – Fonte: GARCIA, 2004.

- Torre: Sustenta o peso do aerogerador e é a responsável pelo posicionamento na altura determinada pelo projeto, mantendo nacelle e rotor na altura mais adequada para o funcionamento. Geralmente, as torres são confeccionadas em metal ou concreto. Os aerogeradores de pequeno porte são sustentados por cabos tensores enquanto as turbinas de médio e de grande porte são autoportantes.
- Nacelle: é o compartimento montado na parte superior da torre, responsável por abrigar todo o sistema do gerador, no qual contém: mancais, eixo de transmissão, caixa multiplicadora, freios, além de todos os sistemas de controle e o mecanismo de guinada da turbina.
- Gerador: componente responsável por transformar a energia mecânica de rotação do eixo em energia elétrica.
- Multiplicador: Este é o elemento responsável por elevar a rotação eixo do rotor e transmiti-la até o gerador com objetivo de se adequar à velocidade ótima para o gerador elétrico. Por exemplo: A velocidade angular dos rotores normalmente tem uma variação entre os valores de 20 a 150 rotação por minuto, por conta das restrições de velocidade na extremidade da pá. Todavia, geradores, principalmente os síncronos, operam em rotações bem mais superiores, entre 1.200 a 1.800 rpm, fazendo assim necessária a instalação da caixa multiplicadora.
- Rotor: conjunto formado por pás, cubo e eixo com função de converter a energia cinética proveniente do vento em trabalho no eixo.
- Pás: componentes responsáveis por captar a energia cinética proveniente da movimentação do vento e transformar parte desta em torque no eixo, ou seja, ao acionar as pás, o vento transfere parte da sua energia para o eixo do rotor. O design das pás do rotor é determinado pelos perfis aerodinâmicos selecionados, a geometria interna e externa e os materiais escolhidos.
- Cubo: componente de fixação das pás, responsável por transmitir o movimento rotacional ao eixo e no seu interior são montados os mecanismos de controle de passo.

- Eixo: É o encarregado do acoplamento do cubo ao gerador, transmitindo o movimento rotacional do rotor para o multiplicador, ou diretamente ao gerador.

2.4.1. Aerogeradores de Eixo Vertical

Segundo MÜLLER (2015), turbinas de eixo vertical são aquelas em que o rotor é acionado pelos ventos de forma perpendicular ao eixo de rotação.

Entre os benefícios desses aerogeradores podemos apontar a baixa emissão de ruídos, lidam melhor em condições de turbulências e a sua estética pode ser atrativa, devido a essas considerações eles são mais apropriados para regiões urbanas ou semiurbanas. Fatores como a direção dos ventos não interferem em seu rendimento.

Sua eficiência é baixa quando comparada aos aerogeradores de eixo horizontal, pois o vento junto ao solo é de fraca intensidade, o que implica com um menor rendimento dos mesmos.

As turbinas de eixo vertical podem ser classificadas em:

- Rotor Savonius

Fundamenta-se no princípio do acionamento diferencial. Todas as faces do corpo oco adquirem um esforço dos ventos com diferentes intensidades, resultando assim em um binário que resulta na rotação do conjunto. Devido o roto de Savonius ser movido em sua maioria pela força de arrasto, sua eficiência atinge o auge de até 20% enquanto opera com ventos fracos. A Figura 25 ilustra o rotor Savonius.

Savonius-Rofor

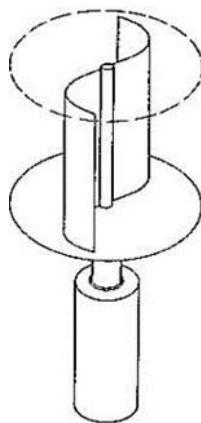


Figura 25 - Representação da turbina de eixo vertical tipo Savonius –
Fonte: ÓSKARSDÓTTIR, 2014.

- Rotor Darrieus

É composto por duas ou três pás, operando com bastante eficácia, pois independente do caminho que o vento esteja soprando, ela pode chegar a 40% em ventos fortes. Essa turbina é acionada por forças de sustentação, absorvidas por um conjunto de perfis aerodinâmicos, que são lâminas reais e possuem forma de pás de turbina, alcançando assim velocidades bem mais altas do que a real velocidade do vento. Sua representação é dada pela Figura 26.

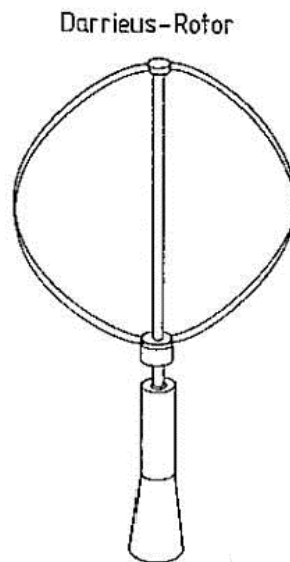


Figura 26 - Representação da turbina de eixo vertical tipo Darrieus –
Fonte: ÓSKARSDÓTTIR, 2014.

- Rotor Darrieus tipo H

É um modelo de turbinas eólicas com lâminas retas que requer raios longos para conectar as lâminas ao cubo e para minimizar o arrasto, esses raios devem ter um perfil aerodinâmico e possui fundamento bem simples. A energia é capturada dos ventos por um componente da força de sustentação L , operando na direção de rotação. A sua representação é dada pela Figura 27.

H-Darrieus-Rotor

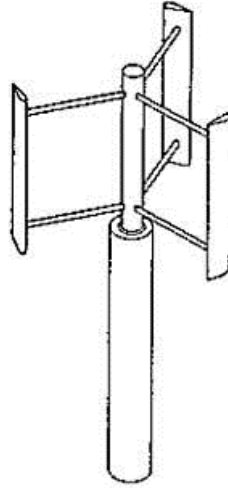


Figura 27 - Representação da turbina de eixo vertical tipo Darrieus H –
Fonte: ÓSKARSDÓTTIR, 2014.

2.4.2. Aerogeradores de Eixo Horizontal

Segundo JÚNIOR (2009), os rotores de eixo horizontal têm o eixo de rotação paralelo à direção tomada pelos ventos, e são acionados pelas forças de sustentação (lift) ou de arrasto (drag), porém, as forças de sustentação permitem maior aproveitamento da potência disponível quando comparada às forças de arrasto, ao se tratar da mesma velocidade de vento. Estes rotores trabalham com maior potência por unidade de área de extração do vento e são utilizados em aplicações de alta e baixa potência. As turbinas eólicas são constituídas geralmente com uma ou três pás, mais também existem as que possuem perfil aerodinâmico são denominadas multipás (mais de três pás). Apesar de possuir elevado custo, as turbinas com eixo horizontal são bem mais utilizadas em relação às de eixo vertical, principalmente devido ao seu ótimo rendimento, além do fato de serem mais resistentes a esforços mecânicos. Aerogeradores de eixo horizontal são ilustrados na Figura 28.



Figura 28 - Representação de Aeroeradores de Eixo Horizontal – Fonte: MÜLLER, 2015.

Os aerogeradores de eixo horizontal classificam-se em duas categorias, upwind e downwind, conforme descrito abaixo:

- Upwind

Os ventos assopram na parte da frente das pás, o rotor é orientado através de um dispositivo do motor pela direção dos ventos. Como uma das suas vantagens pode se citar o som de torre que é reduzido, entretanto como desvantagem tem a questão da nacela ser estendida para posicionar o rotor suficientemente longe da torre evitando problemas graves de lâmina. O aerogerador tipo Upwind é ilustrado na Figura 29.

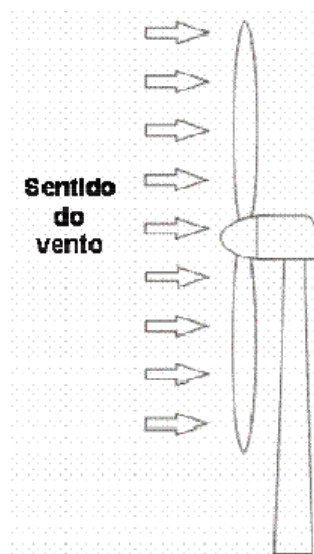


Figura 29 - Representação do aerogerador de eixo horizontal tipo Upwind – Fonte: MÜLLER, 2015.

- Downwind

Os ventos assopram na parte de trás, nesse caso o rotor é auto orientável e flexível. Essas lâminas são flexíveis não havendo assim problema na torre e podendo ter um menor custo, porém devido esta flexibilidade pode causar turbulência e aumentar a fadiga das lâminas. Um aerogerador Downwind é ilustrado esquematicamente na Figura 30.

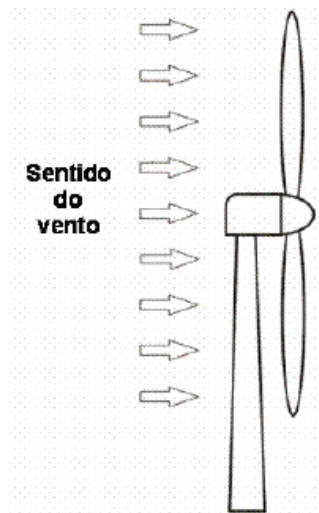


Figura 30 - Representação do aerogerador de eixo horizontal tipo Downwind –
Fonte: MÜLLER, 2015.

2.4.3. Energia e Potência Extraídas dos Ventos

Segundo GASCH (2011), a quantidade total de energia disponível nos ventos pode ser entendida como a energia cinética existente no deslocamento de determinada massa de ar a uma determinada velocidade, e pode ser calculada através da Equação 5:

$$E = \frac{m * v^2}{2} \quad (5)$$

Onde:

E = Energia cinética (J)

m = Massa de ar (kg)

v = Velocidade do vento (m/s)

Como a potência é a energia por unidade de tempo, tem-se a Equação 6:

$$P = \frac{\dot{m} * v^2}{2} \quad (6)$$

Onde:

\dot{m} = Vazão mássica (kg/s)

Associando a vazão mássica a uma seção transversal de referência, tem-se a Equação 7:

$$\dot{m} = \rho * A * v \quad (7)$$

Onde:

ρ = massa específica do ar (kg/m³)

A = área da seção transversal considerada (m²)

v = velocidade do vento (m/s)

Substituindo-se a Equação 7 na Equação 6, obtém-se a potência disponível nos ventos, que é função da sua velocidade, massa específica do ar e área considerada, que é descrita pela Equação 8:

$$P = \frac{(\rho * A * v) * v^2}{2} = \frac{\rho * A * v^3}{2} \quad (8)$$

Onde:

P = potência disponível no vento (W)

A = área da seção transversal considerada (m²)

v = velocidade dos ventos (m/s)

ρ = massa específica do ar (kg/m³)

Através da Equação 8 pode-se observar a proporcionalidade da potência do vento com a sua velocidade, ou seja, se a velocidade dobrar, tem-se 8 vezes a potência anterior, ao passo que se a velocidade se reduzir à metade, a potência reduz para apenas 12,5% da potência anterior. Por esse motivo é tão importante a escolha de locais com boas velocidades médias de vento para a instalação de aerogeradores.

2.4.4. Densidade de Potência

Segundo PINTO (2013), o potencial eólico de determinada localidade, independente da turbina a ser instalada, também pode ser determinado através da densidade de potência (D_p), dividindo-se a potência pela área da seção transversal, expressa pela Equação 10:

$$D_p = \frac{\rho * v^3}{2} \quad (10)$$

Onde:

D_p = densidade de potência (W/m^2)

A relação existente entre a densidade de potência e a velocidade do vento pode ser plotada graficamente na Figura 31, considerando que a massa específica do ar é tida como constante.

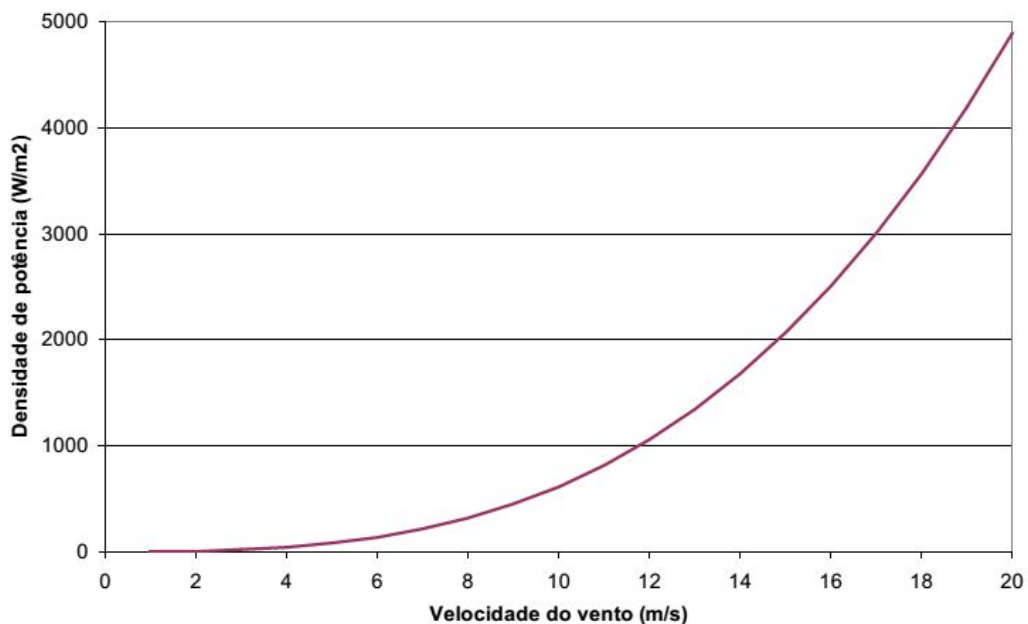


Figura 31 - Gráfico relacionando “Velocidade do vento x Densidade de potência” –
Fonte: CASTRO, 2003.

2.4.5. Coeficiente de Potência (C_p)

Segundo PINTO (2013), GASCH (2011) e HAU (2005), a extração da energia cinética dos ventos para a turbina é feita através do rotor, que reduz a velocidade do escoamento da massa de ar e, conseqüentemente, a sua energia cinética. Para que haja trabalho mecânico no rotor da turbina é preciso que a velocidade logo após o rotor seja menor do que a velocidade anterior, porém não nula ($v \neq 0$). Entretanto, é impossível o aproveitamento total da potência disponível no vento, já que a velocidade dos ventos na saída da turbina é maior do que zero, caracterizando assim uma parcela de energia cinética não aproveitada pela turbina. Para o aproveitamento total da energia disponível, seria preciso que a velocidade posterior à turbina fosse zero, o que se torna impossível mediante a lei da continuidade, caracterizando que não há escoamento e, portanto, a potência extraída é nula. Em contrapartida, se a velocidade na saída da turbina for igual à anterior, a energia cinética será a mesma antes e depois da turbina e, portanto, a potência extraída também será nula. Com base nestes conceitos físicos, deve ser adotado um fator chamado coeficiente de potência (C_p), que indica a parcela da potência eólica que será absorvida pelo rotor da turbina. O coeficiente de potência é um fator adimensional, e pode ser definido através da Equação 11:

$$C_p = \frac{P_t}{P_v} = \frac{\text{Potência extraída pela turbina}}{\text{Potência disponível no vento}} \quad (11)$$

2.4.6. Número de Pás

Segundo PINTO (2013), uma decisão fundamental no projeto das turbinas é o número de pás. Talvez a turbina eólica mais familiar seja a multipás, de bombeamento de água, frequentemente vista em fazendas. Essas máquinas são radicalmente diferentes daquelas construídas para gerar eletricidade. Para bombear água, o cata-vento tem que fornecer um alto torque de partida para superar o peso e o atrito de estrutura de bombeamento do poço. Elas têm também de operar em baixas velocidades de vento, a fim de gerar um bombeamento de água contínuo ao longo do ano. O projeto das multipás apresenta uma grande área do rotor voltada para o vento, que capacita operação de baixa velocidade angular e elevado torque. Turbinas eólicas com elevado número de pás operam com menor velocidade rotacional do que as turbinas com menores quantidades de pás. À medida que aumenta o número de rotações por minuto

(rpm) da turbina, a turbulência causada por uma pá afeta a eficiência da pá seguinte. Com menos pás, a turbina pode girar mais rápido antes que essa interferência se torne excessiva.

As turbinas tripás apresentam uma operação mais suave, desde os impactos de interferência da torre e a variação da velocidade do vento com a altura sejam uniformemente transferidos do rotor para o eixo de transmissão. Elas também tendem a ser mais silenciosas. As três pás, entretanto, adicionam um peso e um custo consideráveis à turbina. O rotor de três pás também é mais difícil de erguer e trabalhar com a nacele durante a construção ou a reposição de uma pá. E com relação à turbina de uma única pá (com um contrapeso, conhecida por monóptero) já se tentou o uso, mas nunca se julgou que valesse a pena. Há diversas desvantagens envolvidas. As turbinas de uma pá precisam de uma massa para funcionar como contrapeso e sua eficiência aerodinâmica é bem reduzida em razão das perdas na ponta da pá.

Na teoria, o coeficiente de potência aumenta com o número de pás; contudo, turbinas com um elevado número de pás apresentam uma queda no coeficiente de potência. Rotores com menos pás giram mais rápido, quase compensando a sua desvantagem de possuir uma área física menor das pás. Se for analisada a dependência do coeficiente de potência diante do número de pás, teremos uma preferência por turbinas de duas ou três pás.

2.4.7. A Solidez de uma Turbina Eólica

Segundo PINTO (2013), para caracterizar o formato geométrico da pá, alguns parâmetros bem conhecidos da tecnologia aeronáutica precisam ser definidos, como o conceito da solidez de um rotor, que é a razão entre a área total da pá e a área varrida pela pá. Em uma turbina eólica, as pás descrevem a área circular varrida, A_v , que determina a potência do vento que é interceptada. Entretanto, a área total ocupada pelas pás é muito maior que a área varrida, A_v . A relação entre essas duas áreas é chamada solidez, S , dada percentualmente pela Equação 12:

$$S = \frac{(N * A_p)}{A_v} \quad (12)$$

Onde:

N = número de pás

A_p = área de cada pá

A_v = área varrida pelo rotor

A força incidente do vento sobre as pás, e conseqüentemente sobre o torque da turbina, é proporcional à solidez. Sob uma faixa razoável de solidez, a eficiência da turbina independe desse parâmetro. A potência, para uma dada velocidade, depende apenas da área varrida, o que significa que, aumentando a solidez, se aumenta o torque, porém diminui a taxa de rotação. Turbinas com alta solidez têm torque elevado, porém giram lentamente. Resumidamente, temos:

- Baixa solidez = alta velocidade = baixo torque
- Alta solidez = baixa velocidade = alto torque

A solidez de uma turbina também apresenta efeitos na sua performance. Uma baixa solidez produz uma curva ampla e plana, significando que o coeficiente de potência mudará muito pouco durante uma faixa razoável da TSR (Tip-SpeedRatio). TSR é definido como a relação entre a velocidade linear na ponta da pá e a velocidade do vento (U), pela Equação 13:

$$\lambda = \frac{\omega * R}{U} \quad (13)$$

Onde:

- λ = “Tip-SpeedRatio”;
- ω = velocidade angular das pás do rotor [rad/s];
- R = raio do rotor [m];
- U = velocidade do vento [m/s].

Quão maior for o TSR (λ), maior também será o nível de ruído causado pela turbina e maiores serão as forças centrífugas. Portanto, as pás precisarão apresentar maior resistência para suportar os esforços. Além do mais, o TSR (λ) relaciona-se com a eficiência da turbina, e direciona para um valor ótimo para determinado projeto da turbina.

Alta solidez produz uma curva de desempenho estreita, tornando a turbina muito sensível a mudanças da TSR. Uma solidez ótima parece ser alcançada com três pás, porém duas pás podem ser uma alternativa aceitável, pois é mais ampla e isso pode resultar em uma captura maior de energia. Pode-se argumentar que uma boa solução seria conseguida com um grande número de pás com solidez individual baixa, mas isso levaria a um considerável aumento nos custos da produção.

O coeficiente de potência também pode ser obtido através da Equação 14, que relaciona o C_p ao TSR (tip-speed ratio), representado pela letra grega lambda (λ):

$$C_p = 4 * \lambda * (1 - \lambda)^2 \quad (14)$$

2.4.8. Limite de Betz

Segundo PINTO (2013), GASCH (2011) e HAU (2005), o valor máximo ideal para aproveitamento da energia eólica, definido pelo físico alemão Albert Betz, em aerogeradores nunca será maior do que 16/27 (59,3%). A este valor atribui-se o nome de limite de Betz, que foi calculado considerando um esquema como a da Figura 32, onde V_1 é a velocidade do vento anterior ao rotor, V é a velocidade dos ventos na turbina, V_2 é a velocidade do vento posterior ao rotor, S_1 é a seção do tubo antes da turbina, S é a seção da turbina e S_2 é a seção do tubo depois da turbina.

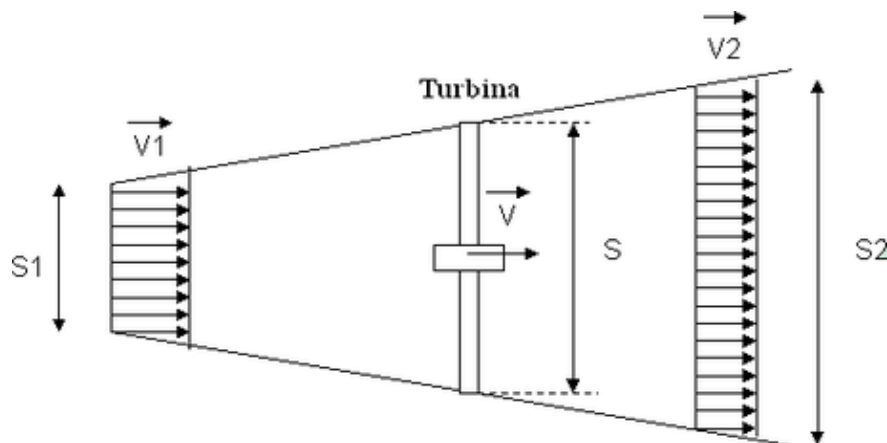


Figura 32 - Ilustração da Lei de Betz – Fonte: GASCH, 2011.

Através da lei da continuidade de Bernoulli e das fórmulas de potência associadas ao esquema ilustrado na figura 32, Betz foi capaz de plotar o gráfico da Figura 33, que associa a relação entre as velocidades de saída e entrada da turbina (V_2/V_1) com o coeficiente de potência (C_p) correspondente.

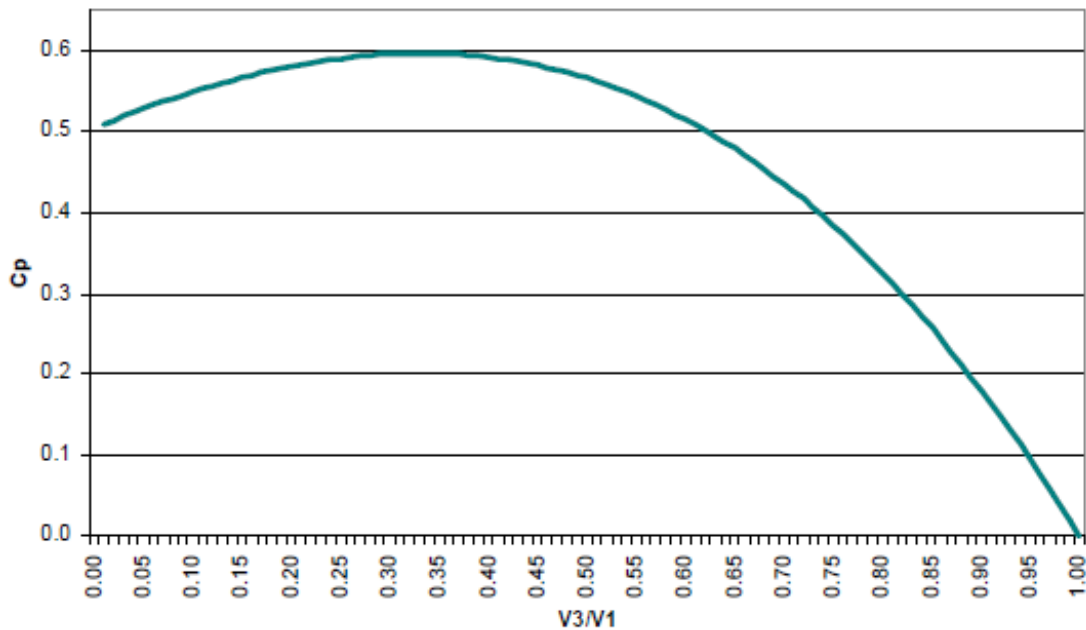


Figura 33 - Gráfico Cp x V2/V1 – Fonte: CRESESB, 2008.

De acordo com o gráfico da figura 33, o coeficiente de potência máximo (limite de Betz) tem o valor de 0,593, e está associado à razão de velocidades de saída e entrada da turbina igual a 1/3. Portanto, o máximo aproveitamento teórico através de um aerogerador é de 59,3%.

2.4.9. Potência Real

Contudo, este valor de rendimento é ideal, não considerando as perdas inevitáveis em um sistema mecânico, como perdas por fricção no perfil do rotor, nas pontas das pás devido à geração de vórtices, atrito entre as engrenagens da transmissão, entre outros tipos de perda no gerador. O cálculo da potência real aproveitada pela turbina é dado pela Equação 15:

$$P_{\text{real}} = \frac{c_p * \rho * A * v^3}{2} \quad (15)$$

Onde:

Cp = Coeficiente de potência

ρ = Densidade do ar (kg/m³)

A = Área varrida pelo rotor (m²)

v = Velocidade do vento (m/s)

2.4.10. Curva de Potência

Segundo PINTO (2013), GASCH (2011) e HAU (2005), as características de desempenho dos aerogeradores são conhecidas através da sua curva de potência, a qual relaciona valores de potência gerada com as respectivas velocidades do vento. Cada modelo de aerogerador possui sua curva de potência, que deverá ser fornecida pelo fabricante. A Figura 34 ilustra um exemplo de curva de potência para uma turbina de 660kw.

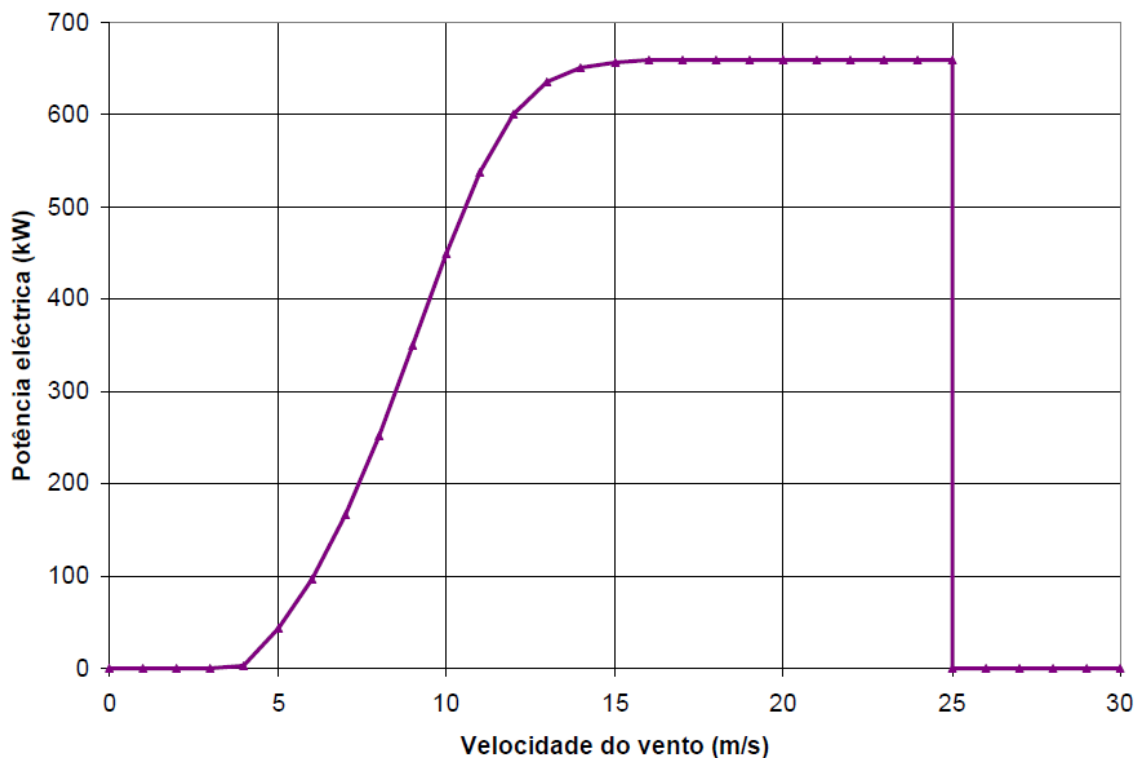


Figura 34 - Curva de potência de uma turbina de 660 kw – Fonte: CASTRO, 2003

Analisando o gráfico da Figura 34, é possível observar características específicas da turbina, como:

- Velocidade mínima - velocidade na qual inicia-se a geração de potência
- Velocidade nominal - velocidade na qual se obtém a potência nominal
- Potência nominal – potência máxima gerada pela turbina
- Velocidade de corte (cut off) – velocidade na qual a turbina é parada para evitar esforços prejudiciais

A definição da curva de potência de uma turbina eólica deverá seguir as recomendações técnicas da norma internacional IEC 61400-12-1: Medições de desempenho de geração.

Para uma maior precisão na curva de potência das turbinas, a massa específica do ar deverá ser ajustada de acordo com a do local onde a turbina for aplicada, corrigindo os cálculos de potência. Como é mostrada na Figura 35.

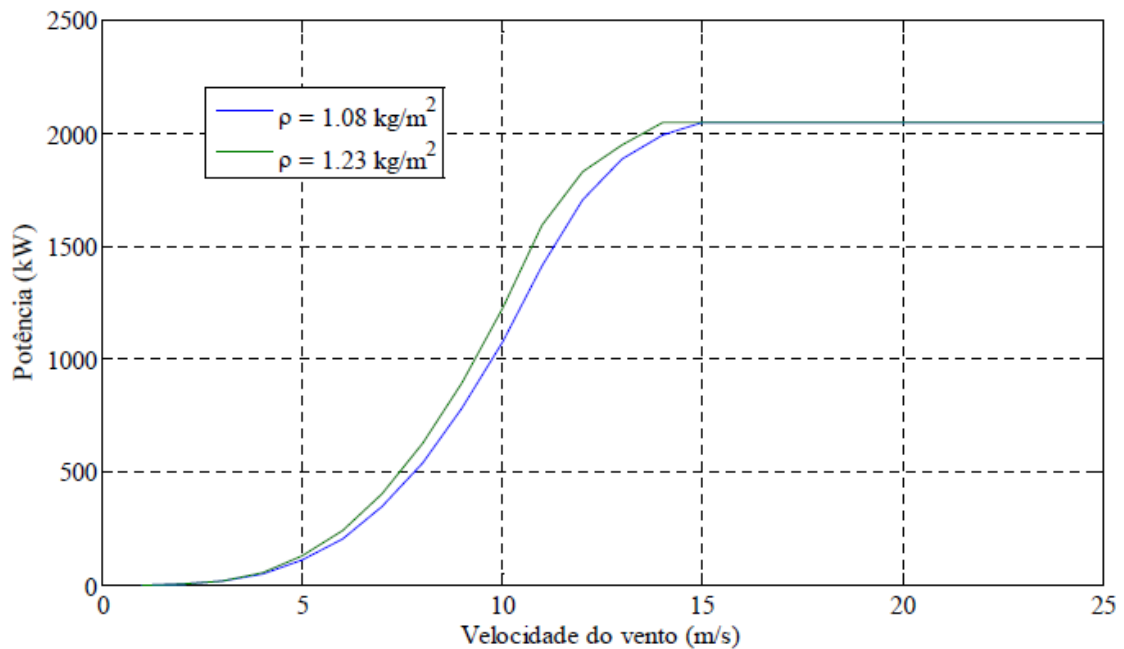


Figura 35 - Curvas de potência para diferentes massas específicas do ar – Fonte: JERVELL, 2008

A Figura 35 ilustra duas curvas de potência diferentes para uma mesma turbina eólica, operando em duas condições distintas de massa específica do ar, onde se observa que para uma maior massa específica, maior será a potência gerada em uma mesma velocidade.

2.4.11. Energia Produzida

Segundo CASTRO (2003), para estimar a energia produzida por um aerogerador devem-se levar em consideração dois fatores essenciais, que são a distribuição estatística dos ventos no local e a curva de potência associada à turbina. O procedimento para calcular a energia média gerada consiste em um somatório da multiplicação do valor da potência obtida para cada valor de velocidade do vento pela probabilidade desta velocidade ocorrer, conforme a Equação 16:

$$DP = \sum_{V=0}^{25} P_T(v) * \rho(v) \quad (16)$$

Onde:

$P_t(v)$ = Potência gerada na turbina;

$P(v)$ = Distribuição estatística de velocidades.

Com a finalidade de estimar a produção de energia bruta anual multiplica-se a distribuição de potência do aerogerador pelas 8760 horas do ano, conforme a Equação 17:

$$E_B = 8760 * \sum_{V=0}^{25} P_T(v) * \rho(v) \quad (17)$$

A Figura 36 mostra a produção anual de energia para cada velocidade do vento. Para calcular a energia bruta total gerada em um ano basta efetuar o somatório de todas as colunas do gráfico.

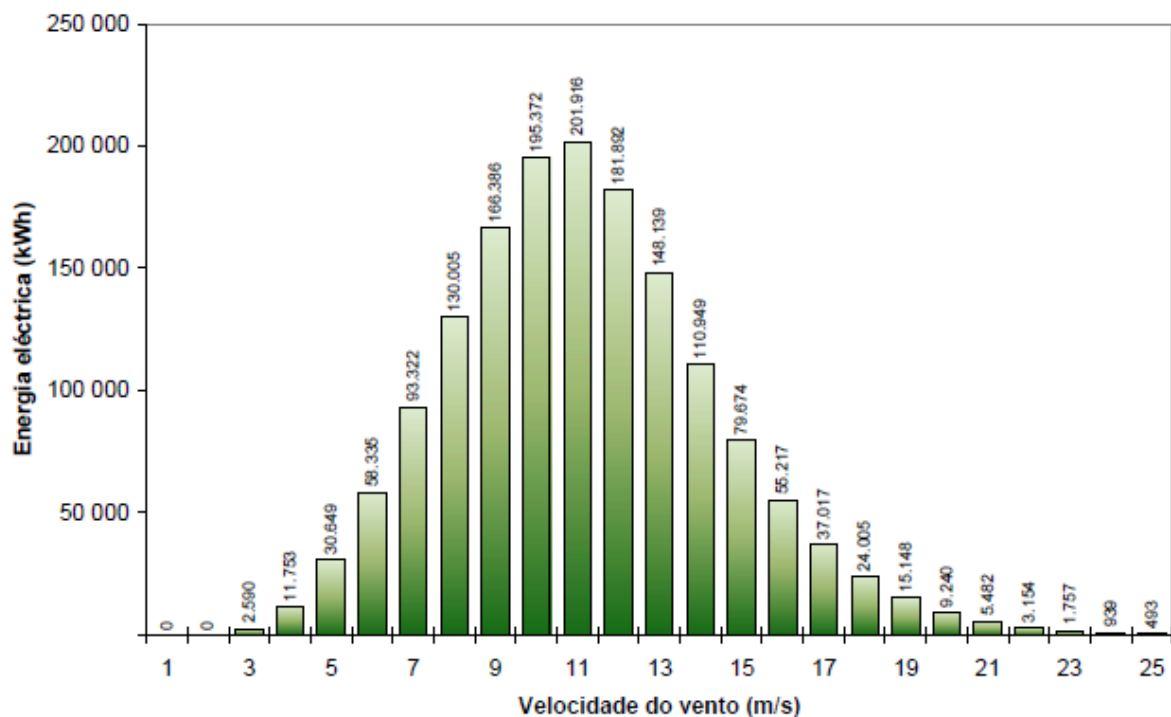


Figura 36 - Distribuição de energia gerada anualmente por velocidade do vento – Fonte: CASTRO, 2003.

2.4.11.1. Energia Bruta Corrigida

Segundo GASCH (2011), para adequar o resultado da energia bruta produzida em função da temperatura do ar e da pressão atmosférica, utiliza-se os fatores de correção C_P e C_T , descritos pelas Equações 18 e 19, respectivamente.

$$C_P = \frac{P}{P_0} \quad (18)$$

$$C_T = \frac{T_0}{T} \quad (19)$$

Onde:

C_P = Coeficiente de potência

C_T = Coeficiente de torque

P = Pressão atmosférica média no local de instalação da turbina

P_0 = Pressão atmosférica padrão CNTP (1 atm)

T = Temperatura absoluta no local de instalação da turbina (média)

T_0 = Temperatura absoluta padrão (288,15 K)

Com isso, utiliza-se a Equação 20 para calcular a energia bruta corrigida:

$$E_{B,C} = E_B * C_P * C_T \quad (20)$$

2.4.11.2. Energia Líquida Produzida

Segundo GASCH (2011), no cálculo da energia líquida produzida, leva-se em conta uma série de outros coeficientes, arbitrados como λ .

O primeiro, λ_a (array losses) é o fator que representa as perdas do sistema. Estas perdas acontecem nos sistemas mecânicos, magnéticos e elétricos do aerogerador, como no multiplicador, nos disjuntores, transformadores, capacitores, etc.

O segundo coeficiente, $\lambda_{i,s}$ demonstra as perdas devido ao congelamento e deposição de sujeira no rotor.

O terceiro, λ_d é alterado em função do tempo perdido quando a turbina está inoperante. Estas paradas estão associadas à manutenção das turbinas, e são de suma importância para o bom funcionamento e garantia da vida útil da turbina. Os fabricantes vêm se esforçando para garantir uma disponibilidade do equipamento em torno de 97 a 98%.

Por último, o coeficiente λ_m considera outras perdas diversas. Sendo assim, o cálculo da energia líquida extraída obedece à Equação 21:

$$E_L = E_{B,C} * (1 - \lambda_a) * (1 - \lambda_{i,s}) * (1 - \lambda_d) * (1 - \lambda_m) \quad (21)$$

Para calcular a geração de energia de um parque eólico é necessário, além dos fatores já mencionados, um estudo dos efeitos de sombreamento e turbulência dos ventos.

2.4.12. Perfil Aerodinâmico das Pás

Segundo RODRIGUES (2014), as pás de um aerogerador tem a função de converter a energia cinética dos ventos em torque no rotor. Essa conversão está condicionada às reações das pás aos efeitos do escoamento do ar sobre o perfil aerodinâmico, que é projetado com as mesmas características de uma asa de avião. Existem duas forças de reação que o vento exerce sobre as pás, que são: força de arrasto, que atua na mesma direção do escoamento, e força de sustentação, que atua na perpendicularmente à direção do escoamento. Estas forças serão explicadas no decorrer deste tópico. Para que o perfil aerodinâmico das pás funcione adequadamente, resultando nas forças de arrasto e de sustentação desejadas, é necessário que o escoamento do ar seja laminar nos dois lados do perfil e para isso é requerido o conhecimento do número de Reynolds. Maiores números de Reynolds são obtidos com maiores valores de corda, altas velocidades e baixas altitudes, enquanto menores números de Reynolds podem ser conseguidos com menores valores de corda, menores velocidades e maiores altitudes. A Figura 37 mostra o escoamento do vento sobre o perfil aerodinâmico.

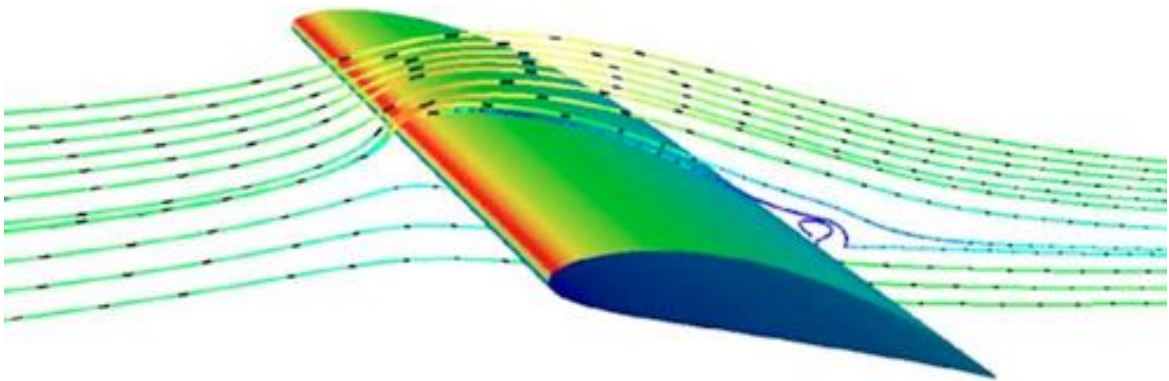


Figura 37 - Escoamento do vento sobre o perfil aerodinâmico – Fonte: RODRIGUES, 2014.

O perfil aerodinâmico, que também pode ser chamado de aerofólio, é uma superfície construída de modo que se obtenham forças aerodinâmicas de reação originadas pelo escoamento do ar a sua volta. A Figura 38 apresenta um perfil aerodinâmico e ressalta suas características fundamentais.

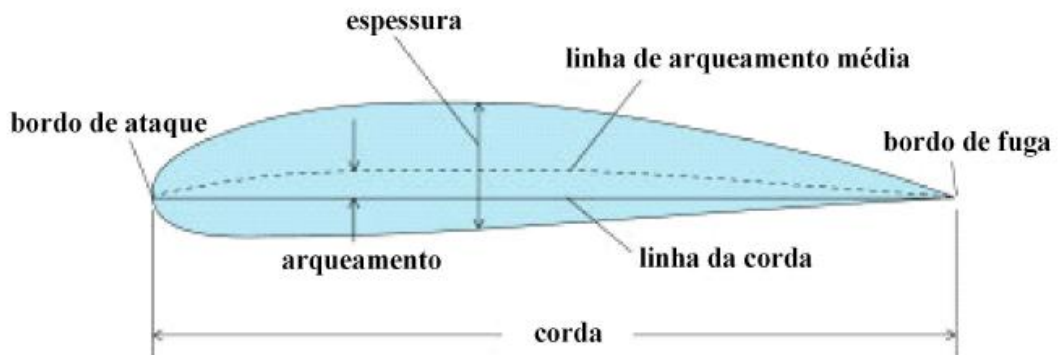


Figura 38 - Perfil aerodinâmico ou aerofólio – Fonte: RODRIGUES, 2014.

- A linha de arqueamento média é a linha média de todas as espessuras ao longo da seção transversal do perfil.
- A linha da corda pode ser interpretada por uma linha reta que vai do bordo de ataque até o bordo de fuga.
- A espessura é a altura do perfil e é perpendicular à linha de corda. Nota-se que existem inúmeras espessuras em um mesmo perfil devido ao seu formato aerodinâmico.

- O arqueamento é a maior distância medida entre a linha da corda e a linha de arqueamento média .
- Bordo de ataque é a extremidade do perfil onde se inicia o escoamento, enquanto a borda de fuga representa a extremidade do perfil onde se finda o escoamento.

2.4.12.1. Força de Arrasto

Segundo RODRIGUES (2014), a força de arrasto pode ser definida como uma força de resistência ao deslocamento relativo entre um corpo sólido e um meio fluido, como o ar ou a água. Ela atua na área de resistência ao escoamento, ou seja, na superfície perpendicular ao direcionamento do vento, no caso de perfis aerodinâmicos o arrasto atuará no bordo de ataque. A aplicação da força de arrasto é muito importante desde há muito tempo, como força motriz de barcos a velas e de bombas d'água. Existem turbinas eólicas que utilizam o arrasto como força motriz, como acontece nos moinhos de vento tipo Pérsia. A Figura 39 ilustra estas forças aerodinâmicas atuantes no perfil de uma pá.

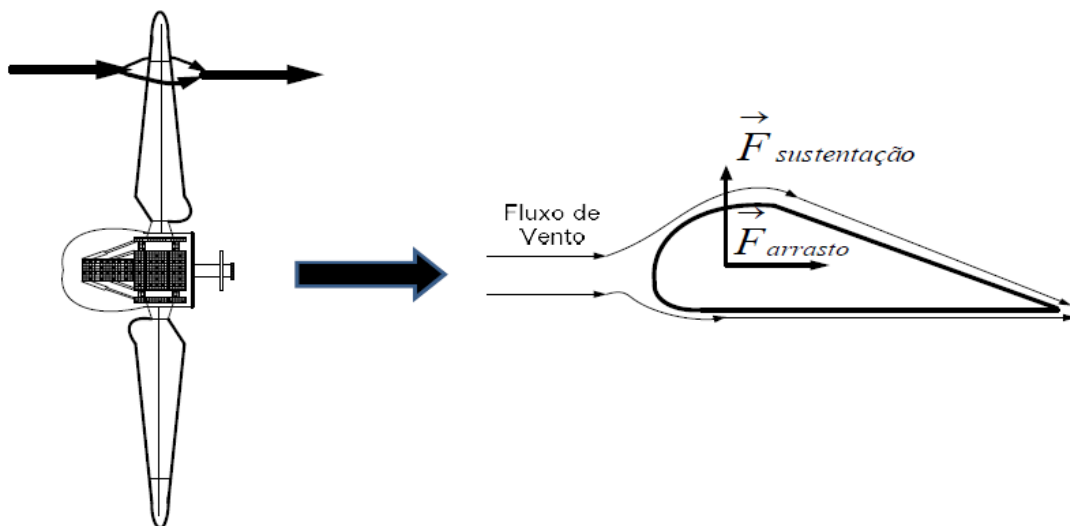


Figura 39 - Forças aerodinâmicas atuantes no perfil da pá – Fonte: SILVA, 2012.

2.4.12.2. Força de Sustentação

A força de sustentação pode ser observada em várias aplicações, como por exemplo, em asas de aviões, onde ela é responsável pela permanência do avião no ar. Se um avião perde sustentação, ele pode vir a cair, como já aconteceu em alguns casos de acidentes aéreos. Outra aplicação da força de sustentação é nos aerofólios de carros, onde ela é usada no sentido contrário ao das asas de avião, com o propósito de aumentar a aderência do carro na pista. A aplicação que interessa neste trabalho é em relação a turbinas eólicas, onde a força de sustentação é responsável por acionar as pás dos aerogeradores de eixo horizontal.

Segundo RODRIGUES (2014), a força de sustentação pode ser explicada segundo dois princípios físicos, que são a terceira lei de Newton, da ação e reação, e segundo o teorema de Bernoulli, o qual diz que a energia total associada a uma partícula será constante ao longo de todo o escoamento.

Quando o vento incide sobre as pás das turbinas eólicas, ocorre a divisão do escoamento, na qual uma parte flui pela parte superior e outra pela inferior do perfil aerodinâmico. Se o perfil estiver em um ângulo positivo em relação ao vento, o escoamento incidente na parte inferior do perfil é forçado para baixo, e como reação – Terceira Lei de Newton – haverá uma força de mesma intensidade e sentido oposto, responsável pelo deslocamento das pás, chamada de força de sustentação.

Outra explicação é segundo o Teorema de Bernoulli, pois quando o escoamento se divide, a parcela que flui pela parte superior do perfil percorre uma distância maior do que a da parte inferior no mesmo espaço de tempo. Com isso, a pressão estática na parte superior do perfil é reduzida, enquanto que na parte inferior esta pressão estática aumenta. Portanto, a força de sustentação seria causada por essa diferença de pressão estática, como pode ser observado na Figura 40:

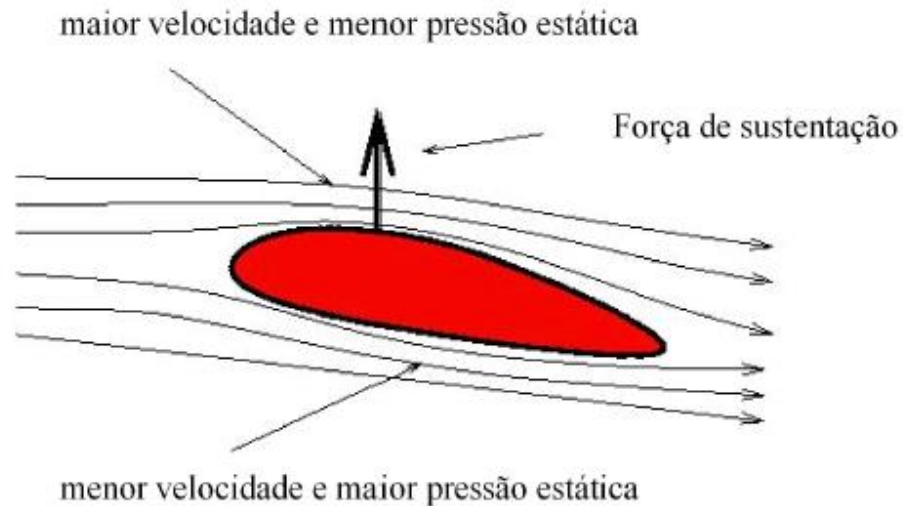


Figura 40 - Força de sustentação segundo teorema de Bernoulli – Fonte: RODRIGUES, 2014.

2.4.12.3. Ângulo de Ataque

Segundo RODRIGUES (2014), o ângulo de ataque (α) é o ângulo formado entre a linha da corda do perfil aerodinâmico e a direção do vento incidente. Este ângulo é de extrema importância para gerar a força de sustentação, e à medida que este aumenta, aumenta também a sustentação. Porém esse aumento da sustentação só se dá até certo ponto, onde ocorre diminuição brusca desta força (stall). Geralmente o valor crítico para o ângulo de ataque gira em torno de 15° , mas com a aplicação de dispositivos hipersustentadores, este limite pode chegar de 20° até 45° . Vale ressaltar que o aumento no ângulo de ataque acarreta também em um aumento na força de arrasto. A Figura 41 ilustra o ângulo de ataque.

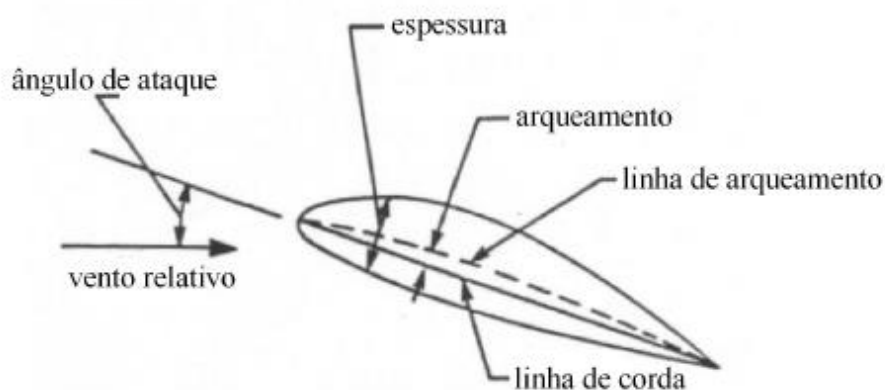


Figura 41 - Ângulo de ataque em um perfil aerodinâmico – Fonte: RODRIGUES, 2014.

2.4.12.4. Ângulo de Passo

Segundo RODRIGUES (2014), o ângulo de passo (β) é aquele entre a linha da corda do perfil e o plano de rotação das pás. Sua manipulação é crucial para o controle da potência das turbinas, através do sistema de controle de passo, que será abordado no decorrer do trabalho. A soma dos ângulos de ataque e de passo forma o ângulo de fluxo ($\Phi = \alpha + \beta$). A Figura 42 ilustra os ângulos de ataque e de passo em um perfil aerodinâmico.

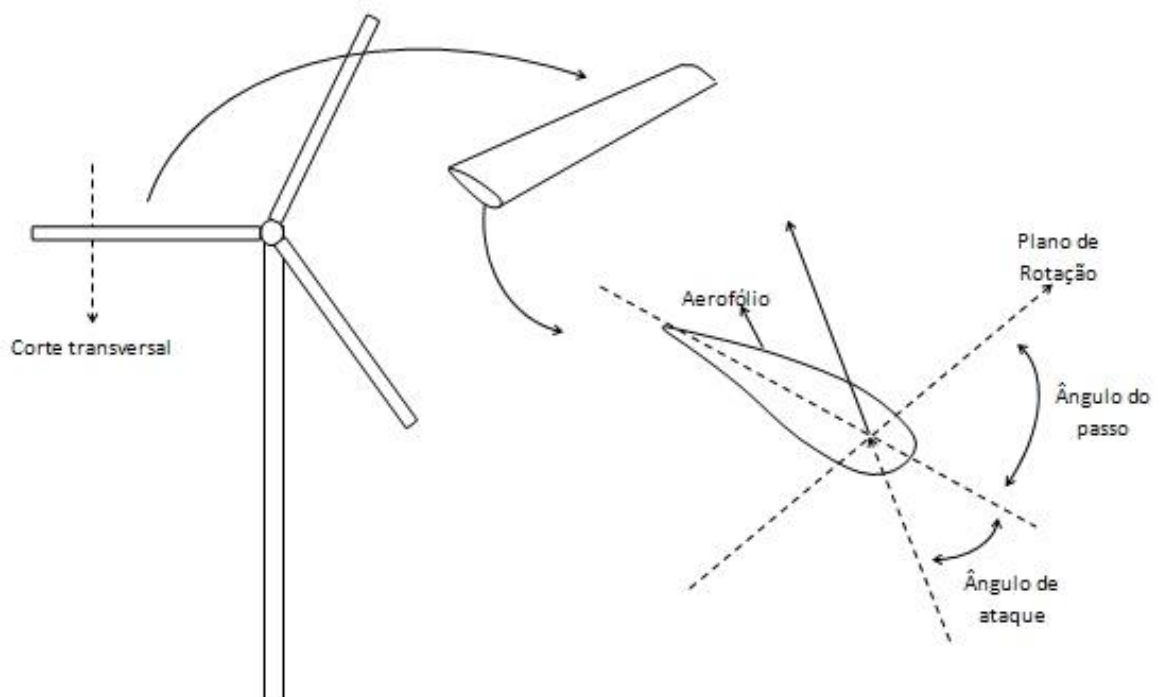


Figura 42 - Ângulos de ataque (α) e de passo (β) em um perfil aerodinâmico –
Fonte: RODRIGUES, 2014.

2.4.12.5. Controle de Potência

Segundo GASCH (2011) e PINTO (2013), os aerogeradores são projetados para uma determinada velocidade do vento, chamada velocidade nominal. Como ficou explicado no tópico de distribuição das velocidades do vento, há incidência de velocidades bem elevadas, porém durante curtos espaços de tempo durante o ano. Se as turbinas fossem projetadas para operarem na velocidade máxima do vento, certamente seriam mais robustas e conseqüentemente mais caras, além do aumento da velocidade de acionamento (cut in) devido à maior dificuldade em sair da inércia, acarretando em desperdício dos ventos de menores

velocidades. Portanto, a velocidade nominal das turbinas eólicas deve ser abaixo das velocidades máximas do local, numa faixa com maior frequência de incidência.

Segundo HAU (2005), quando a velocidade dos ventos excede a velocidade nominal, a turbina trabalha em uma condição para a qual não foi projetada, o que causa sobrecarga e desgaste dos componentes. Diante desta situação faz-se necessária a aplicação de mecanismos de controle da potência dos aerogeradores. Estes mecanismos são responsáveis pela estabilidade dos valores da curva de potência para velocidades acima da nominal.

2.4.12.6. Controle de Passo

Segundo HAU (2005), o controle de passo das pás da turbina (pitch control) é um mecanismo de controle de potência que é responsável por girar as pás da turbina em torno de seu eixo longitudinal, adequando o ângulo de passo β . A Figura 43 mostra como é a movimentação das pás no eixo.



Figura 43 - Movimento das pás no eixo longitudinal – Pesquisado em:
<<http://usuaris.tinet.cat/zefir/pitch.htm>>

Segundo HAU (2005), quando a velocidade do vento ultrapassa a velocidade nominal do aerogerador, o sistema de controle de passo atua de forma a aumentar o ângulo de passo, o que acarreta na diminuição da força de sustentação e aumento na força de arrasto. Isto faz com que para qualquer velocidade do vento acima da nominal, a potência extraída seja controlada e mantida no valor nominal. Existem duas formas mecânicas de controle de passo, que são o controle hidráulico e o controle através de engrenagens, como ilustrado na Figura 44 e na Figura 45, respectivamente.

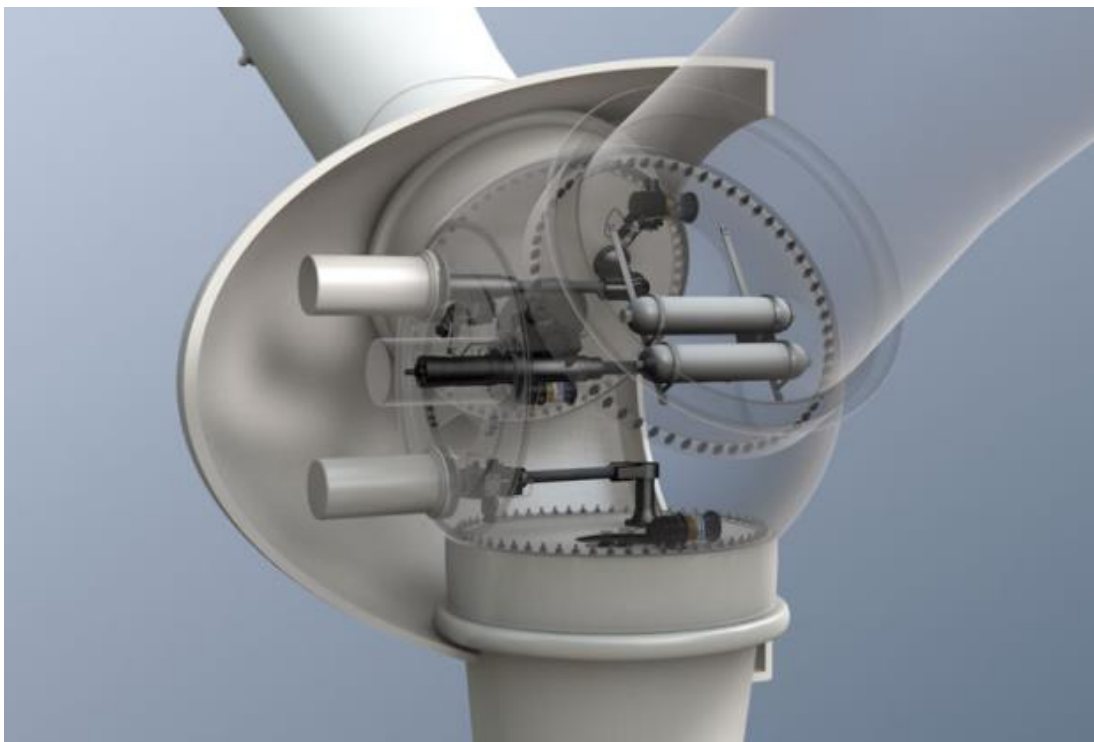


Figura 44 - Controle de passo hidráulico – Pesquisado em:
<http://www.ifm.com/ifmus/web/apps-by-industry/cat_060_010_011.html>



Figura 45 - Controle de passo por engrenagens – Pesquisado em:
 <http://www.ifm.com/ifmus/web/apps-by-industry/cat_060_010_010.html>

Segundo GASCH (2011), PINTO (2013) e HAU (2005), o controle de passo também se faz eficiente na partida da turbina, pois altera o ângulo de passo de modo que menores velocidades de vento acionem a turbina e gerem potência. Sua importância também é notada no procedimento de parada da turbina ao entrar em posição de bandeira ($\beta=90^\circ$), com predominância de forças de arrasto.

a) Perda Aerodinâmica Passiva (Stall)

Segundo HAU (2005), o controle de potência por perda aerodinâmica passiva é aplicado nas pás da turbina eólica de modo que o ângulo de passo seja tal que a partir da velocidade nominal do vento, o escoamento em torno das pás comece a se descolar – stall – causando perda nas forças de sustentação e aumentando as forças de arrasto. Esta diminuição na sustentação seguida de acréscimo no arrasto causa diminuição na potência extraída dos ventos. Nas turbinas controladas por stall, as pás são fixas – não giram em torno do seu eixo longitudinal – e são posicionadas em um ângulo de passo previamente calculado de modo que a potência extraída seja controlada em torno de seu valor nominal. As pás da turbina são projetadas com uma determinada torção longitudinal, que serve para suavizar a redução da potência do aerogerador, que aconteceria de forma drástica, caso não existisse esta torção. A Figura 46 mostra o fluxo de ar.

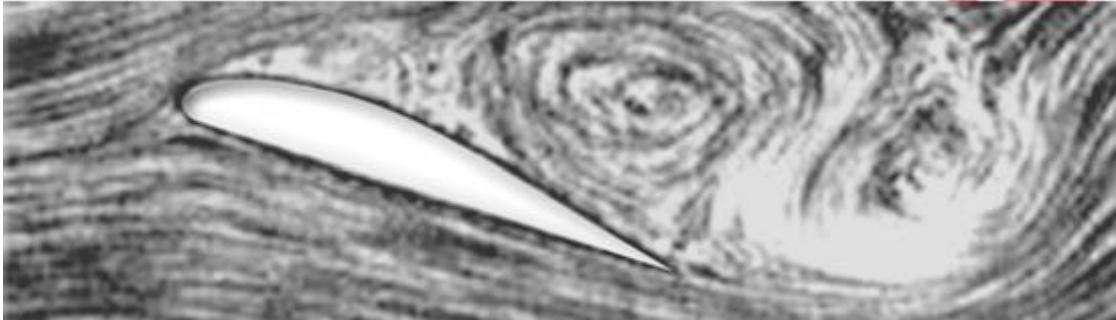


Figura 46 - Fluxo de ar descolado do perfil da pá (stall) – Fonte: CRESESB, 2008.

Uma vantagem deste sistema de controle é a sua simplicidade de operação, já que não é necessário nenhum sistema auxiliar para que o controle de potência ocorra. Em contrapartida, o projeto do perfil das pás demanda complexos cálculos aerodinâmicos.

b) Perda Aerodinâmica Ativa (Stall Ativo)

Segundo PINTO (2013) e HAU (2005), recentemente foi instalado em turbinas eólicas de grande porte o controle por perda aerodinâmica ativa, que se assemelha ao controle de passo por possuir giro das pás no seu eixo longitudinal. A principal diferença entre os dois métodos é que no stall ativo as pás serão giradas no sentido oposto ao das turbinas com controle de passo. Ou seja, o ângulo de ataque será aumentado causando perda aerodinâmica (stall). A vantagem do stall ativo em relação ao controle por passo é que o controle por passo exige um ângulo de passo maior do que na perda dinâmica ativa. Isso quer dizer que para uma mesma regulação de potência, o controle stall ativo precisará girar menos as pás, e seu mecanismo de giro não precisará ser tão robusto quanto os de regulação por passo.

c) Outros Métodos de Controle

Alguns aerogeradores possuem flaps como de aviões para controlar a potência no rotor através do aumento da força de arrasto.

Outro método teórico é desviar o direcionamento da turbina em relação ao vento perpendicular, o que diminuiria a potência gerada, mas acarretaria em esforços para os quais a turbina não foi projetada. Sua aplicação só é prática em aerogeradores de pequeno porte (menor ou igual a 1 kW).

2.4.13. Direcionamento da Turbina (Yaw drive)

Como foi visto no início do trabalho, as características do vento podem ser aproximadas por modelos estatísticos de maneira razoável, mas muitas das vezes o vento se comporta de forma caótica, mudando sua direção, sentido e velocidade. Segundo GASCH (2011), PINTO (2013) e HAU (2005), para compensar essas mudanças de direção, os aerogeradores de eixo horizontal contam com sistemas de orientação, que são responsáveis por alinhar o eixo da turbina na direção do vento incidente. Este direcionamento está inteiramente relacionado com a eficiência da turbina, pois para alcançar sua capacidade máxima de geração, o plano de giro das pás do rotor deverá estar perpendicular à direção dos ventos. O Movimento de rotação da turbina sobre seu próprio eixo para ajustar-se à direção do vento recebe o nome de guinada, e esta pode ocorrer de forma passiva ou ativa.

O direcionamento passivo se apresenta de duas formas. A primeira é através de uma cauda paralela ao eixo do rotor, existente em turbinas de eixo horizontal e de pequeno porte, onde o próprio vento, ao incidir sobre a turbina fora de posição se encarrega de efetuar a guinada. Um exemplo deste direcionamento é ilustrado na Figura 47.



Figura 47 - Turbina eólica com leme de direcionamento - Fonte: GASCH, 2011.

A segunda forma ocorre nos aerogeradores downwind através de uma guinada autônoma, causada pela força da pressão do vento quando o eixo da turbina não está paralelo à direção do vento. Esta força da pressão do vento causa um momento de guinada em torno do eixo da torre, corrigindo o posicionamento da turbina em relação à direção do vento. Sistemas de direcionamento passivo tem sua aplicação limitada a rotores com diâmetro de até 10 m.

Já o direcionamento ativo é aplicado em aerogeradores de médio e grande porte através de mecanismos de acionamento, como motorreductores acoplados a engrenagens e também por atuação de um circuito eletro hidráulico. A direção do vento incidente é medida por um anemômetro instalado na parte superior da nacelle. Em seguida os dados são interpretados, e um sinal é enviado ao mecanismo de guinada, especificando o movimento necessário para correção do alinhamento da turbina. Para turbinas maiores, o sistema de guinada pode exigir mais de um dispositivo de acionamento (motores ou atuadores hidráulicos) em função do torque requerido para movimentar a turbina. Um exemplo deste direcionamento é ilustrado na Figura 48.

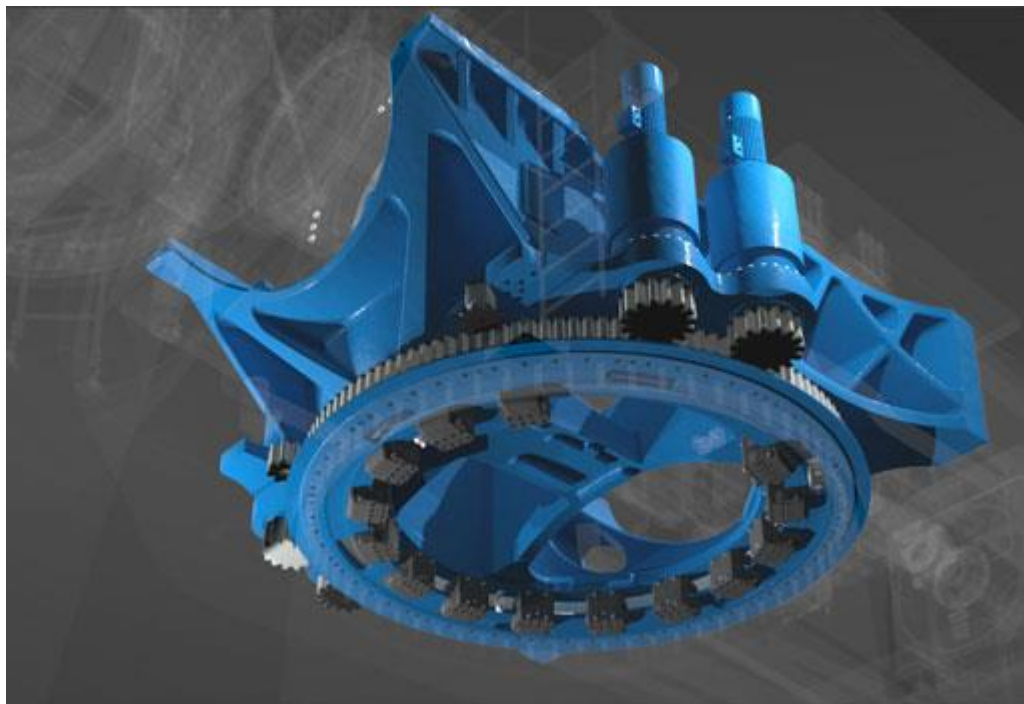


Figura 48 - Sistema de guinada ativo com 4 motores – Pesquisado em: <<http://www.nordex-online.com/microsites/delta/en/information/>>

2.4.14. Materiais das Construção das Pás

Os aerogeradores são equipamentos mecânicos que tem objetivo de converter energia cinética proveniente da movimentação do vento em energia elétrica. As características dos

materiais escolhidos para cada componente, especialmente as pás, têm um papel determinante na busca pelo aperfeiçoamento do desempenho.

Segundo HAU (2005), o aglomerado das pás forma o rotor e devido à demanda de redução de peso, geralmente, as pás são elaboradas com materiais compostos de fibra de vidro e resinas, por conta da alta estabilidade química. Existem também geradores com pás de alumínio e entre outros tipos de metais. As pás possuem perfis aerodinâmicos diversificados de forma a elevar a sua eficácia na retirada da energia em determinado valor de velocidade do vento. Elas podem ser formadas de apenas um perfil ou uma combinação de vários.

Segundo CALLISTER (2010), o uso da madeira como material para construção de componentes de aerogeradores é antigo, por ser um material que apresenta facilidade em sua construção, baixo custo e apresentar uma boa resistência mecânica é utilizado desde o século 20 em países como Europa e EUA. A madeira tem comportamento similar ao de um material compósito, pois possui fibras direcionais e por apresentar uma maior densidade, se comparada aos compósitos, precisa passar por tratamentos químicos para que seja permitido seu uso em ambiente extremo, de maneira que não se torne vulnerável. Por conta disso seu uso é limitado, mas em aerogeradores de grande porte, é utilizada como reforço em sua estrutura, do mesmo modo que é encontrada na aviação. Um exemplo de moinhos construídos com madeira é mostrado na Figura 49.



Figura 49 - Moinho de madeira europeu do ano de 1920 – Pesquisado em: <http://monovisions.com/dutch-windmills-in-19th-century-vintage-historic-bw-photos/>

Segundo CALLISTER (2010), os materiais metálicos, geralmente em forma de ligas metálicas, apresentam alta tenacidade e boas propriedades mecânicas, porém os custos de produção e obtenção podem ser elevados, principalmente em algumas ligas onde são encontrados elementos mais raros. Os primeiros aerogeradores possuíam pás de metal, que na década de 40 foram desmontados para reutilização na guerra. Com o desenvolvimento dos estudos de fontes alternativas de energia e assim, o desenvolvimento da energia eólica, as pás de metal deixaram de ser utilizadas e em seu lugar entraram os compósitos e polímeros. No entanto, alguns aerogeradores de grande porte ainda utilizam pás metálicas, mas estas apresentam grandes dificuldades no transporte e fixação, exigindo trens de carga, guindastes e caminhões. Um exemplo de aerogeradores construídos com materiais metálicos é mostrado na Figura 50.



Figura 50 - Aerogerador com pás feitas de metal – Pesquisado em:
<<https://pixabay.com/pt/cata-vento-vento-61580/>>

Segundo CALLISTER (2010), o uso dos materiais compósitos se torna frequente quando falamos em estruturas para energia eólica. Um material compósito é fabricado

combinando dois ou mais materiais, muitas vezes com propriedades diferentes. Os dois materiais trabalham juntos para dar as propriedades únicas compostas. No entanto, dentro do compósito, pode-se facilmente distinguir os diferentes materiais, pois eles não se dissolvem, nem se misturam. No caso das pás de aerogeradores, se destacam os plásticos reforçados com fibras, sendo as fibras de vidro e carbono as mais utilizadas, por conta da facilidade de fabricação, boa resistência mecânica, leveza, baixo custo e alta resistência a agentes externos, como clima. Nos aerogeradores de grande porte, podem ser combinadas as estruturas de metal, madeira e fibras de carbono e aramida para aumentar a vida útil e a resistência do aerogerador. Um exemplo de pás construídas com materiais compósitos é mostrado na Figura 51.



Figura 51 - Pás de aerogeradores constituídas de fibra de vidro – Pesquisado em: <http://www.small-generator.com/wind-turbine-blades.htm>

Segundo HANCOCK (2014), por conta da grande semelhança entre as hélices dos aviões e as pás de aerogeradores, pode-se usar o mesmo conjunto de técnicas para chegar a resultados necessários, produzindo assim, pás com núcleos de madeira e superfície de plástico com fibras de vidro, unindo a capacidade estrutural com a estabilidade química e a resistência a impactos.

2.4.15. Aplicações do sistema Eólico

Segundo CRESESB, (2005), denomina-se sistema eólico como a união de vários equipamentos que são utilizados para obter a energia dos ventos e então transformá-la em energia útil; a estes equipamentos adicionam-se outros equipamentos de apoio e que são fundamentais para obtenção e transformação da energia.

O sistema eólico pode ter classificação em quatro aplicações diferentes: sistemas isolados, sistemas híbridos, sistemas interligados à rede e sistemas offshore. Dentre os sistemas eólicos, há uma configuração básica, e estes têm necessidade de uma unidade de controle de potência e, em alguns casos, dependendo da aplicação, de uma forma de armazenamento denominada unidade de armazenamento. Para melhor entendimento, a Figura 52 ilustra de maneira objetiva a classificação de aerogeradores quanto ao tamanho e suas usuais aplicações.



Figura 52 - Considerações sobre o tamanho dos aerogeradores e suas principais aplicações – Fonte: CRESESB, 2005.

2.4.15.1. Sistemas Isolados:

Comumente, os sistemas isolados são sistemas de pequeno porte e utilizados em aplicações residenciais ou outras que exigem menores escalas. Na maioria das vezes, carecem de alguma forma de armazenamento de energia, podendo ser através de baterias, permitindo consumir energia quando o vento for escasso e garantindo assim o abastecimento em períodos carentes de ventos. Esta é uma solução bastante viável em locais remotos ou em locais que

possuem custo muito elevado para obtenção de energia, já que muitas vezes é o modo mais prático e econômico para obtenção energia elétrica nestes lugares. Os sistemas isolados que armazenam energia em baterias, possuem necessidade de um dispositivo para monitorar a carga e a descarga da bateria, chamado de controlador ou regulador de carga. Tal dispositivo tem como principal objetivo proteger as baterias das sobrecargas e descargas profundas, sendo assim responsável pela vida útil da mesma.

Porém, segundo DUTRA (2008), existem também outros sistemas que não demandam armazenamento, tendo como exemplo, sistemas utilizados para irrigação, um sistema totalmente eficiente, pois toda água bombeada é diretamente consumida. A Figura 53 ilustra o esquema de um sistema isolado.

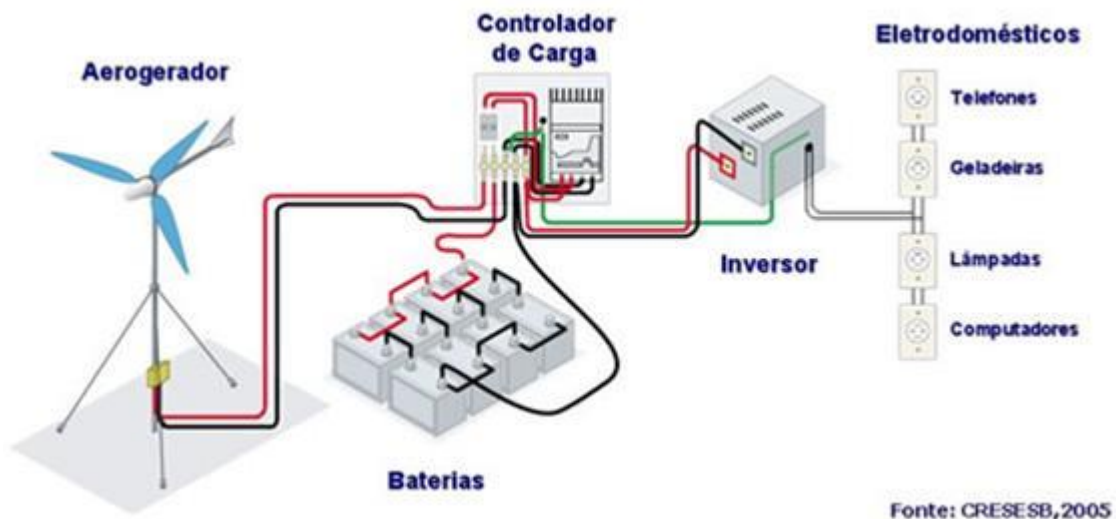


Figura 53 - Representação esquemática de um sistema isolado – Fonte: CRESESB, 2005.

2.4.15.2. Sistemas Híbridos:

Segundo DUTRA (2008), são sistemas que se caracterizam por utilizar duas ou mais fontes de alimentação renováveis de energia para produção de energia elétrica, tais como: além da energia eólica, um gerador diesel, uma placa solar ou a rede pública como fonte de energia é geralmente usado em combinação com a primeira fonte de energia em sistemas híbridos.

A utilização de mais de uma forma de geração de energia elétrica proporciona uma maior eficiência do sistema, onde os sistemas podem se complementar e se suplementar, mas também aumenta a sua complexidade. Por isso, é fundamental realizar um maior controle de todas as fontes de obtenção para que haja eficiência e otimização máximas. De forma genérica,

esses sistemas são aplicados em sistemas de porte médio indicado para o atendimento de um número maior de usuários, se comparados aos isolados. Necessita também de um inversor, pois trabalha com cargas em corrente alternada. A Figura 54 ilustra o esquema de um sistema híbrido.

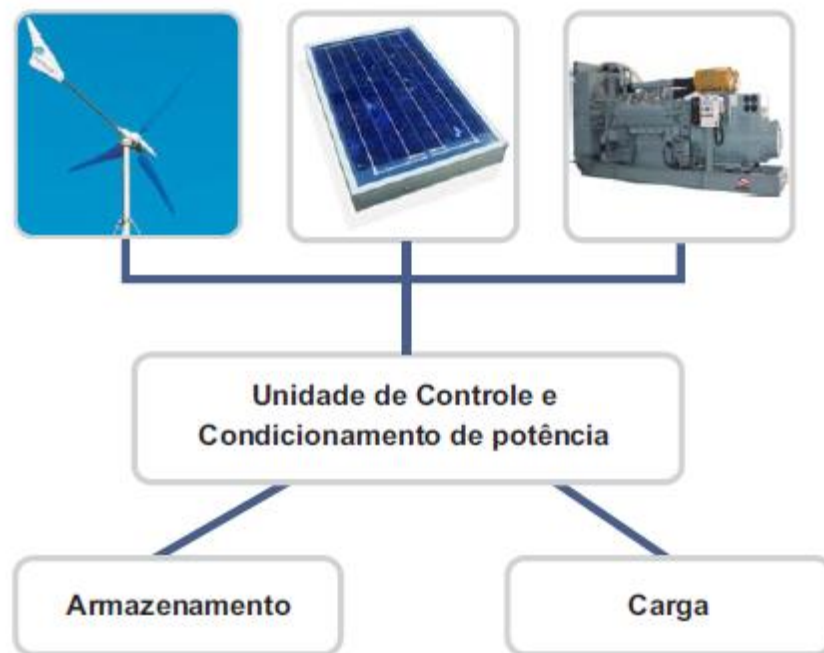


Figura 54 - Configurações de um sistema híbrido solar-eólico-diesel – Fonte: CRESESB, 2005.

2.4.15.3. Sistemas Interligados à Rede:

Segundo DUTRA (2008), os sistemas interligados à rede pertencem ao grupo dos sistemas de grande porte, e se caracterizam por não necessitar de nenhum tipo de armazenamento, pois toda a geração de energia é disponibilizada diretamente à rede elétrica.

Atualmente, a utilização dos sistemas interligados à rede para a geração de energia em larga escala constitui-se numa das mais promissoras alternativas. Neste caso, utiliza-se diversos sistemas eólicos interconectados; são denominados como fazendas eólicas. Estas fazendas, compostas de dez até cem aerogeradores instalados geralmente a 200m um do outro, em sítios com regimes de vento de excelente qualidade, permitem um aproveitamento mais eficiente das potencialidades energéticas e injetam toda a energia gerada na rede elétrica usual, exercendo a função de uma usina geradora, também denominada usina eólica. A Figura 55 ilustra um sistema interligado à rede.



Figura 55 - Parque eólico conectado à rede situado em Prainha, CE – Fonte: CRESESB, 2005.

2.4.15.4. Sistemas OffShore:

Segundo ABB (2012), o sistema offshore consiste em parques eólicos ao situados ao longo da costa marítima. Embora representem maiores custos de instalação, transporte e manutenção, a energia eólica offshore tem se desenvolvido a cada ano principalmente com o esgotamento e limitação de áreas que possuem grande potencial eólico em terra. A utilização deste sistema vem aumentando principalmente na Europa, que já não desfruta de áreas adequadas para esse fim, possuindo algumas restrições ambientais na utilização do solo.

A indústria eólica vem investindo no desenvolvimento da adaptação das turbinas eólicas convencionais, em terra, para uso no mar. Além do desenvolvimento tecnológico, esses projetos necessitam de táticas especiais quanto ao tipo de instalação, transporte das máquinas e operação. O projeto por inteiro deve ser disposto de forma a utilizarem os períodos onde as condições marítimas favorecem uma instalação e um deslocamento com segurança.

As principais diferenças entre um sistema offshore e onshore consistem essencialmente ao nível dos materiais empregados. Nos sistemas offshore, encontramos proteção contra a corrosão, sistemas de apoio à desumidificação e também reforços ao nível do revestimento do metal utilizado na carcaça da máquina.

Possuem algumas vantagens como:

- Capacidade ilimitada em relação à utilização do solo;
- Baixo impacto visual por conta de sua localização;
- Devido à distância da costa, não apresenta problemas de impactos sonoros;
- Apresenta baixa rugosidade na superfície do mar;
- As turbinas não necessitam de grandes alturas, devido à baixa rugosidade, se comparadas com as de solo terrestre;
- Devido à ausência de barreiras, apresenta-se uma menor turbulência do vento. Desse modo, a vida útil das turbinas aumenta, pois sofrem menores desgastes.

Um exemplo de um sistema Offshore é ilustrado na Figura 56.



Figura 56 - Sistema Offshore localizado em Block Island, EUA – Pesquisado em: <https://www.ambienteenergia.com.br/>

3. METODOLOGIA

3.1. Fluxograma



I. PESQUISA AMPLA SOBRE A ENERGIA EÓLICA E SUAS TECNOLOGIAS

Elaboração de uma extensa pesquisa agrupando temas relevantes referentes à energia eólica, tais como cenário mundial e brasileiro, alternativas energéticas, características dos ventos e tecnologias aplicadas para a produção de energia eólica, analisando artigos, monografias, teses de mestrado e doutorado.

II. ANÁLISE E COMPILAÇÃO DOS DADOS

Organização e sintetização dos dados embasados em referenciais teóricos, excluindo os dados considerados irrelevantes ao desenvolvimento da revisão bibliográfica.

III. CONSTRUÇÃO DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Construção da base teórica de referência para o desenvolvimento do trabalho com a elaboração de um roteiro contemplando os tópicos a serem desenvolvidos, partindo dos temas amplos, abordados de forma mais sucinta, para os específicos, tratados de maneira detalhada.

IV. DELIMITAÇÃO DO FOCO DA PESQUISA

Diante da gama de temas relativos à energia eólica descritos na revisão bibliográfica, propõe-se o desenvolvimento de um estudo comparativo entre as diferentes tecnologias existentes voltadas para a eficiência energética e uma posterior análise de viabilidade.

V. MODELOS DE APROPRIAÇÃO TECNOLÓGICA E SUAS VANTAGENS

Análise de tecnologias e sistemas que influenciam diretamente no rendimento dos aerogeradores, como altura da torre, quantidade das pás e diâmetro do rotor apresentando dados quantificados, suas vantagens e desvantagens.

VI. ANÁLISE COMPARATIVA DAS TECNOLOGIAS APLICADAS EM AEROGERADORES

Em posse dos dados tecnológicos e econômicos previamente analisados realiza-se uma comparação de viabilidade entre as diferentes configurações de aerogeradores e seus respectivos ganhos em termos de eficiência.

4. DESENVOLVIMENTO

As diferentes configurações de projeto das turbinas eólicas influenciam diretamente o rendimento das mesmas. Diante disso, são comparadas as distintas composições de aerogeradores alterando-se os principais parâmetros de projetos, são eles: altura da torre, diâmetro do rotor e número de pás.

4.1 Altura da Torre

De acordo com o tópico 2.3.3.1 da revisão bibliográfica, a velocidade dos ventos depende diretamente da altura da torre, em função do gradiente de velocidades formado devido à rugosidade do terreno.

A Tabela 2 apresenta diversos valores de rugosidade para diferentes tipos de terrenos, os quais, quanto maior for a resistência oferecida ao escoamento dos ventos, maior será o valor da rugosidade.

Tipo de Terreno	h0 (m) Mínimo	h0 (m) Máximo
Lama/gelo	10^{-5}	$3 \cdot 10^{-5}$
Mar calmo	$2 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$
Areia	$2 \cdot 10^{-4}$	10^{-3}
Neve	10^{-3}	$6 \cdot 10^{-3}$
Campo de cereais	10^{-3}	10^{-2}
Relva baixa/estepes	10^{-2}	$4 \cdot 10^{-2}$
Descampados	$2 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$
Relva alta	$4 \cdot 10^{-2}$	10^{-1}
Terreno com árvores	10^{-1}	$3 \cdot 10^{-1}$
Florestas	10^{-1}	1
Povoação dos subúrbios	1	2
Centro da cidade	1	4

Tabela 2 - Valores de rugosidade para os diferentes tipos de terrenos – Fonte: HASSAN & SYKES, 1990.

Tomando como base determinado local cuja característica se aproxima à de um terreno descampado, será considerado para fins comparativos um valor de rugosidade na faixa de 0,03. Os dados de altura e velocidade usados como referência foram determinados a partir do Atlas do Potencial Eólico do Rio de Janeiro. A fórmula definida para calcular a variação da velocidade do vento em função da altura é a Lei Logarítmica expressa pela Equação 2, que dentre as citadas na revisão bibliográfica apresenta maior precisão.

4.1.1. Velocidade em Função da Altura

A fim de comparar os efeitos da variação da altura na velocidade dos ventos incidentes sobre o rotor da turbina, são analisados três casos, variando a altura da torre entre 70, 90 e 110 m, conforme ilustrado na Figura 57.

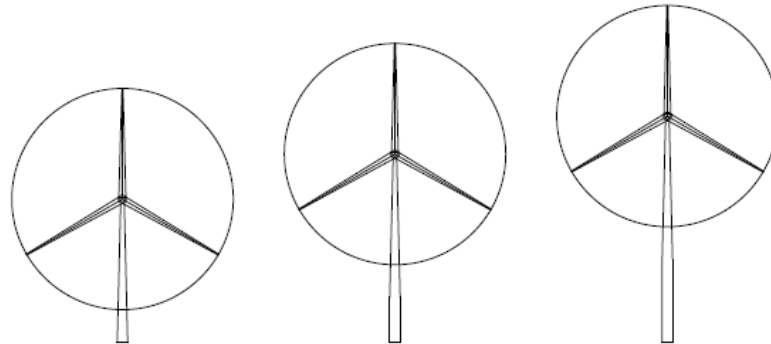


Figura 57 - Turbina Siemens SWT-3.2-108 montada com rotores a 70, 90 e 110 m de altura –
Fonte: Autor.

Assim, utilizando a Equação 2, temos:

$$V(Z) = V(Z_r) * \frac{\ln\left(\frac{Z}{Z_0}\right)}{\ln\left(\frac{Z_r}{Z_0}\right)} \quad (2)$$

Onde:

$V(Z)$ = Velocidade do vento na altura Z

Z_r = Altura de referência

$V(Z_r)$ = Velocidade do vento em uma altura de referência Z_r

Z_0 = Comprimento da rugosidade

Caso 1: Neste caso, visando obter a velocidade do vento a uma altura de 70 m, são considerados valores de velocidade e altura de referência como 7,5 m/s e 75 m respectivamente, obtidos a partir de consulta ao Atlas do Potencial Eólico do Rio de Janeiro, conforme Anexo 1.

$$V(70) = 7,5 \frac{\ln \frac{70}{0,03}}{\ln \frac{75}{0,03}}$$

$$V(70) = 7,43 \text{ m/s}$$

Caso 2: Neste caso, visando obter a velocidade do vento a uma altura de 90 m, são considerados valores de velocidade e altura de referência como 7,8 m/s e 100 m respectivamente, obtidos a partir de consulta ao Atlas do Potencial Eólico do Rio de Janeiro, conforme Anexo 1.

$$V(90) = 7,8 \frac{\ln \frac{90}{0,03}}{\ln \frac{100}{0,03}}$$

$$V(90) = 7,69 \text{ m/s}$$

Caso 3: Neste caso, visando obter a velocidade do vento a uma altura de 110 m, são considerados valores de velocidade e altura de referência como 7,8 m/s e 100 m respectivamente, obtidos a partir de consulta ao Atlas do Potencial Eólico do Rio de Janeiro, conforme Anexo 1.

$$V(110) = 7,8 \frac{\ln \frac{110}{0,03}}{\ln \frac{100}{0,03}}$$

$$V(110) = 7,89 \text{ m/s}$$

4.1.2. Potência Real Extraída dos Ventos

Para calcular a potência real extraída dos ventos são considerados os dados da ficha técnica da turbina Siemens modelo SWT-2.3-108 como:

- Potência Nominal = 2300 kW

- Diâmetro do Rotor = 108 m
- Velocidade Nominal = 11,5 m/s

O Coeficiente de Potência (C_p) para cada velocidade do vento é obtido através de interpolação da curva de potência representada pela Figura 57 e calculado através da Equação 11:

$$C_p = \frac{P_{real}}{P_{disp}} \quad (11)$$

A Figura 58 mostra a curva de potência da Turbina Siemens modelo SWT-3.2-108.

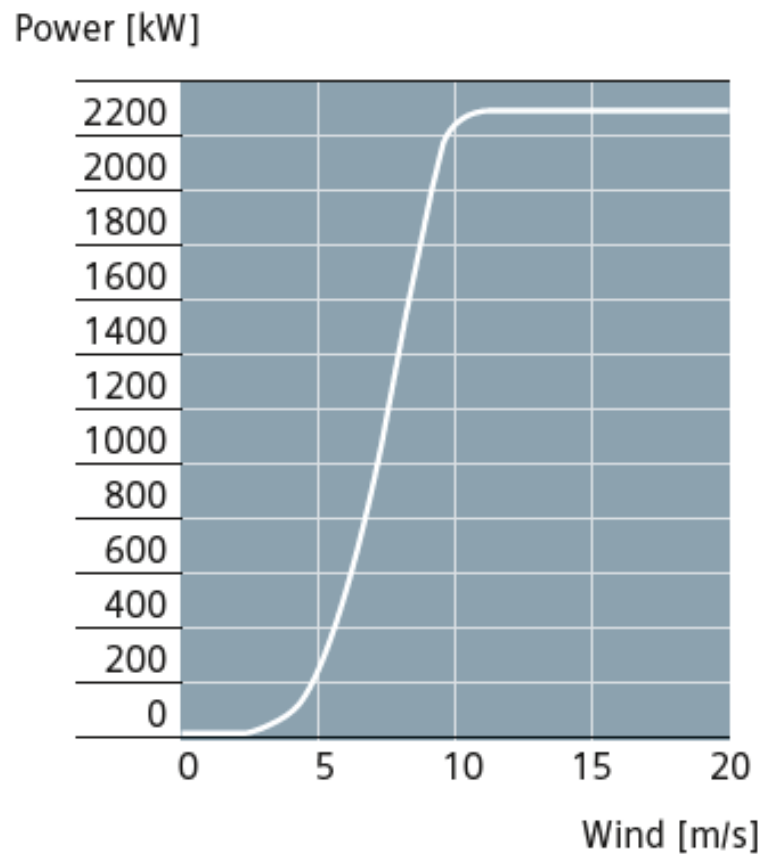


Figura 58 - Curva de potência da turbina Siemens SWT-3.2-108 – Fonte: SIEMENS, 2011.

Para fins de cálculo, é adotado valor de massa específica do ar = 1,225 kg/m³. A potência real extraída pela turbina é calculada pela Equação 15:

$$P_{real} = \frac{c_p * \rho * A * v^3}{2} \quad (15)$$

Caso 1: Neste caso, fixadas as condições da turbina e da massa específica do ar, a potência real extraída pela turbina é calculada em função da velocidade de 7,43 m/s.

$$P_{real} = \frac{0,4872 * 1,225 * 9156,24 * 7,43^3}{2}$$

$$P_{real} = 1.120.719 \text{ W}$$

Caso 2: Neste caso, fixadas as condições da turbina e da massa específica do ar, a potência real extraída pela turbina é calculada em função da velocidade de 7,69 m/s.

$$P_{real} = \frac{0,4936 * 1,225 * 9156,24 * 7,69^3}{2}$$

$$P_{real} = 1.258.860 \text{ W}$$

Caso 3: Neste caso, fixadas as condições da turbina e da massa específica do ar, a potência real extraída pela turbina é calculada em função da velocidade de 7,89 m/s.

$$P_{real} = \frac{0,4988 * 1,225 * 9156,24 * 7,89^3}{2}$$

$$P_{real} = 1.373.981 \text{ W}$$

A fim de facilitar a compreensão, é representada graficamente na Figura 59, a variação da potência real extraída pela turbina em função da altura do rotor, que varia de 70 a 110 m em intervalos de 1 m.

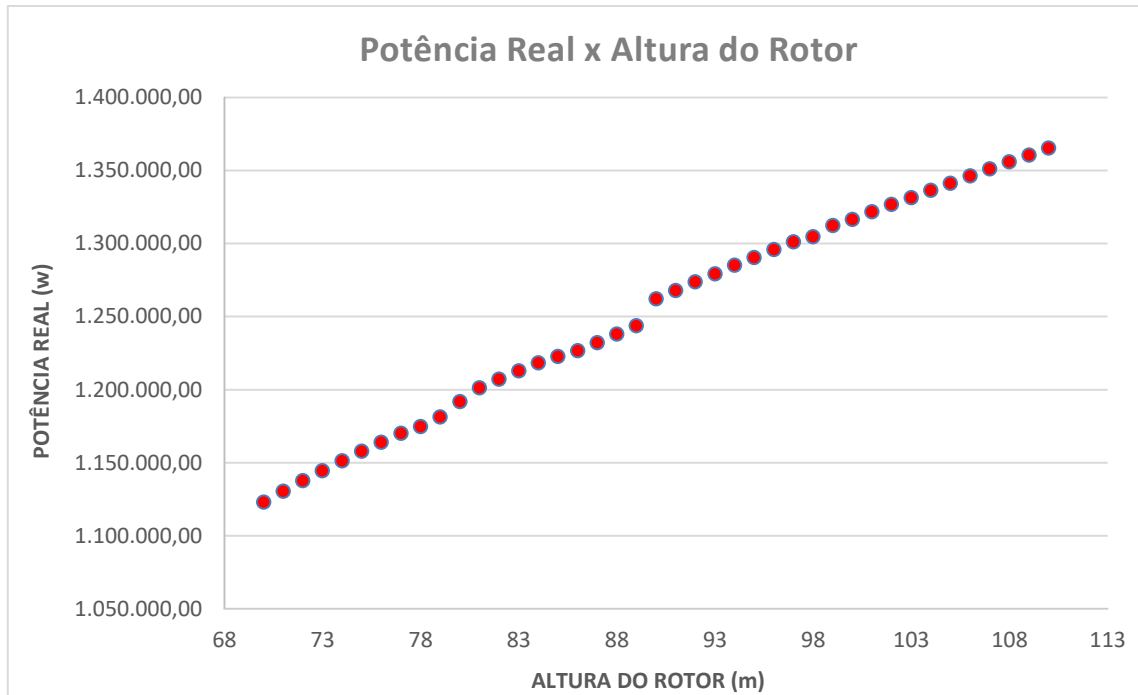


Figura 59 - Comparação da potência real em função da altura do rotor – Fonte: Autor.

A análise do gráfico da Figura 59 revela que o aumento da potência real está relacionado à altura do rotor, pois a variação das potências é proporcional ao cubo da velocidade do vento, que por sua vez, é função da altura e se relaciona através da Lei Logarítmica.

4.2. Diâmetro do Rotor

Conforme apresentado no tópico 2.4.3, a potência eólica disponível em determinada seção transversal é função de parâmetros como: massa específica do ar, velocidade do vento e área desta seção. Sendo assim, uma alteração no diâmetro do rotor acarretará proporcional modificação em sua área e, conseqüentemente, na potência disponível, conforme Equação 8:

$$P = \frac{\rho A v^3}{2} \quad (8)$$

A potência real, conforme tópico 2.4.9., representa a parcela da potência disponível dos ventos que é efetivamente absorvida pelo rotor da turbina, e é calculada através da Equação 15:

$$P_{real} = \frac{c_p * \rho * A * v^3}{2} \quad (15)$$

Para efeitos de comparação, são considerados neste estudo, dois modelos de turbina eólica com diâmetros de rotor de 101 e 108 m, conforme ilustrado na Figura 60:

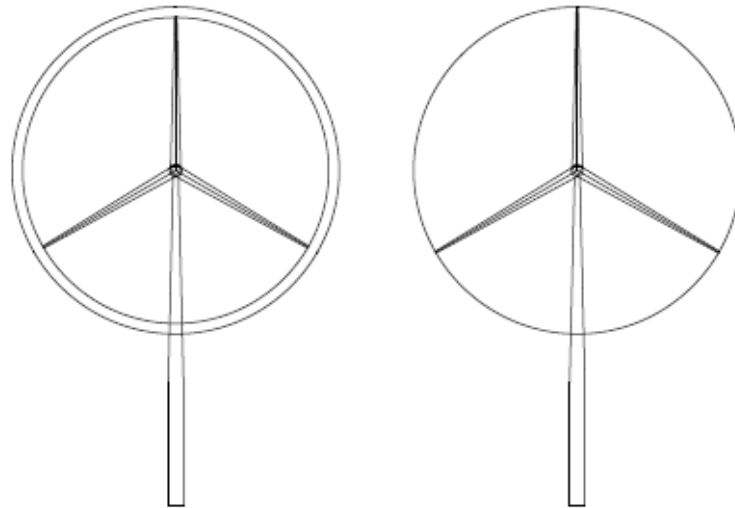


Figura 60 - Turbinas com diâmetros de rotor de 101 e 108 m – Fonte: Autor.

Adota-se como hipótese simplificadora os mesmos valores de velocidade dos ventos e de coeficiente de potência para ambas as turbinas, sendo 7,5 m/s e 0,4893 respectivamente.

Quando se diz que uma turbina possui determinado valor de coeficiente de potência, isso quer dizer que ela será capaz de transformar determinada porcentagem da potência disponível nos ventos em potência real. Portanto, fixar um valor de coeficiente de potência para ambas as turbinas significa que as mesmas irão converter a mesma porcentagem da energia disponível em trabalho no eixo do rotor.

Caso 1: Turbina Siemens modelo SWT-2.3-101

Este modelo possui as seguintes especificações técnicas:

- Potência nominal = 2.300 kW
- Diâmetro do rotor = 101 m (Área = 8007,785 m²)
- Coeficiente de Potência = 0,4893

Na primeira etapa é calculada a Potência Disponível da turbina:

$$P_{disp} = \frac{1,225 * 8007,785 * 7,5^3}{2}$$

$$P_{disp} = 2.069.199 \text{ W}$$

A comparação procede com o cálculo da potência real extraída pela turbina.

$$P_{real} = \frac{0,4893 * 1,225 * 8007,785 * 7,5^3}{2}$$

$$P_{real} = 1.012.459 \text{ W}$$

Caso 2: Turbina Siemens modelo SWT-2.3-108

Este modelo possui as seguintes especificações técnicas:

- Potência nominal = 2.300 kW
- Diâmetro do rotor = 108 m (Área= 9156,24 m²)
- Coeficiente de Potência = 0,4893

Na primeira etapa é calculada a Potência Disponível da turbina:

$$P_{disp} = \frac{1,225 * 9156,24 * 7,5^3}{2}$$

$$P_{disp} = 2.365.958 \text{ W}$$

A comparação procede com o cálculo da potência real extraída pela turbina.

$$P_{real} = \frac{0,4893 * 1,225 * 9156,24 * 7,5^3}{2}$$

$$P_{real} = 1.157.663,30 \text{ W}$$

A fim de facilitar a compreensão, é representada graficamente na Figura 61, a variação das potências disponível e real extraída pela turbina em função do diâmetro do rotor, que varia de 80 a 110 m em intervalos de 1 m.

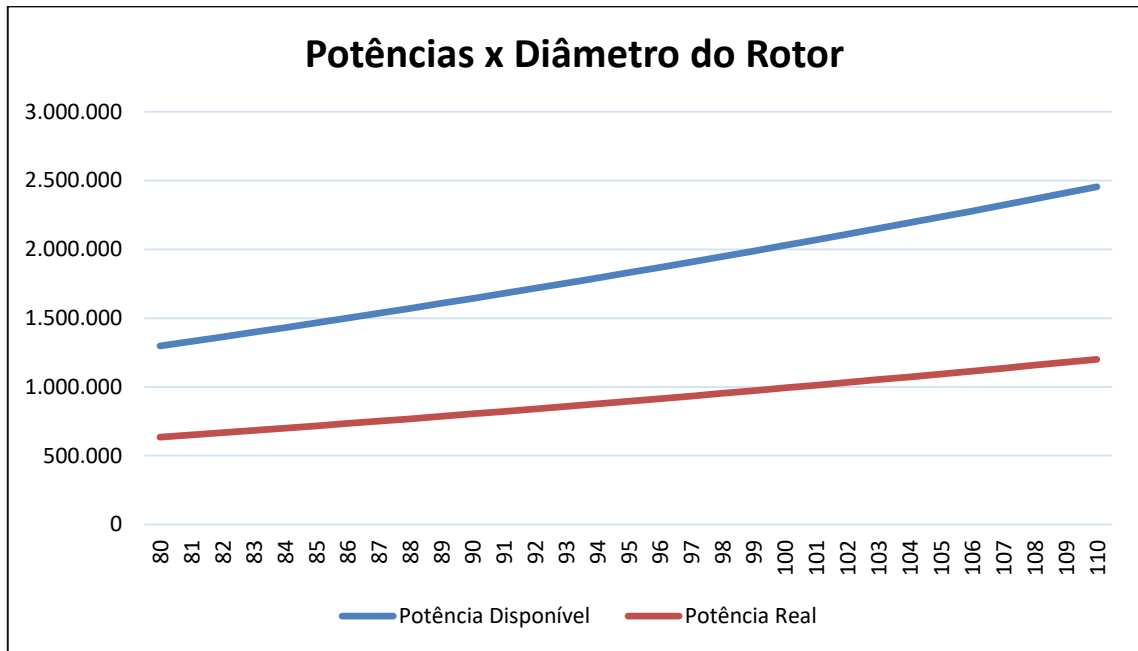


Figura 61 - Comparação das potências disponível e real em função do diâmetro do rotor –
Fonte: Autor.

Diante desta comparação, observa-se o aumento exponencial das potências disponível e real mediante o aumento do diâmetro do rotor, uma vez que a área do rotor, usada nas Equações 8 e 15, é função do quadrado do diâmetro.

4.3. Número de Pás

Conforme exposto no tópico 2.4.7, a quantidade de pás montadas sobre o rotor de uma turbina eólica exerce influência direta na sua capacidade de extrair a energia dos ventos. Este efeito pode ser observado mediante o conceito de solidez da turbina.

O coeficiente de potência desejado é obtido através da Equação 14, que relaciona o C_p ao TSR (tip-speed ratio), representado pela letra grega lambda (λ):

$$C_p = 4\lambda(1 - \lambda)^2 \quad (14)$$

Os valores ótimos de TSR para cada caso analisado serão obtidos através do gráfico da Figura 62, que relaciona o coeficiente de solidez (Ω) com a respectiva faixa de TSR.

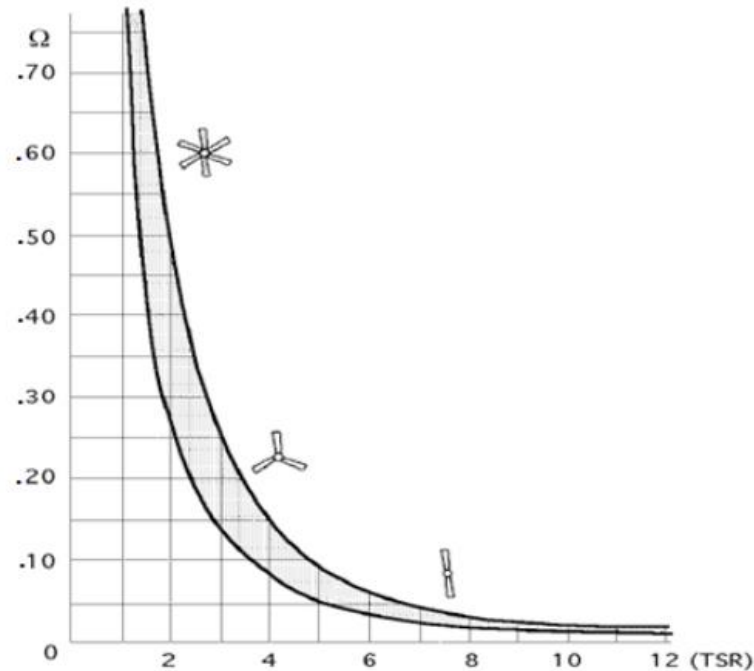


Figura 62 - Coeficiente de solidez x TSR - Fonte: HAU, 2005.

O coeficiente de solidez para cada caso será calculado através da Equação 12, que relaciona o número de pás e suas respectivas áreas à área varrida pelo rotor.

$$S = \frac{N \times A_p}{A_v} \quad (12)$$

As diferentes configurações de turbinas eólicas (com uma, duas, três e quatro pás) influenciam diretamente o rendimento das mesmas. Ao passo que as turbinas com menores quantidades de pás alcançam maiores velocidades e geram menor torque, as turbinas equipadas com maior número de pás desenvolvem rotações mais baixas e, conseqüentemente, maior torque no eixo. O comportamento de cada uma destas configurações é representado esquematicamente pelas suas curvas características através do gráfico da Figura 63:

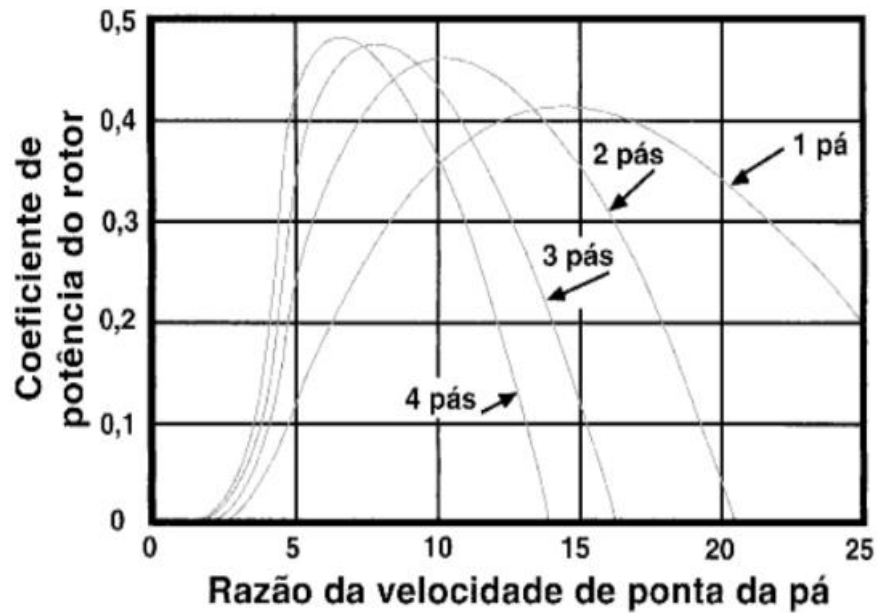


Figura 63 - Coeficiente de potência do rotor x Razão da velocidade de ponta da pá -
Fonte: PINTO, 2013.

Para efeitos comparativos, é considerado neste estudo um único modelo de turbina, a Siemens SWT-3.2-108. Em posse dos dados técnicos deste modelo, mais precisamente das características do rotor, são calculados diferentes valores de coeficiente de potência em função das diferentes disposições de pás, a considerar rotores com 1, 2, 3 e 4 pás, conforme a Figura 64.

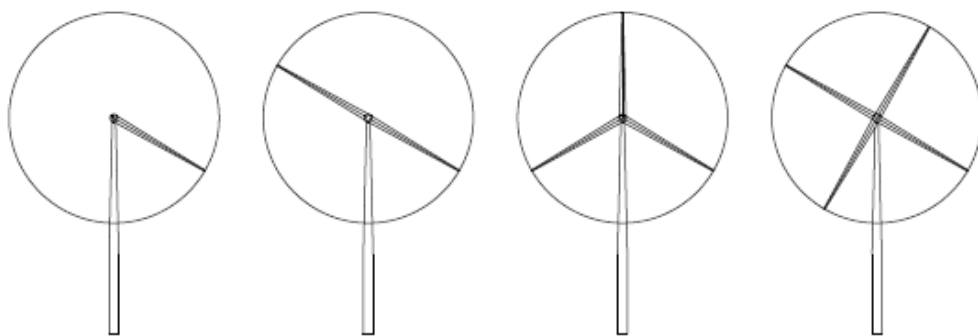


Figura 64 - Turbina Siemens SWT-3.2-108 montada com uma, duas, três e quatro pás –
Fonte: Autor.

Os dados de comprimento de pá e das cordas do perfil aerodinâmico são fornecidos na ficha técnica da turbina. Para o estudo em questão, adotam-se os dados a seguir:

- Diâmetro do rotor = 108 m
- Comprimento de pá = 53 m
- Corda maior (próxima ao cubo) = 3,4 m
- Corda menor (ponta da pá) = 0,53 m

1º Caso – Rotor com 1 pá

Cálculo do coeficiente de solidez através da Equação 12:

$$S = \frac{1 \times 104,14}{9153,10}$$

$$S = 0,011378$$

Como resultado da aplicação da Equação 12, obtém-se o valor de coeficiente de solidez aproximadamente 1,1%. Projetando esse valor no gráfico da Figura 62, que compara o índice de solidez com o TSR, obtém-se um valor ótimo de TSR em torno de 12. Baseado neste valor ótimo de TSR, calcula-se o coeficiente de potência para esta turbina com uma pá através da Equação 14:

$$Cp = 4x \frac{1}{12} \left(1 - \frac{1}{12}\right)^2$$

$$Cp = 0,280093$$

2º Caso – Rotor com 2 pás

Cálculo do coeficiente de solidez através da Equação 12:

$$S = \frac{2 \times 104,14}{9153,10}$$

$$S = 0,022756$$

Como resultado da aplicação da Equação 12, obtém-se o valor de coeficiente de solidez aproximadamente 2,3%. Projetando esse valor no gráfico da Figura 62, que compara o índice de solidez com o TSR, obtém-se um valor ótimo de TSR em torno de 7. Baseado neste valor ótimo de TSR calcula-se o coeficiente de potência para esta turbina com uma pá através da Equação 14:

$$Cp = 4x \frac{1}{7} \left(1 - \frac{1}{7}\right)^2$$

$$Cp = 0,419825$$

3º Caso – Rotor com 3 pás

Cálculo do coeficiente de solidez através da Equação 12:

$$S = \frac{3 \times 104,14}{9153,10}$$

$$S = 0,034134$$

Como resultado da aplicação da Equação 12, obtém-se o valor de coeficiente de solidez aproximadamente 3,4%. Projetando esse valor no gráfico da Figura 62, que compara o índice de solidez com o TSR, obtém-se um valor ótimo de TSR em torno de 5,5. Baseado neste valor ótimo de TSR, calcula-se o coeficiente de potência para esta turbina com uma pá através da Equação 14:

$$Cp = 4x \frac{1}{5,5} \left(1 - \frac{1}{5,5}\right)^2$$

$$Cp = 0,486852$$

4º Caso – Rotor com 4 pás

Cálculo do coeficiente de solidez através da Equação 12:

$$S = \frac{4 \times 104,14}{9153,10}$$

$$S = 0,045512$$

Como resultado da aplicação da Equação 12, obtém-se o valor de coeficiente de solidez aproximadamente 4,6%. Projetando esse valor no gráfico da Figura 62, que compara o índice de solidez com o TSR, obtém-se um valor ótimo de TSR em torno de 5. Baseado neste valor ótimo de TSR, calcula-se o coeficiente de potência para esta turbina com uma pá através da Equação 14:

$$Cp = 4x \frac{1}{5} \left(1 - \frac{1}{5}\right)^2$$

$$Cp = 0,512$$

Os resultados obtidos nos casos analisados são plotados no gráfico da Figura 65, que relaciona o coeficiente de potência com o respectivo valor de TSR (λ).

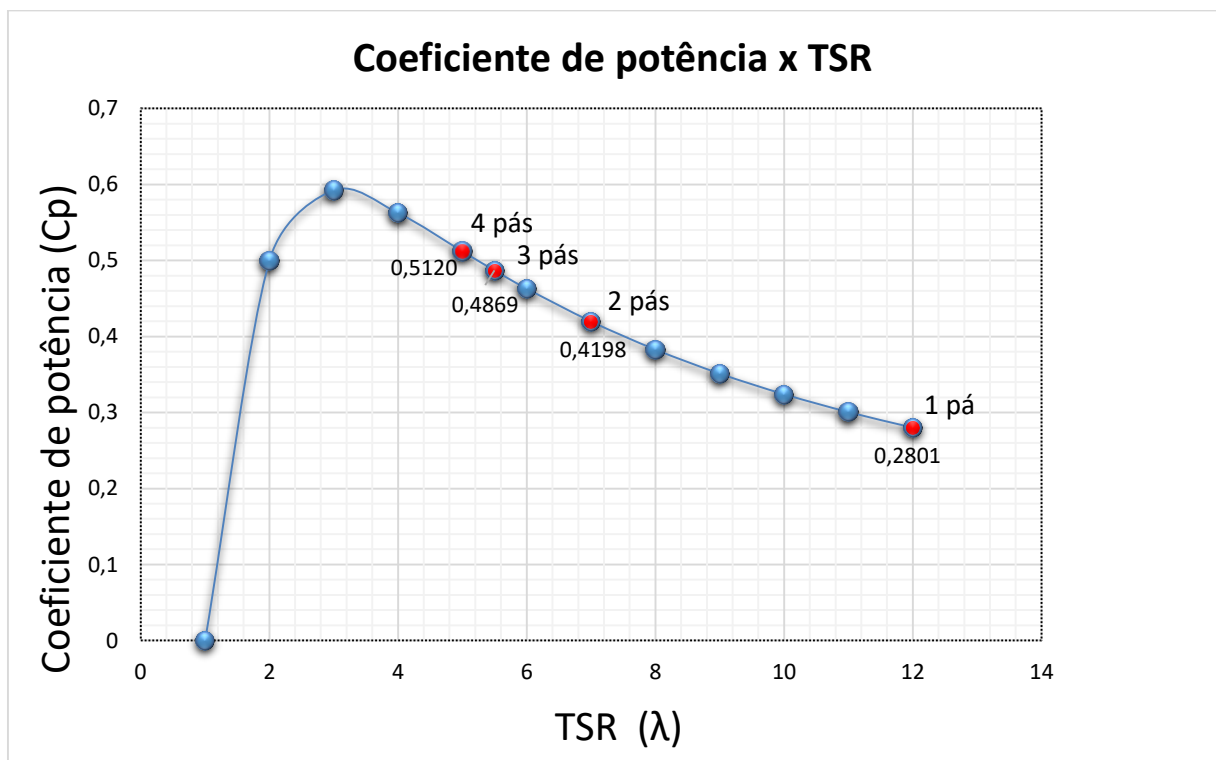


Figura 65 - Coeficiente de potência x TSR – Fonte: Autor.

Através da análise crítica do gráfico da Figura 65, observam-se maiores coeficientes de potência para as turbinas de três e quatro pás. Segundo HAU (2005), embora o coeficiente de potência das turbinas equipadas com quatro pás seja maior do que o das turbinas equipadas com três, o seu uso é considerado inviável, pois a diferença entre ambos é da ordem de 1%.

5. CONCLUSÃO

Em 2005 o país líder do ranking em geração de energia eólica era a Alemanha, sendo que em 2008 foi ultrapassada pelos EUA, e desde 2010 a China ocupa o lugar de maior produtor mundial de energia eólica. Segundo a Organização Internacional Especializada em Energia Eólica, Global Wind Energy Council (GWEC), em 2016 o Brasil passou ocupar o quinto lugar na classificação mundial no que diz a respeito à capacidade instalada dessa energia.

Portanto, o atual projeto visa a colaboração, de certo modo, com a crescente ascensão da produção de energia eólica no país. Portanto, apresenta uma análise comparativa de aerogeradores, almejando-se que o mesmo tenha colaborado para a propagação da utilização dessa fonte energética que é inesgotável, limpa e uma opção à geração de energia tradicional.

Diante dos tópicos abordados no desenvolvimento absorvem-se as seguintes conclusões:

- Na análise quanto à altura da torre conclui-se que o aumento da potência real está relacionado ao acréscimo da altura do rotor, pois a variação das potências é proporcional ao cubo da velocidade do vento, ou seja, se a velocidade dobrar, tem-se 8 vezes a potência anterior, ao passo que se a velocidade se reduzir à metade, a potência reduz para apenas 12,5%. Por conta disso, é tão importante a escolha de locais com boas velocidades médias de vento para a instalação de aerogeradores.
- Na análise quanto ao diâmetro do rotor, observando-se as equações de potência é possível verificar de imediato a proporcionalidade entre a área do rotor, que é função do diâmetro, e os valores de potência obtidos.
Através dos cálculos executados e dos valores plotados no gráfico é possível averiguar o aumento exponencial dos valores de potência disponível e real mediante o aumento do diâmetro do rotor.
De acordo com esta análise, determina-se a aplicação de aerogeradores com maior diâmetro possível, respeitando-se a viabilidade técnica e econômica do projeto.
- Na análise quanto ao número de pás, observa-se que as turbinas com menores quantidades de pás alcançam maiores velocidades e geram menor torque, as turbinas equipadas com maior número de pás desenvolvem rotações mais baixas e,

consequentemente, maior torque no eixo. Analisando os cálculos e o gráfico plotado tem-se que, dentro do intervalo estudado, o acréscimo do número de pás resulta no aumento do coeficiente de potência. Embora as turbinas equipadas com quatro pás tenham maior coeficiente de potência em relação às de três, seu uso é considerado inviável, pois a diferença entre ambos é praticamente desprezível.

Diante do trabalho apresentado, onde são tratados tecnicamente os principais parâmetros de projeto de aerogeradores, são sugeridos os seguintes temas para trabalhos futuros:

- Análise econômica da influência dos principais parâmetros de projeto nos aerogeradores;
- Análise técnica e econômica da influência dos principais mecanismos de controle de potência nos aerogeradores.

6. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ABB. *Better world. Um novo vento para os parques eólicos offshore*. 2012. Disponível em: <<http://www.abb.com.br/cawp/seitp326/d431fa87bc75752c12578f5002f29c2.aspx>>. Acesso em: 13 ago 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. *Atlas de Energia Elétrica do Brasil* - Brasília, DF, 2008. p. 23 à 48.

AMARANTE, O. A. C.; SILVA, F. J. L.; FILHO, L. G. R.; *Atlas de Energia Eólica do Rio de Janeiro* – Rio de Janeiro, 2002. p. 25 a 47.

AMARANTE, O. A. C.; *Atlas do Potencial Eólico Brasileiro*. MME/Eletróbrás/CEPEL–Brasília, 2001.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G.; *Materials Science and Engineering - An Introduction*. 8ª. ed. Hoboken, Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc., v. I, 2010.

CASTRO, R. M.G.; *Energias Renováveis e Produção Descentralizada - Introdução à Energia Eólica*. 2003. 70 f. Universidade Técnica de Lisboa, 2003.

CEMIG; *Alternativas Energéticas – Uma visão CEMIG*. Companhia Energética de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

DUTRA, R. M. *Energia eólica: Princípios e tecnologia*. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica, Rio de Janeiro, 2008.

GARCÍA, F. H.; *Análise Experimental e Simulação de Sistemas Híbridos Eólico-Fotovoltaicos*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

GASCH, R.; TWELE, J.; *Wind Power Plants: Fundamentals, Design, Construction and Operation*. 2. ed. Berlin: Springer, 2011.

GRUBB, M. J; MEYER, N. I. *Wind energy: resources, systems and regional strategies*. In: JOHANSSON, T. B. et. al. *Renewable energy: sources for fuels and electricity*. Washington, D.C.: Island Press, 1993.

GWEC. Global Wind Energy Council. *Global Wind Energy Outlook 2016*. 2016. Disponível em <<http://gwec.net/global-figures/graphs/>>. Acesso em: 17 jul. 2017.

GWEC. Global Wind Energy Council. *Global Wind Energy Outlook 2008*. 2008. Disponível em <http://gwec.net/wp-content/uploads/2012/08/GWEO_2008_final.pdf>. Acesso em: 12 jun. 2017.

HANCOCK, M.; *Wooden Wind Turbine Blades*. Wind Energy Institute. Flensburg, Alemanha, 2014.

HANSEN, L. H., et al; *Conceptual Survey of Generators and Power Eletronics for Wind Turbines*. 2001. 108 f. Riso National Laboratory, Roskilde, Dinamarca, 2001.

HASSAN, U; SYKES, D. M.; *Wind Structure and Statistics*. In FRESIS, L.L (Ed.). *Wind Energy Conversion Systems*. New York: Prentice Hall, 1990. P.11-32.

HAU, E.; *Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics*. 3^a. ed. Munich, Alemanha: Springer, 2005.

HIRATA, H. M.; *Uma Introdução ao Aproveitamento da Energia Eólica*. Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, Rio de Janeiro, 2004.

JERVELL, J. T.; *Estudo da Influência das Características do Vento no Desempenho de Aerogeradores*. 2008. 75 f. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2008.

MARQUES, J.; *Turbinas Eólicas: Modelos, Análise e Controle do Gerador de Indução com Dupla Alimentação*. 2004. 132 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

MARTINS, F. R.; GUARNIERI, R. A.; PEREIRA, E. B.; *O Aproveitamento da Energia Eólica*. 2007. 13 f. Artigo Científico – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Centro de previsão do Tempo e Estudos Climáticos, São José dos Campos, 2007.

MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIAS. PROINFA. Disponível em: <www.mme.gov.br/programas/proinfa>. Acesso em: 11 abr, 2017.

MOLLY, J. P.; *Wind Energy in the World*. Seminário de Energia Eólica. DEWI, Rio de Janeiro, 2001.

MÜLLER, N. M.; *Projeto de uma Turbina Eólica de Eixo Horizontal*. 2015. 100 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

ÓSKARSDÓTTIR, M. Ó.; *A General Description and Comparison of Horizontal Axis Wind Turbines and Vertical Axis Wind Turbines*. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso - University of Iceland, 2014.

PAVINATTO, E. F.; *Ferramenta para Auxílio à Análise de Viabilidade da Conexão de Parques Eólicos à Rede Elétrica*. 2005. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro 2005.

PINTO, M; *Fundamentos da Energia Eólica*. Rio de Janeiro, LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora, 2013.

RODRIGUES. L. E; *Fundamentos da Engenharia Aeronáutica com Aplicações ao Projeto SAE-AeroDesign: Aerodinâmica e Desempenho*. Salto, São Paulo, edição do autor, 2014.

SIEMENS, *Ficha técnica Siemens Wind Turbine SWT-2.3-108*. Hamburg, 2011.

SIEMENS, *Ficha técnica Siemens Wind Turbine SWT-2.3-101*. Hamburg, 2011.

SILVA, P. C. *Sistema para Tratamento, Armazenamento e Disseminação de Dados de Vento*. 1999. 113 f. Tese de Mestrado – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999.

SILVA, R. F.; *Emulação de uma Turbina Eólica e Controle Vetorial do Gerador de Indução Rotor Gaiola de Esquilo para um Sistema Eólico*. 2012. 114 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

