

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
UNIVERSIDADE ABERTA DO BRASIL
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA
APLICADA AOS PROCESSOS PRODUTIVOS

Fabiano Utzig

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE GERADORES A PARTIR DA
CARACTERIZAÇÃO DO POTENCIAL EÓLICO**

Panambi, RS
2017

Fabiano Utzig

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE GERADORES A PARTIR DA
CARACTERIZAÇÃO DO POTENCIAL EÓLICO**

Monografia apresentada ao Curso de Eficiência Energética Aplicada aos Processos Produtivos (EaD), Polo UAB Panambi da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Especialista em Eficiência Energética Aplicada aos Processos Produtivos.**

Orientador: Prof. Dr. Geomar Machado Martins

Panambi, RS
2017

Fabiano Utzig

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE GERADORES A PARTIR DA
CARACTERIZAÇÃO DO POTENCIAL EÓLICO**

Monografia apresentada ao Curso de Eficiência Energética Aplicada aos Processos Produtivos (EaD), Polo UAB Panambi da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Especialista em Eficiência Energética Aplicada aos Processos Produtivos**.

Aprovado em 28 de agosto de 2017:

Claudio Roberto Losekann, Dr. (UFSM)
(Presidente)

Cristiano José Scheuer, Dr. (UFSM)

Ademar Michels, Dr. (UFSM)

Panambi, RS
2017

RESUMO

ANÁLISE DE DESEMPENHO DE GERADORES A PARTIR DA CARACTERIZAÇÃO DO POTENCIAL EÓLICO

AUTOR: Fabiano Utzig
ORIENTADOR: Geomar Machado Martins

A ascensão da geração eólica no país e no mundo promoveu o surgimento de diversos fabricantes de aerogeradores, cada um com suas próprias características e especificações técnicas.

Esta diversidade torna imprescindível avaliar e comparar cada modelo, pois suas particularidades podem resultar em consideráveis variações na produção de energia e respectivamente no tempo de retorno do investimento para o empreendimento.

Este trabalho tem como objetivo realizar uma análise técnica de alguns modelos de aerogeradores disponíveis no mercado e conhecer o seu desempenho energético em relação as características de vento de um local específico.

Desta forma, de posse dos dados de medição do vento, da confirmação do potencial eólico na região e da viabilidade do empreendimento, foi obtido o resultado de geração de energia para cada modelo de aerogerador, com base em critérios técnicos comumente observados na escolha desses equipamentos.

Para esta análise foi utilizado o *Software* Alwin.

Palavras-chave: Energia Eólica, Aerogeradores, *Software* Alwin, Desempenho Energético.

ABSTRACT

ANALYSIS OF GENERATOR PERFORMANCE FROM THE CHARACTERIZATION OF WIND POTENTIAL

AUTHOR: Fabiano Utzig
ORIENTADOR: Geomar Machado Martins

The rise of wind generation in the country and the world has promoted the emergence of several manufacturers of wind turbines, each with its own characteristics and technical specifications. This diversity makes it essential to evaluate and compare each model, since its particularities can result in considerable variations in energy production and, respectively, the time of return of the investment to the enterprise.

This work aims to perform a technical analysis of some models of wind turbines available in the market and know their energy performance in relation to the wind characteristics of a specific location.

In this way, the data of wind measurement, the confirmation of the wind potential in the region and the viability of the project were obtained, generating energy for each wind turbine model, based on technical criteria commonly observed in the choice of these equipments.

Alwin Software was used for this analysis.

Keywords: Wind Energy, Wind Turbines, Software Alwin, Energy Performance.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
1.1	OBJETIVOS	8
1.1.1	Objetivo geral	8
1.1.2	Objetivos específicos	8
1.2	JUSTIFICATIVA	8
2	REFERENCIAL TEÓRICO	10
2.1	HISTÓRICO DA ENERGIA EÓLICA	10
2.1.1	Histórico da energia eólica mundial	10
2.1.2	Histórico da energia eólica no Brasil	13
2.2	A ENERGIA CINÉTICA DO VENTO	15
2.3	A VELOCIDADE DO VENTO	18
2.4	COMPORTAMENTO PROBABILÍSTICO DO VENTO	20
2.4.1	Distribuição de Rayleigh	21
2.4.2	Distribuição de Weibull	22
2.5	O AEROGERADOR	26
2.5.1	Partes construtivas de um aerogerador	26
2.5.1.1	Turbinas eólicas	27
2.5.1.1.1	Turbinas de eixo vertical	27
2.5.1.1.2	Turbinas de eixo horizontal	29
2.5.1.2	Nacele	30
2.5.1.3	Gerador	31
2.5.1.3.1	Gerador síncrono	32
2.5.1.3.2	Gerador assíncrono	34
2.5.1.4	Torre	35
2.5.1.5	Fundação	36
2.5.2	Classificação de aerogeradores	37
2.6	CONCEITOS DA CONVERSÃO DE ENERGIA	40
2.7	PRODUÇÃO DE ENERGIA DE UM GERADOR	44
3	METODOLOGIA	50
3.1	SOFTWARES DE SIMULAÇÃO EÓLICA	51
3.1.1	Software Alwin	53
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	59
5	CONCLUSÕES	70
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72

1 INTRODUÇÃO

O progresso de um país é diretamente ligado à sua demanda por energia, independente da sua origem, seja ela do petróleo, gás natural, energia elétrica, carvão mineral ou qualquer outra, não é difícil ouvir que sem energia não há desenvolvimento.

Porém, no atual cenário energético do nosso país e do mundo em geral, é possível identificar o aumento da preocupação em relação as formas de geração de energia elétrica.

As previsões do esgotamento dos recursos energéticos de origem fóssil em curto e médio prazo, associadas a projeções de crescimento do consumo tem proporcionado o exponencial crescimento das fontes de energia renovável, principalmente nos últimos anos.

Dentre as diferentes fontes em ascendência, é perceptível que a energia eólica vem tomando frente com grande aumento da capacidade instalada, progredindo de 0,2% em 2010 a 3,5% em 2016, do total da oferta de energia elétrica no Brasil de acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE).

Países como Alemanha, Estados Unidos e China, são exemplos de grandes potências que desde meados de 2005 lideravam o ramo da energia eólica em capacidade instalada e hoje outros países vem se posicionando, seguindo os passos de países já desenvolvidos.

No Brasil apesar do grande potencial eólico existente, pode-se dizer que houve um considerável atraso da ascensão da energia eólica, fato ocorrido principalmente devido à grande oferta de energia hidroelétrica do nosso país.

Hoje restam poucos locais inexplorados para grandes potenciais hidroelétricos e a grande maioria dos empreendimentos nesse tipo de usina é voltado a potenciais menores principalmente com as chamadas usinas a fio d'água.

Frente a esse cenário, a evolução do uso de fontes renováveis é imprescindível e cada vez mais novas tecnologias surgirão a fim promover ganhos tanto na obtenção de novas formas de obter energia de forma renovável, como também no aperfeiçoamento das fontes de energia já utilizadas.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Este trabalho objetiva realizar um estudo comparativo entre estimativas de geração e desempenho para diferentes modelos de geradores eólicos, considerando as características de potencial eólico de uma determinada região.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho contemplam, obter dados de vento a partir de medição anemométrica, estudar tipos e características de aerogeradores, rever conceitos de geração de energia a partir da força dos ventos, identificar *softwares* para simulação de sistemas eólicos para geração de energia e identificar, entre os geradores estudados, os que apresentam melhor desempenho energético para o potencial eólico conhecido.

1.2 JUSTIFICATIVA

De acordo com o Ministério de Minas e Energia, um dos órgãos responsáveis pela publicação do Atlas Eólico Brasileiro e também dos estados, o Rio Grande do Sul possui grande potencial eólico para geração de energia.

Conforme o Atlas Eólico do Rio Grande do Sul, lançado em 2014, em terra firme (*onshore*), a 100m de altura, o potencial é de 103GW, enquanto que a 150m chega a 245GW.

Sobre as lagoas (*offshore*), a 100m de altura, o potencial é de 34GW, enquanto que, para lâminas d'água de até 50 m, o potencial eólico sobre o oceano é de 80GW. Esses valores são considerados números bastante expressivos.

Com essa grande oferta de energia disponível, o Rio Grande do Sul é hoje o quarto estado com maior capacidade instalada para geração eólica do Brasil.

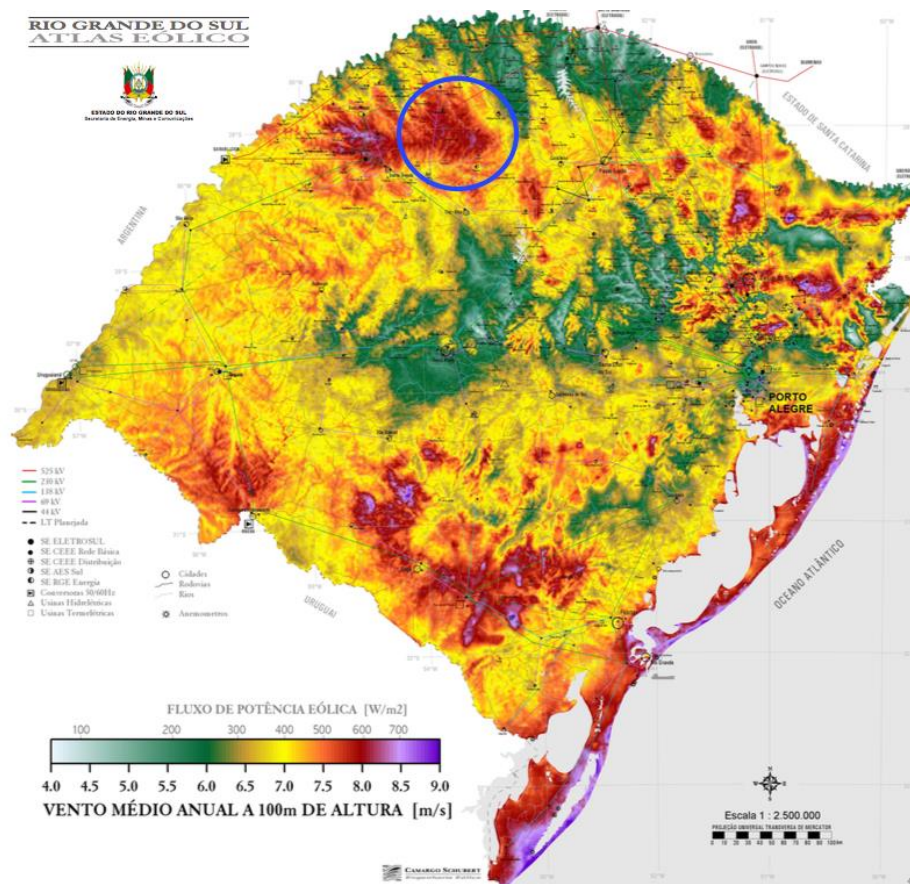
No contexto deste trabalho, a região na qual foram realizadas as medições do potencial eólico é conhecida como Planalto das Missões. Essa região possui ventos com velocidade média de 7m/s e é uma das seis áreas destacadas pelo Atlas anterior (2002) como de maior potencial do estado.

Os dados de medição neste local são resultados de um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento realizados pela empresa Hidroelétrica Panambi (HIDROPAN) e a

Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) o qual se iniciou no ano de 2013 e foi concluído em 2016.

A Figura 1 apresenta o mapa das características de vento do Rio Grande do Sul, onde é possível visualizar as diferentes velocidades médias de vento a uma altura de medição de 100 metros e em destaque, com o círculo na cor azul, a região de estudo.

Figura 1 – Velocidade do vento média anual a 100m



Fonte: Atlas Eólico do Rio Grande do Sul (2002)

O resultado do projeto mostrou a existência de um excelente potencial eólico na região e da consequente viabilidade de instalação de um parque eólico no local, porém estudos adicionais relacionados a especificações técnicas do parque ainda não foram realizados.

Nesse contexto surgiu a proposta de estudo com diferentes aerogeradores para identificar, entre alguns modelos disponíveis, aqueles que apresentam melhores resultados nas condições existentes no terreno.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 HISTÓRICO DA ENERGIA EÓLICA

2.1.1 Histórico da energia eólica mundial

O aproveitamento da energia cinética do vento é bastante antigo, sendo primariamente aplicado na navegação em barcos a velas, tornando possível mais tarde a expansão da civilização entre continentes.

No entanto, os primeiros registros confirmados da utilização do vento em máquinas motoras retomam do século X, na Pérsia, região de Sistão, hoje sudeste do Irã na movimentação dos moinhos de vento (Atlas Eólico do Rio Grande do Sul, 2014).

Os primeiros moinhos eram construídos com eixos verticais e envoltos com paredes de madeira as quais possuíam aberturas longitudinais por onde o vento escoava. Estes sistemas tornaram-se comuns no Oriente Médio e na Ásia Central, posteriormente chegando à China e Índia (Atlas Eólico do Rio Grande do Sul, 2014).

Além da moagem de grãos, os moinhos eram usados também no bombeamento água.

A partir do século XI, na Idade Média, os moinhos são usados intensivamente na Europa ocidental, onde se desenvolveram os moinhos de eixo horizontal (pivotados), usados na moagem de grãos e na drenagem de áreas de alague para cultivo ou construção. Os primeiros europeus que vieram à América trouxeram a tecnologia consigo (Atlas Eólico do Rio Grande do Sul, 2014).

Em relação a produção de energia elétrica, a história nos relata que no final do século XIX, esses sistemas eólicos começaram a ser empregados e a primeira turbina com essa função foi desenvolvida por Charles F. Brushque nos Estado Unidos. O gerador possuía 12kW de potência. Na mesma época, na cidade de Askon na Dinamarca, o cientista Poul la Cour adaptava moinhos de 4 pás para geração de corrente contínua (Atlas Eólico do Rio Grande do Sul, 2014).

Nesse período surgiram diversos outros inventores cujos sistemas e metodologias eram semelhantes e assim em 1904 foi fundada a Sociedade dos Eletricistas Eólicos (*The Renewable Energy World*, 2014).

Em meados do ano de 1930 surgiram alguns pequenos aerogeradores que foram amplamente utilizados no meio rural, porém com o passar dos anos estes começaram a se tornar obsoletos devido a extensão de redes de distribuição e a necessidade de maior demanda para consumo.

A geração de energia elétrica conectada ao sistema elétrico utilizando turbinas de grande porte iniciou-se durante as décadas de 1940 e 1950, nos Estados Unidos e na Dinamarca. Em 1955 na Alemanha, Ulrich Hütter foi o precursor das atuais turbinas com pás fabricadas em material composto, controle de passo e torre tubular esbelta, como atualmente utilizadas (Atlas Eólico do Rio Grande do Sul, 2014).

Em 1970, a percepção de que combustíveis de origem fóssil eram finitos, deu origem a primeira crise de preços do petróleo e então diversos países, começaram a reavaliar as formas de produção de energia e entenderam que deveriam diversificar suas matrizes energéticas e aumentar o uso de fontes renováveis. Esse período foi considerado um dos mais importantes para o desenvolvimento da energia eólica no mundo (Atlas Eólico do Rio Grande do Sul, 2014).

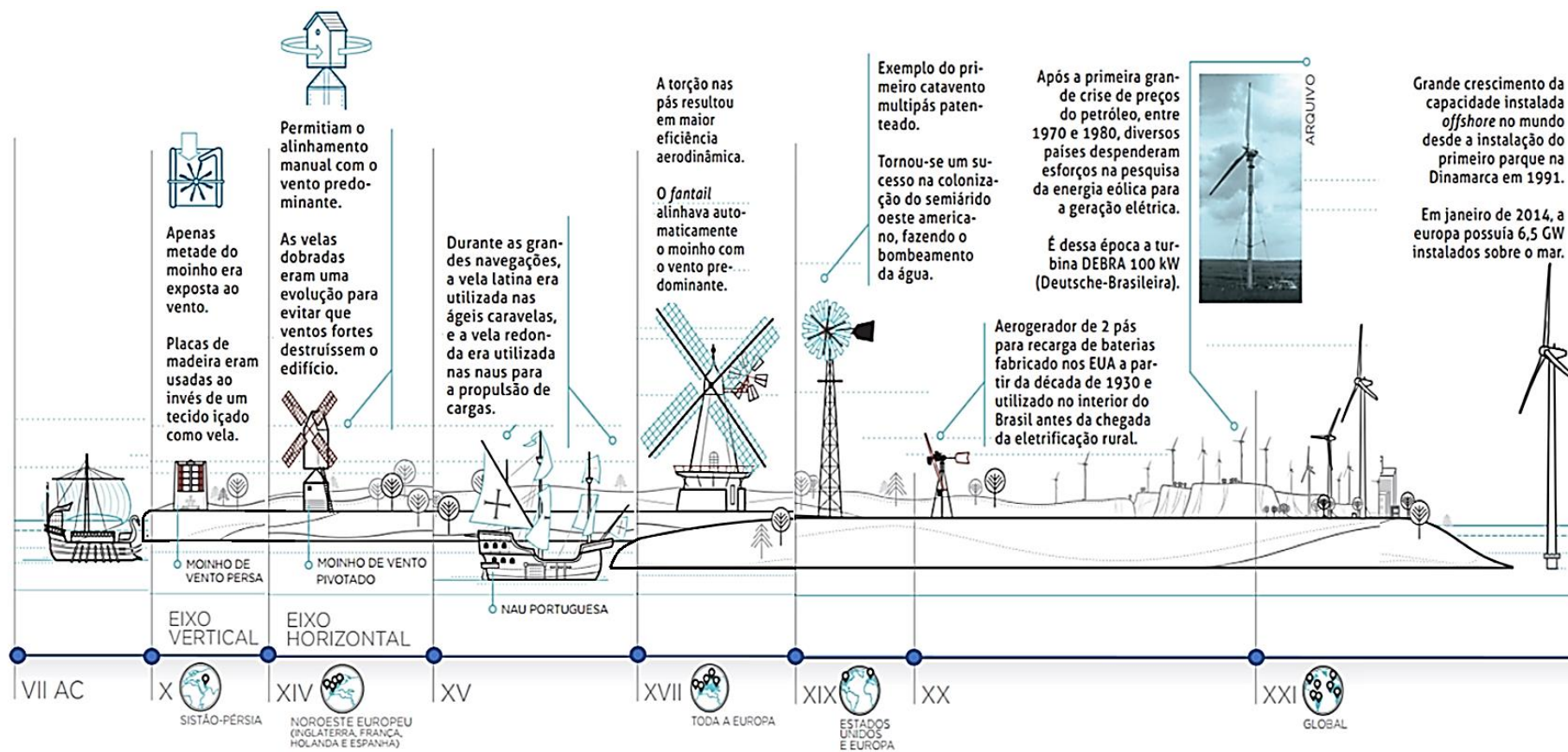
Na década de 1980, houve nova onda de esforços governamentais para incentivar o mercado eólico, levando à redução do custo de quilowatt instalado, ao aperfeiçoamento de tecnologias, aumento da capacidade unitária e da produção de energia de aerogeradores e a produção destes em escala industrial (Atlas Eólico do Rio Grande do Sul, 2014).

Em seguida novos acordos relacionados a preservação e redução de impactos ao meio ambiente surgiram e diversos países comprometeram-se a reduzir suas emissões de CO² e outros gases causadores do efeito estufa.

Alavancada por estas e outras questões relacionadas produção, consumo e meio ambiente, um número progressivo de fabricantes de turbinas eólicas surgiu no mercado, as quais rapidamente evoluíam em performance e custos, pois essa fonte de energia renovável tinha grande aceitação social.

A Figura 2 apresenta a evolução técnica do aproveitamento da energia oferecida pelo vento no decorrer dos séculos.

Figura 2 – Cronologia técnica do aproveitamento do vento



Fonte: (Adaptada Atlas Eólico do Rio Grande do Sul, 2014)

2.1.2 Histórico da energia eólica no Brasil

No Brasil a energia eólica teve início em 1992 no arquipélago de Fernando de Noronha onde entrou em operação comercial o primeiro aerogerador instalado em território nacional. Essa iniciativa foi resultado de uma parceria entre o Centro Brasileiro de Energia Eólica (CBEE) e a Companhia Energética de Pernambuco (CELPE), através de financiamento do instituto de pesquisas dinamarquês Folkecenter. O aerogerador tinha potência de 75 kW e foi o primeiro a entrar em operação comercial na América do Sul (Altas da Energia Elétrica no Brasil, 2002).

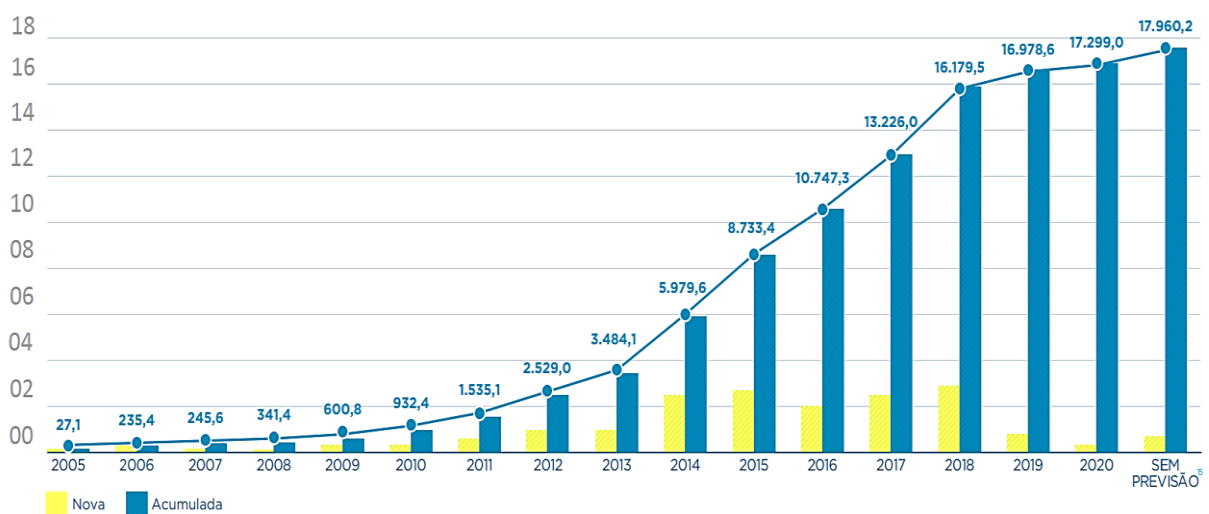
Pelo período de 10 anos, não houve significativo avanço na geração de energia eólica no país de forma que não houve uma consolidação deste mercado. Essa estagnação ocorreu em parte pela falta de políticas que instigassem e facilitassem o crescimento e também devido ao alto custo dessa tecnologia frente a outras fontes de energia.

Alguns anos mais tarde, após a crise energética de 2001, começou a ocorrer o início do fortalecimento da energia eólica na matriz energética nacional, principalmente depois do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas (PROINFA) que possibilitou consideráveis melhoras para fabricantes e investidores interessados nesse ramo (Canal Bioenergia, 2015).

A Figura 3 apresenta a evolução da capacidade eólica instalada no Brasil bem como a projeção para alguns anos considerando o valor acumulado.

Figura 3 – Evolução da capacidade instalada no Brasil (MW)

EVOLUÇÃO DA CAPACIDADE INSTALADA (MW)



Fonte: (Adaptada ANEEL/ABEEólica, 2016)

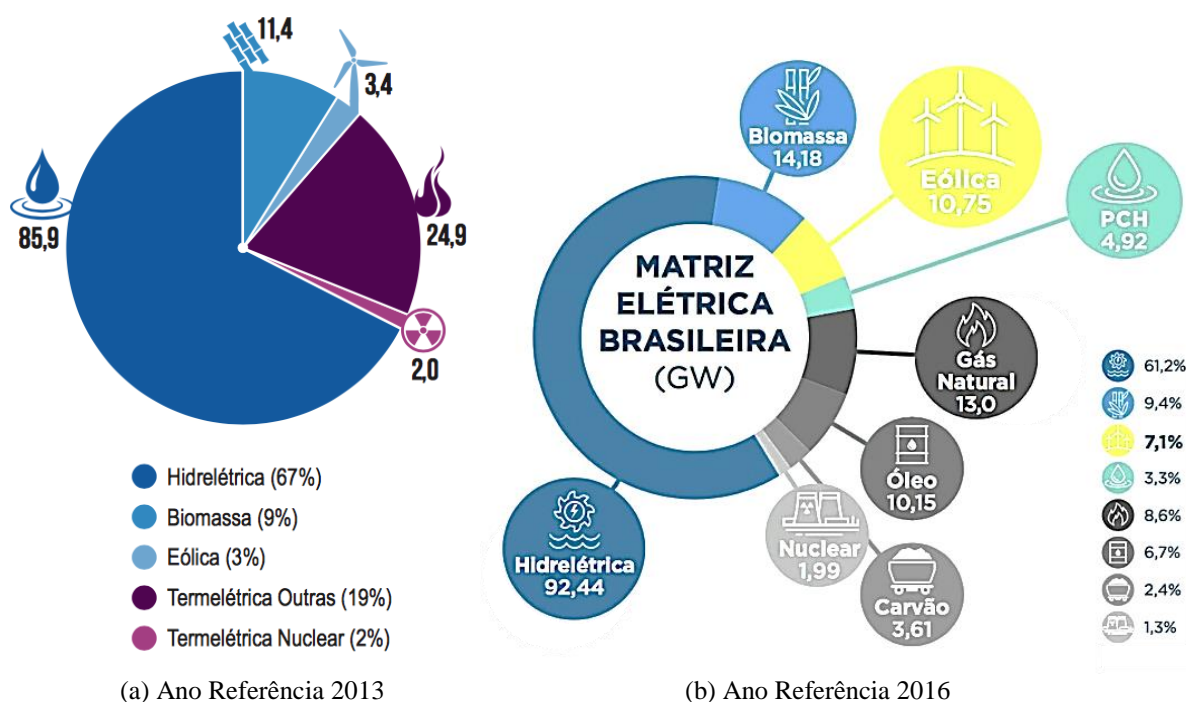
No final de 2009 ocorreu o Segundo Leilão de Energia Reserva (LER), que foi o primeiro leilão de comercialização de energia voltado exclusivamente para a fonte eólica (Canal Bioenergia, 2015).

A partir de 2010 o avanço da energia eólica no Brasil começou a disparar e atualmente esta energia é considerada competitiva frente as outras fontes de energia renováveis.

Como pode-se observar na Figura 4, a expansão foi muito grande, disparando de 3,4% em 2013 para 7,1% em 2016 a participação da fonte eólica na matriz energética nacional, de acordo com a Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEÓLICA).

Em 2016 a participação da energia eólica na matriz energética brasileira foi de 10,75GW, o que representa 7,1% da geração de energia total produzida no Brasil (ABEEÓLICA, Boletim Anual 2016).

Figura 4 – Participação da geração eólica na matriz energética brasileira

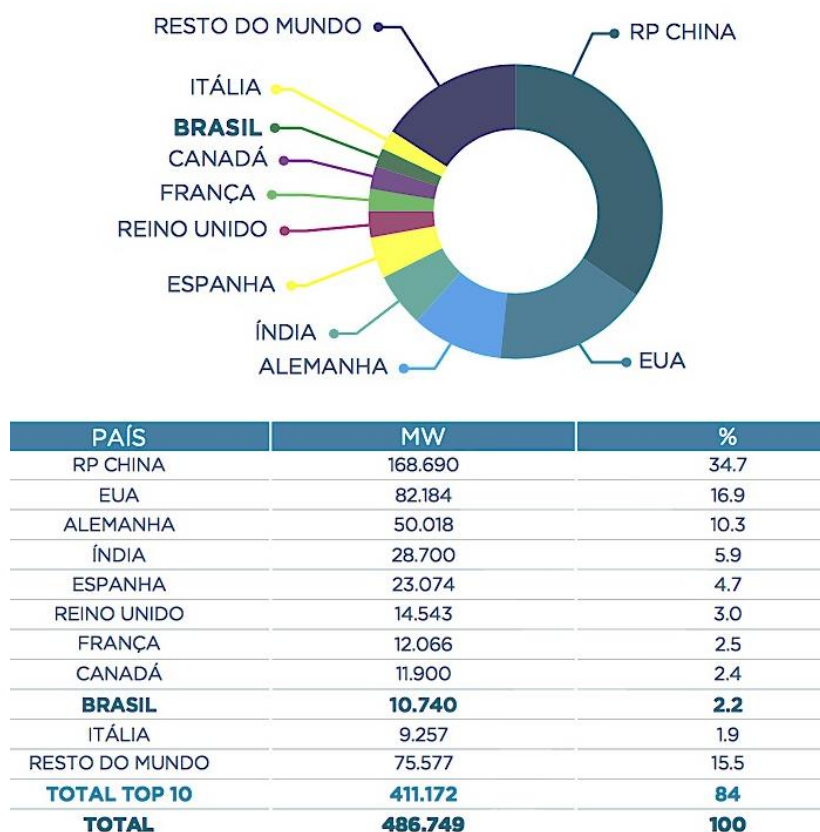


Fonte: (Adaptada ANEEL/ABEEólica, 2016)

Ainda no ano passado o Brasil ocupou a 9ª posição no ranking dos países com maior carga instalada de acordo com a ABEEólica.

Na Figura 5, pode-se verificar o ranking dos países com maior capacidade instalada em energia eólica, onde o Brasil aparece em destaque integrando os primeiros 10 países do mundo em 2016.

Figura 5 – Ranking capacidade eólica acumulada em 2016



Fonte: (ANEEL/ABEEólica, 2016)

Brasil também subiu sete posições, nos últimos dois anos, no ranking mundial de geração eólica: em 2015, o País alcançou a 8ª posição e registrou o primeiro lugar no ranking mundial em fator de capacidade (relação entre produção efetiva e capacidade instalada) de geração eólica, com 38% (Portal Brasil, 2016).

2.2 A ENERGIA CINÉTICA DO VENTO

A energia eólica é a energia cinética do ar em movimento também chamada de vento.

O vento varia constantemente tanto em velocidade quando na direção do seu escoamento.

Assim, para realização de estudos ligados a geração de energia se faz necessário uma análise espacial e temporal do vento, onde é necessário conhecer os elementos que definem o regime local dos ventos, tais como histogramas de velocidades (adquiridos a partir de dados de vento medidos ou estimados a partir de distribuições estatísticas de frequências) e também as curvas de potência de aerogeradores.

Observando a Figura 6 onde um fluxo de ar de massa “m” que se move a uma velocidade “v” através de um cilindro imaginário de área “A”, pode-se descrever a energia cinética gerada que é dada pela equação (1):

$$E = \frac{1}{2} m v^2 \quad (1)$$

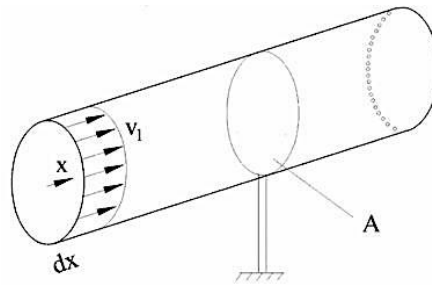
Onde:

E = Energia cinética, em Joules;

m = Massa do ar, em kg;

v = Velocidade do vento, em m/s

Figura 6 – Fluxo de ar através de uma área transversal



Fonte: Desconhecida

A potência disponível para dada condição é obtida a partir da derivada da energia cinética no tempo, expressa na equação (2):

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

Onde:

P = potência disponível no vento, em W;

\dot{E} = fluxo de energia, em J/s

\dot{m} = massa do ar, em kg/s;

E = energia cinética, em Joules;

t = tempo, em segundos;

v = velocidade do vento, em m/s;

O fluxo de massa é dado pela equação (3):

$$\dot{m} = \rho v A \quad (3)$$

Onde:

\dot{m} = fluxo de massa do ar, em kg/s;

ρ = massa específica do ar, em kg/m³;

v = velocidade do vento, em m/s

A = área da seção transversal, em m²;

Assim, substituindo a equação do fluxo de ar “ \dot{m} ”, na equação (3), obtém-se a potência disponível no vento que passa pela seção “ A ” transversal ao fluxo de ar, como indica a equação (4):

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (4)$$

Onde:

P = potência disponível no vento, em W;

ρ = massa específica do ar, em kg/m³;

v = velocidade do vento, em m/s

A = área da seção transversal, em m²;

Analisando a equação, observa-se que a potência disponível no vento é proporcional ao cubo da sua velocidade, assim um vento com velocidade de 10% superior, por exemplo, apresenta 33% mais de potência disponível, mantidas as demais condições.

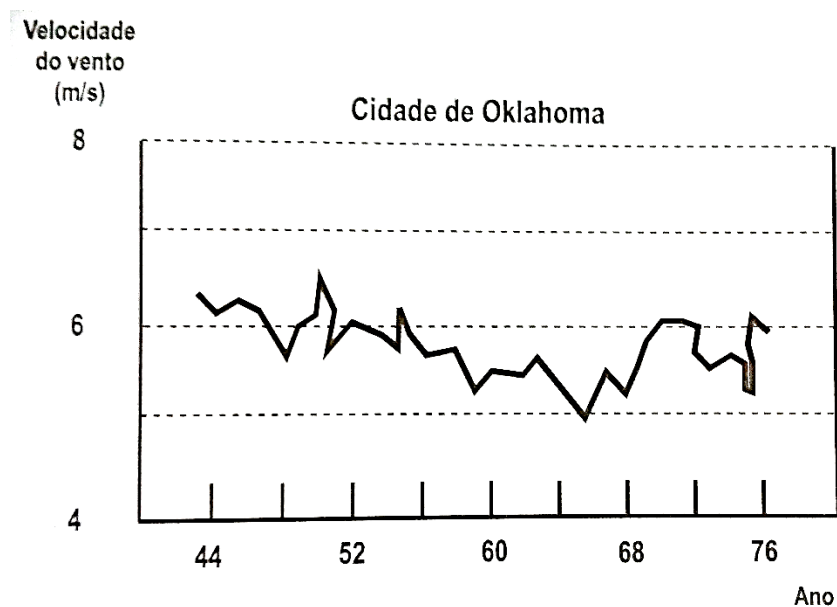
2.3 A VELOCIDADE DO VENTO

A velocidade do vento é uma variável inconstante e suas características se modificam ao longo do dia, do mês e do ano.

Na grande maioria dos casos pode haver uma variação em torno de 10% entre a velocidade média anual e a média de longo prazo.

A título de exemplo, a Figura 7 mostra a variação da velocidade média do vento durante 32 anos em Oklahoma, nos Estados Unidos.

Figura 7 – Variação da velocidade média em 32 anos



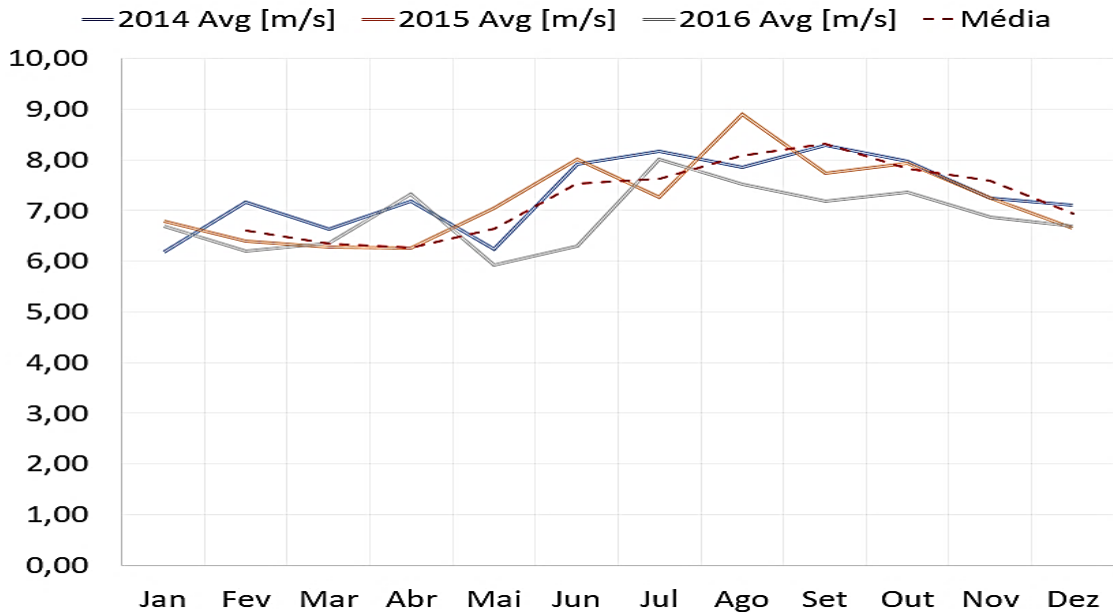
Fonte: (CUSTÓDIO, 2009)

Apesar da variação anual em torno da velocidade média do vento existir, uma característica interessante do vento é que sua sazonalidade é igual em todos os anos, ou seja, a velocidade do vento possui o mesmo comportamento em períodos iguais de anos diferentes, conforme pode-se observar na Figura 8. Esse fato está associado as diferentes estações do ano e a circulação da atmosfera.

A Figura 8 apresenta o gráfico das velocidades médias mensais do vento no local em estudo, medidos nos anos de 2014, 2015 e 2016 respectivamente.

Nele pode-se identificar as variações da média anual e da sazonalidade em torno da linha da média tracejada na cor vermelha.

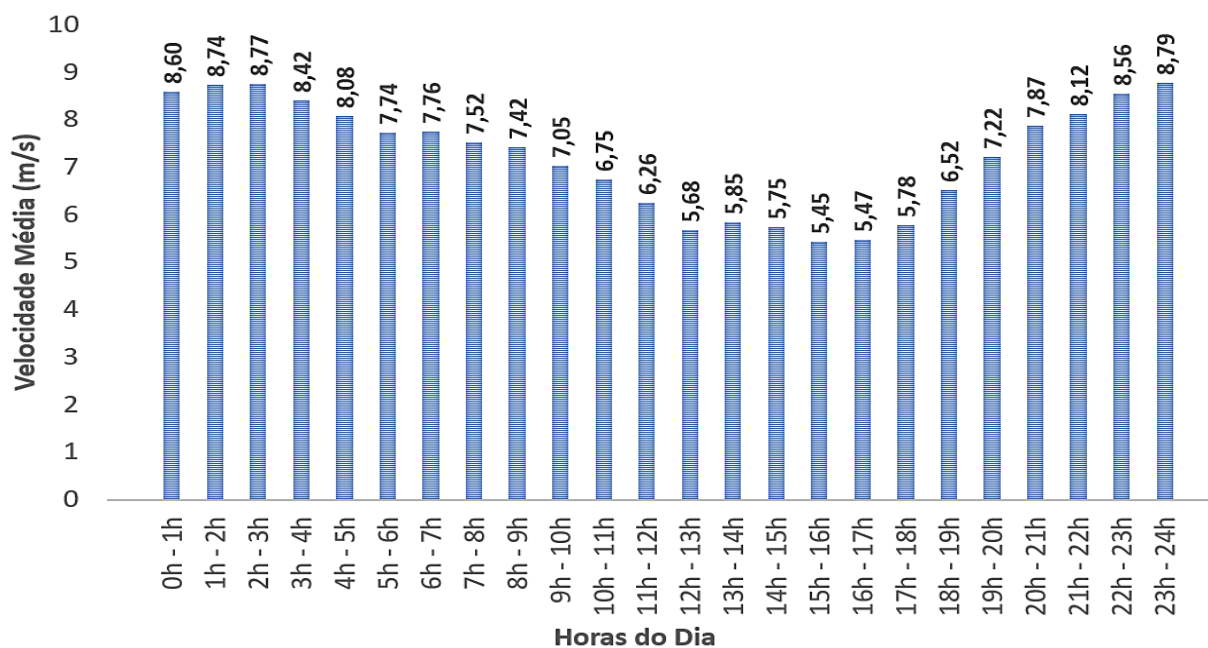
Figura 8 – Sazonalidade do vento para 3 anos de medição



Fonte: Autoria própria

O vento também apresenta variações horárias ao longo do dia conforme a Figura 9, na qual são apresentadas as velocidades médias diárias no mês de julho de 2015, no local do estudo.

Figura 9 – Variação da velocidade média horária durante o dia



Fonte: Autoria própria

2.4 COMPORTAMENTO PROBABILÍSTICO DO VENTO

Como pode-se observar, o vento possui comportamento diferente e também similar, dependendo do período em que é analisado. Porém apesar disso ele nos dá a certeza de que suas características nunca serão iguais no dia seguinte.

Dessa forma a determinação do comportamento predominante do vento em uma região requer uma análise probabilística, na qual é necessária a discretização dos dados. Para isso valores de velocidade do vento são divididos em faixas de 1m/s, valor comumente utilizado nos estudos relacionados à energia eólica. A Tabela 1 apresenta a tabulação de dados de vento em frequência relativa e número de ocorrências.

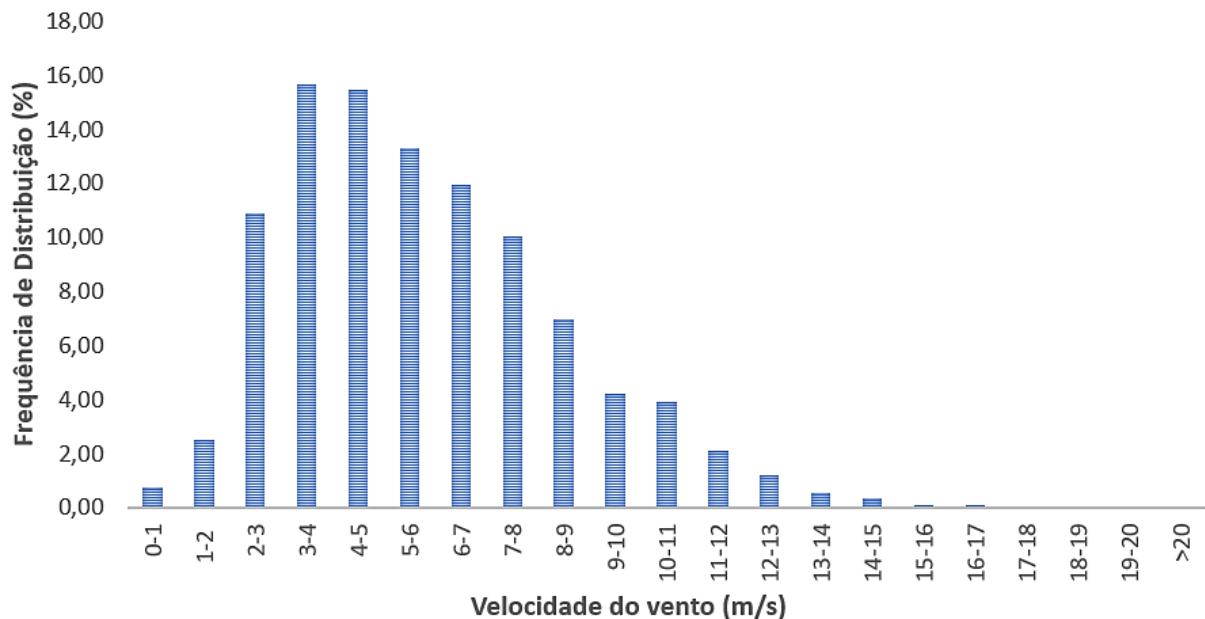
Tabela 1 – Tabulação de dados de velocidade do vento em frequência de distribuição

Velocidade do Vento (m/s)	Número de Ocorrências	Frequência Relativa (%)
0-1	47	0,73
1-2	160	2,49
2-3	700	10,89
3-4	1007	15,67
4-5	993	15,46
5-6	853	13,28
6-7	766	11,92
7-8	644	10,02
8-9	447	6,96
9-10	270	4,20
10-11	250	3,89
11-12	134	2,09
12-13	78	1,21
13-14	36	0,56
14-15	23	0,36
15-16	5	0,08
16-17	6	0,09
17-18	2	0,03
18-19	1	0,02
19-20	3	0,05
>20	0	0,00
Total	6425	100,00

Fonte: (CUSTÓDIO, 2009)

A Figura 10 apresenta a representação do histograma das frequências de distribuição da velocidade do vento.

Figura 10 – Frequência de distribuição de velocidade do vento



Fonte: Autoria Própria

2.4.1 Distribuição de Rayleigh

Como já citado, a velocidade do vento é uma variável aleatória e seu valor se modifica sazonalmente.

Para fazer a análise desta variável através de um banco de dados de medições é necessário representá-la em função de sua densidade probabilística.

A distribuição de Rayleigh é uma boa representação de casos de distribuição de velocidade do vento. É normalmente utilizada em estudos preliminares onde não se conhece o perfil de vento pois necessita apenas o conhecimento da velocidade média do vento para determinação da frequência de distribuição.

A distribuição de Rayleigh é dada pela equação (5):

$$f(v) = \frac{\pi}{2} \frac{v}{V^2} e^{-\left(\frac{\pi}{4}\right)\left(\frac{v}{V}\right)^2} \quad (5)$$

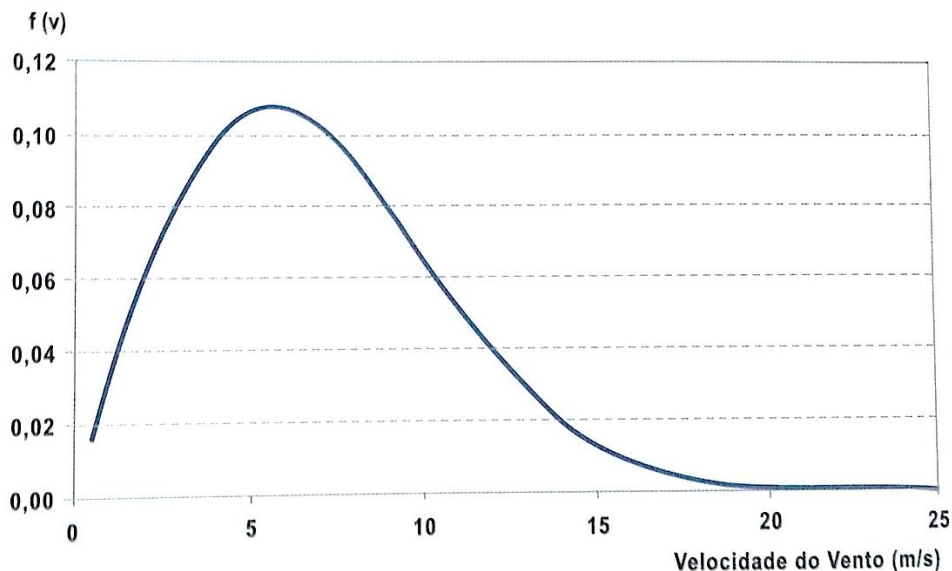
Onde:

v: velocidade do vento, em m/s;

V: velocidade média do vento, em m/s;

A partir da equação (5) pode-se construir a curva de distribuição de Rayleigh conforme apresentado na Figura 11.

Figura 11 – Distribuição de Rayleigh



Fonte: (CUSTÓDIO, 2009)

2.4.2 Distribuição de Weibull

A função que melhor descreve a estatística de velocidade do vento é a densidade de probabilidade de Weibull.

A distribuição estatística de Weibull é definida por dois parâmetros: um de escala (C), relacionado a velocidade média do vento em m/s e um de forma (k), relacionado com a variância da velocidade do vento em torno da velocidade média, adimensional.

A equação (6) representa a frequência da ocorrência de uma velocidade “u”.

$$f(u) = \frac{k}{C} \left(\frac{u}{C} \right)^{k-1} e^{-\left(\frac{u}{C} \right)^k} \quad (6)$$

Onde:

$f(u)$: probabilidade de ocorrência de velocidade do vento

u : velocidade do vento, em m/s;

k : fator de forma, adimensional;

C : fator de escala, em m/s.

O fator de forma k é dado pela equação (7):

$$k = \left(\frac{\sigma_u}{\bar{u}} \right)^{-1.086} \quad (7)$$

Onde:

σ_u : Variância da velocidade do vento;

\bar{u} : Velocidade média do vento, em m/s;

O fator c , está associado à velocidade média do vento através da função Gamma – Γ como mostra a equação (8):

$$c = \frac{\bar{u}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (8)$$

Onde:

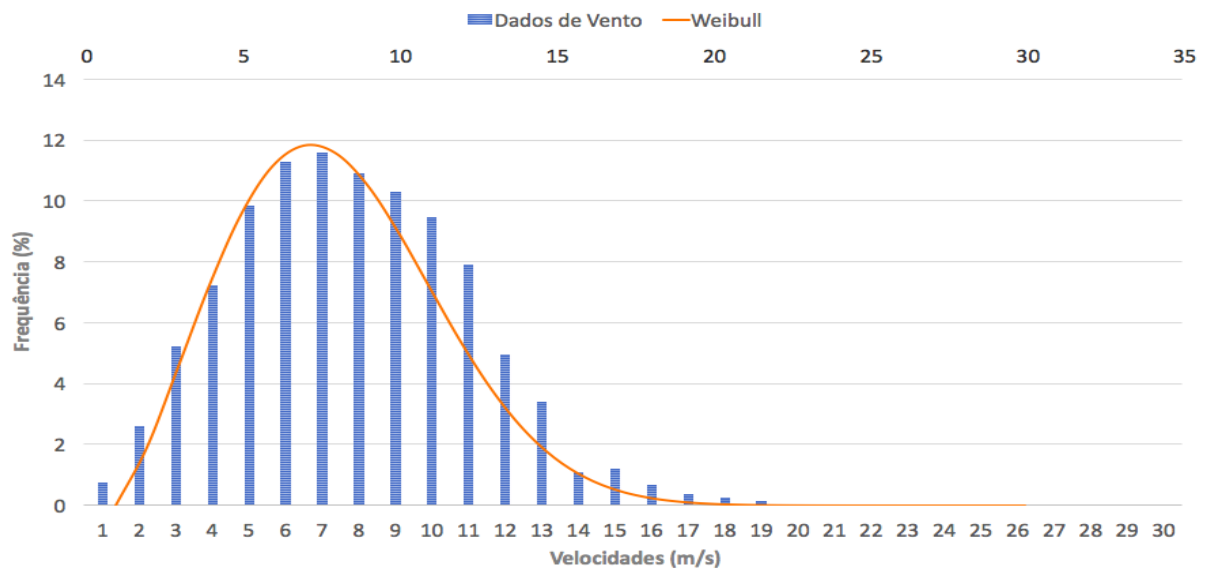
Γ : Função Gamma;

\bar{u} : velocidade média do vento, em m/s;

k : fator de forma, adimensional;

A Figura 12 apresenta a aplicação da distribuição de Weibull para uma determinada série de dados de vento representadas em forma de histograma de frequência na cor azul. A respectiva série de dados apresenta os seguintes valores calculados de fator de forma e de escala respectivamente: $k = 2,32$ e $c = 7,98$.

Figura 12 – Distribuição de Weibull



Fonte: Autoria própria

A sobreposição com a real distribuição dos dados de vento mostra a sua boa aderência e quanto maior o fator de forma do gráfico, mais próximos estão os valores da velocidade em relação à média e maior a eficiência para geração.

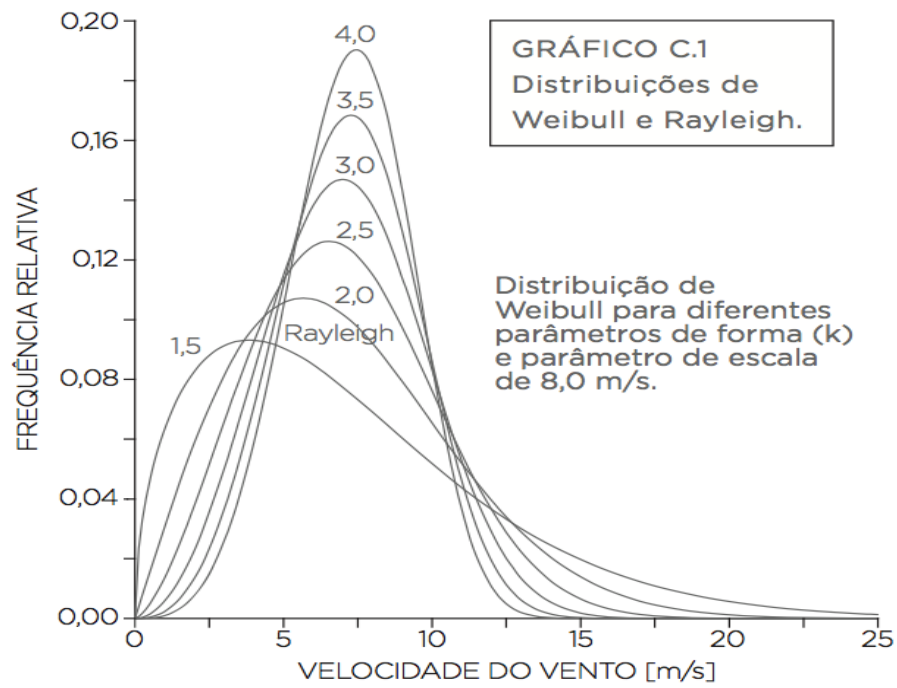
Por padrão a distribuição de Weibull possui alguns valores definidos para o fator de forma, sendo que, quando este é igual a 2, diz-se que representa a distribuição de Rayleigh.

Os fatores de forma e escala para formação da curva, permitem um ajuste mais refinado para diferentes características de vento, por isso a distribuição de Weibull é usada para adaptar a análise para condições que não são suficientemente ajustadas pela distribuição de Rayleigh.

Pode-se dizer que a distribuição de Weibull é uma generalização da distribuição de Rayleigh.

A Figura 13 apresenta a representação gráfica da distribuição de Weibull para diferentes fatores de forma.

Figura 13 – Parâmetros de forma da distribuição de Weibull



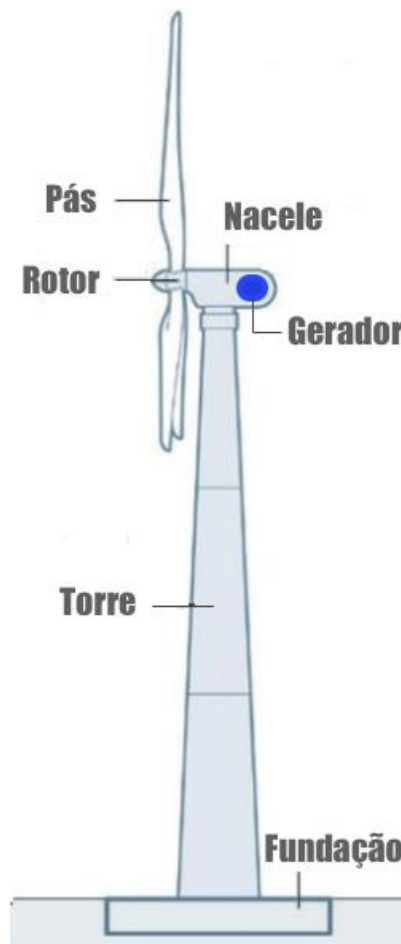
Fonte: Atlas Eólico do Rio Grande do Sul (2014)

2.5 O AEROGERADOR

2.5.1 Partes construtivas de um aerogerador

Um aerogerador possui diversos componentes, no entanto os principais são: a turbina eólica, a nacela, o gerador, a torre e as fundações. Na saída de alguns modelos de maior porte, existe ainda um transformador que eleva a tensão elétrica para um sistema de distribuição normalmente em média tensão. Cada um desses componentes é mostrado na Figura 14 e será melhor detalhado nas páginas seguintes.

Figura 14 – Componentes principais de um aerogerador



Fonte: Adaptado de (*World Steel Association*, 2012)

2.5.1.1 Turbinas eólicas

A turbina eólica é formada pelo conjunto das pás e do rotor. Esse componente é responsável por estabelecer um contato físico entre o gerador e o vento em uma primeira instância e assim realizar a extração da energia cinética do vento.

Dessa forma a turbina eólica faz o aproveitamento do potencial do vento através da sua conversão em energia mecânica.

Construtivamente, o conjunto de pás e o *hub*, que formam as turbinas eólicas, podem ter as mais variadas formas e empregar os mais variados materiais. Comumente, pás rígidas de madeira, alumínio, aço, fibra de vidro, fibra de carbono e Kevlar são os mais empregados.

2.5.1.1.1 Turbinas de eixo vertical

As turbinas de eixo vertical são mais comumente utilizadas para geração de energia em menores potências. A Figura 15, apresenta alguns dos modelos mais comuns de turbinas de eixo vertical.

Essas turbinas tem a vantagem de não necessitarem mecanismos de direcionamento e também o fato seu gerador e mecanismos de transmissão serem instalados junto ao solo, o que facilita eventuais manutenções.

Exemplos típicos destas turbinas são os modelos Savonius e Darrieus.

A turbina Savonius possui torque médio e alto, baixa velocidade do rotor, por isso é usada em bombeamento d'água e moagem de grãos. Possui controle de torque com o ajuste do fluxo de ar entre as pás.

A turbina Darrieus, no entanto, é usada para geração de energia elétrica, por isso a velocidade do seu rotor é alta, movendo-se algumas vezes mais rápida que o vento. Possui dificuldade de arranque, por isso necessita de um dispositivo de arranque auxiliar. É um equipamento de bom rendimento, porém usado em menores escalas.

Figura 15 – Turbinas de eixo vertical



Turbina Giromill



Turbina Darrieus Helicoidal



Turbina Savonius



Turbina WindSide



Turbina Darrieus

Fonte: Adaptada Google Imagens

Em geral modelos similares e derivativos dos apresentados podem surgir, porém o princípio de funcionamento sempre será o mesmo.

2.5.1.1.2 Turbinas de eixo horizontal

As turbinas eixo vertical são as mais usadas para geração de energia elétrica em larga escala. Essas turbinas podem conter diferentes números de pás, o que interfere diretamente no torque do eixo do rotor, ou seja, quanto menor o número de pás, mais rápido o rotor gira e quanto maior número de pás maior o esforço da turbina sobre o eixo do rotor.

As turbinas eólicas de maior número de pás são comumente utilizadas para bombeamento de água e moinhos, onde é necessário maior torque e baixas velocidades. Já as turbinas de menor número de pás são empregadas em sistemas de geração de energia elétrica. Ao contrário das turbinas de eixo vertical, as de eixo horizontal necessitam de sistema de controle e ajuste de posição para aumentar a eficiência do gerador posicionando o eixo do rotor em alinhamento com a direção do vento predominante.

As turbinas com apenas 1 pá são viabilizadas pela utilização de um contrapeso, no entanto, a maiores dificuldades de balanceamento e em consequência o aumento de vibrações e ruídos.

As turbinas com 2 pás são mais comuns que as de 1 pá e apresentam melhor desempenho, mas mesmo com a pá adicional, seu movimento também não é estável e apresenta relativo ruído e um leve impacto visual devido a esta girar com maior velocidade que as turbinas de 3 pás.

As turbinas de 3 pás possuem uso preferencial nos modernos sistemas de geração eólica, visto que estas apresentam movimento suave e estável, menores vibrações e ruídos, tornando o sistema no geral mais eficiente.

A Figura 16 apresenta uma sequência de imagens de turbinas eólicas de eixo vertical e diferentes números de pás.

Figura 16 – Turbinas de eixo horizontal



Turbina de Eixo Horizontal com 1 pá



Turbina de Eixo Horizontal com 2 pás



Turbina de Eixo Horizontal com 3 pás



Turbina de Eixo Horizontal de Menor Porte



Turbina de Eixo Horizontal de Múltiplas Pás

Fonte: Adaptada Google Imagens

2.5.1.2 Nacele

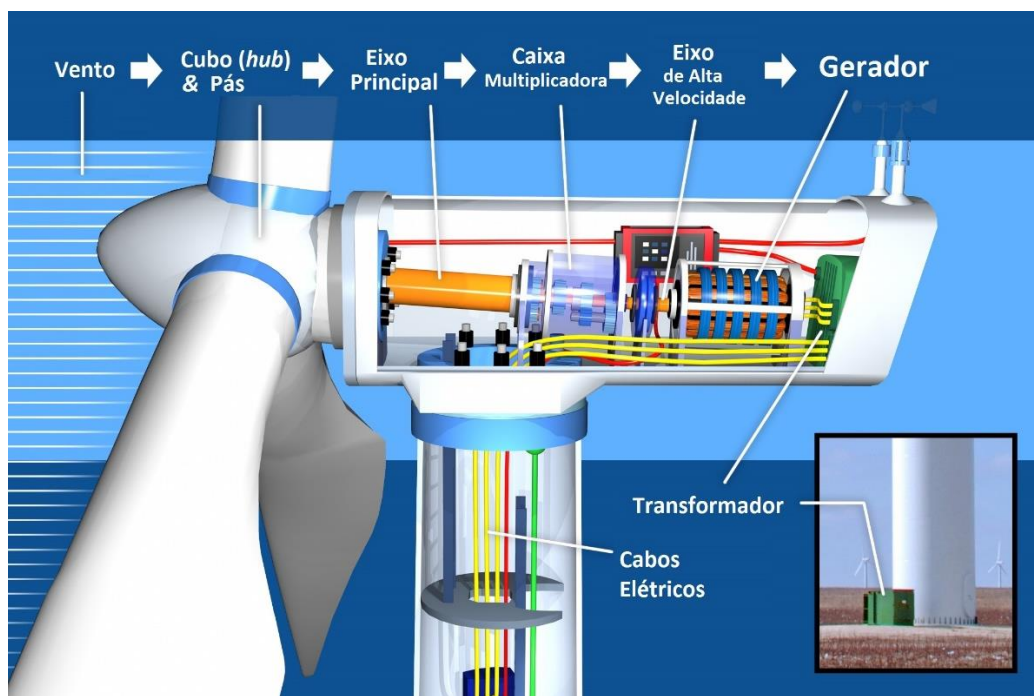
A nacele é um compartimento instalado no alto da torre e é o componente de maior peso do sistema, podendo ultrapassar 72 toneladas dependendo do fabricante.

No interior da nacele é onde ocorre a conversão da energia mecânica proveniente do eixo do rotor, que por sua vez é ligado a turbina eólica externa, em energia elétrica.

Basicamente todos os componentes que compõe o sistema estão nela, tais como o eixo principal, o multiplicador de velocidades, o gerador elétrico, o transformador (em alguns modelos), sistemas de automação para controles de velocidade e de posição, entre outros.

A Figura 17 mostra uma ilustração onde é possível ver os componentes principais do interior da nacela.

Figura 17 – Componentes da nacela de um aerogerador



Fonte: *Energy Classroom*

2.5.1.3 Gerador

Os aerogeradores possuem basicamente duas categorias de sistemas: os de velocidade constante e os de velocidade variável.

Dependendo do sistema e da configuração do conjunto de equipamentos que compõe o aerogerador, os geradores utilizados podem ser síncronos ou assíncronos (de indução com rotor em gaiola ou com rotor bobinado), sendo conectados à rede elétrica de forma direta ou através de inversores AC-DC-AC ou popularmente chamados de *link DC*.

2.5.1.3.1 Gerador síncrono

Sabe-se que, o vento é uma variável que não se pode controlar e que apresenta características inconstantes.

Dessa forma, para atender a padronização da frequência da rede no qual o gerador está injetando a energia produzida, quando da utilização de geradores síncronos, estes necessitam de soluções adequadas e complexas para garantir esta sincronia, exigindo a intervenção de conversores estáticos.

Um gerador síncrono, em condições de regime permanente, é uma máquina de corrente alternada cuja velocidade de rotação é proporcional a frequência da corrente em sua armadura. Assim o rotor e seu intrínseco campo magnético de Corrente Contínua (CC) giram em velocidade igual ao campo girante produzido na armadura, resultando em um conjugado constante.

Dessa forma, esse gerador tem maior utilização em sistemas de velocidade variável onde se utilizam máquinas com grande número de polos e acoplamento direto a turbina eólica.

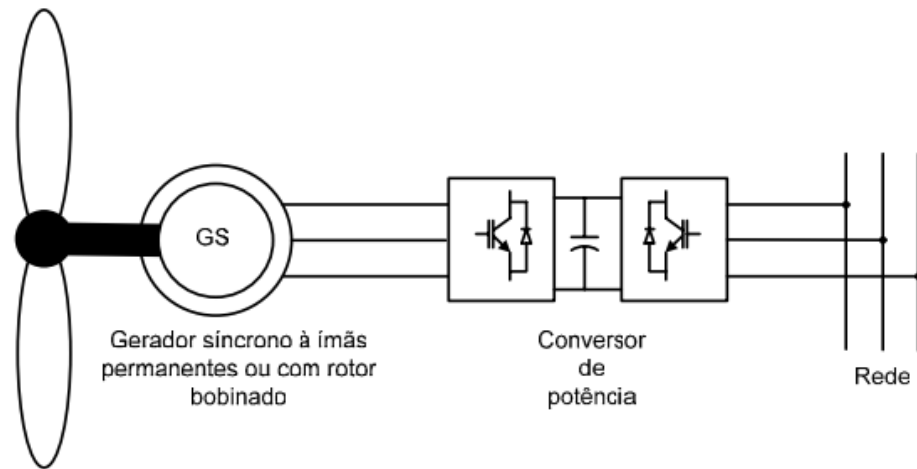
Estes equipamentos apresentam algumas vantagens em relação aos geradores assíncronos como por exemplo:

- Menor número de peças mecânicas;
- Sem elementos acopladores;
- Projeto da nacela mais simplificado;
- Menor índice de manutenção;
- Sem caixa de engrenagens;
- Poucos elementos rotativos;
- Inexistência de sistema hidráulico;
- Menor emissão de ruído;

A desvantagem, porém, é que o conversor de potência, que permite a operação do gerador em velocidades mais baixas, deve possuir a mesma potência do gerador, tornando o sistema mais caro.

A Figura 18 apresenta a ilustração de um aerogerador síncrono de velocidade variável que possui conversor de potência conectado diretamente a rede de distribuição.

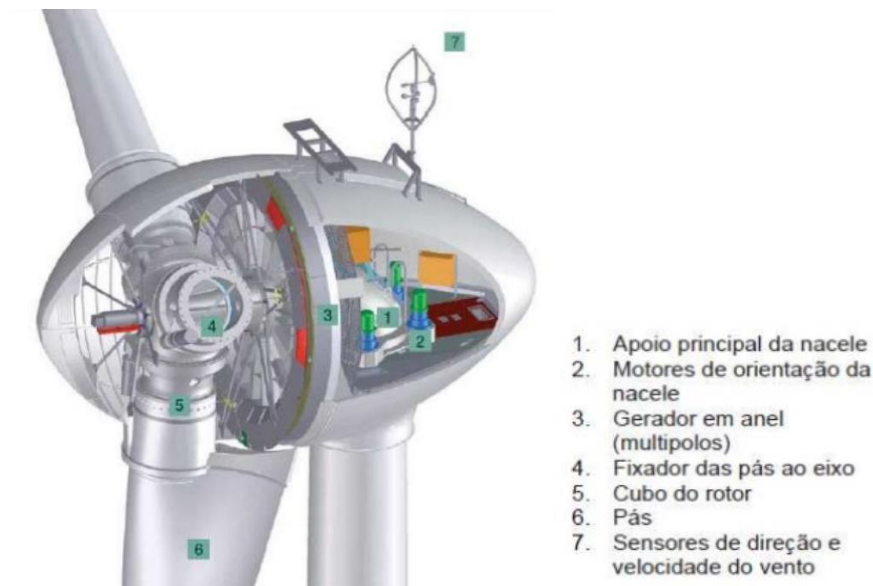
Figura 18 – Sistema eólico de velocidade variável com gerador síncrono



Fonte: (HANSEN, 2001)

A Figura 19 apresenta a vista em corte de um aerogerador de múltiplos polos, sem caixa multiplicadora.

Figura 19 – Gerador eólico sem caixa multiplicadora - multipolos



Fonte: (ENERCON, 2006)

2.5.1.3.2 Gerador assíncrono

O gerador assíncrono é capaz de funcionar com qualquer tipo de corrente e não apresenta sincronismo entre a rotação e a frequência de alimentação sendo mais utilizados em sistemas de velocidade constante.

Essas máquinas tem a vantagem de possui construção simples e barata.

Quando conectados diretamente à rede podem ser projetados com controle de escorregamento ou com gerador duplamente alimentado. No último caso, o estator é alimentado direto à rede de energia e o rotor é alimentado por um conversor AC-DC-AC.

Os aerogeradores com velocidade constante, utilizam o gerador assíncrono ligado à rede elétrica e a geração de energia ocorre sempre com velocidade de rotação superior a velocidade síncrona.

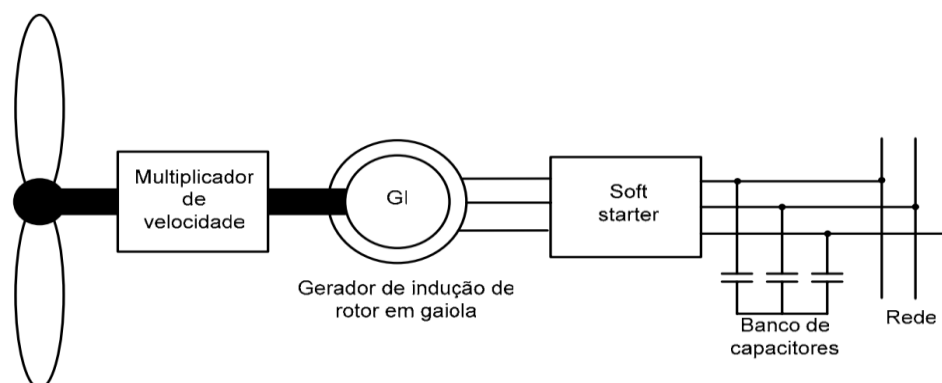
A velocidade do gerador depende do número do seu número de polos e da frequência do sistema elétrico.

A maioria dos aerogeradores com geradores assíncronos possui um multiplicador para transmitir a rotação da turbina para o gerador.

Algumas desvantagens da utilização deste tipo de gerador podem ser citadas, como por exemplo, eventuais problemas de operação em redes de baixo nível de curto circuito devido ao elevado consumo de potência reativa em situações de subtensão e também o maior número de peças mecânicas.

A Figura 20 contém a ilustração de um sistema de geração com gerador assíncrono de indução de rotor em gaiola, no qual é utilizado um *soft starter* para realizar a conexão do gerador à rede de energia. O banco de capacitores compensa a energia reativa consumida pelo gerador.

Figura 20 – Sistema eólico de velocidade fixa com gerador assíncrono



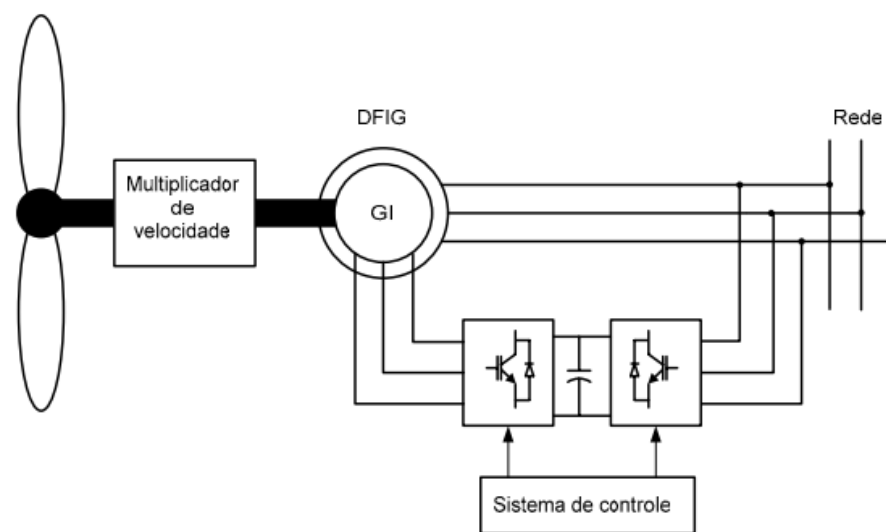
Com o intuito de reduzir os custos do conversor utilizado nos sistemas de geração com geradores síncronos, visto que este precisa ter a potência do gerador, alguns fabricantes têm implementado geradores de indução com rotor bobinado (*Doubly Fed Induction Generator*).

Nessa configuração, o rotor é mecanicamente acoplado a turbina através de um multiplicador de velocidade e seu enrolamento ligado através de um conversor *back-to-back*. Seu estator é ligado à rede em tensão e frequência fixas. O sistema gerador permite o fluxo de potência bidirecional no rotor de acordo com a velocidade do gerador e pode reduzir a potência do conversor para ordem de 30% da potência do gerador.

A Figura 21 mostra o esquema de um sistema eólico com gerador de indução com rotor bobinado.

Vê-se que o circuito estator é conectado diretamente a rede de energia e que entre o rotor e a rede um conversor (bidirecional de potência) é inserido a fim de controlar o fluxo de potência.

Figura 21 – Sistema eólico de velocidade variável com gerador de indução de rotor bobinado



Fonte: (HANSEN, 2001)

2.5.1.4 Torre

A torre de uma aerogerador é o componente de maior extensão do conjunto de geração, algumas vezes podendo ultrapassar 120 metros de altura. Tem o objetivo de elevar a turbina a altura conveniente onde o vento tem maior velocidade e desempenho do aerogerador será maior.

Esse componente serve de sustentação de todo o conjunto turbina e nacela, devido a isso precisa ter elevada resistência pois está sujeita a inúmeros esforços. Primeiramente as forças horizontais do rotor e da própria torre em relação ao vento e também pelas formas de torção, impostas pelos mecanismos de controle e o próprio peso de todo o equipamento. Em alguns modelos, na parte interna superior ficam condicionados os sistemas mecânicos de força para posicionamento do aerogerador em relação ao vento predominante.

Em geral podem ser do tipo tubular cônica ou treliçada. As torres cônicas podem ser construídas em aço ou concreto enquanto as são fabricadas em aço (em treliças ou tubulares) ou tubulares de concreto. Sua montagem requer cuidado e máquinas pesadas para elevação dos blocos onde a montagem é realizada de forma segmentada conforme pode ser visto na Figura 22.

Figura 22 – Montagem de torre eólica



Fonte: VENTOS DO SUL

2.5.1.5 Fundação

A fundação é a estrutura de aço e concreto responsável pela fixação ao solo e suspensão de todo o conjunto do aerogerador.

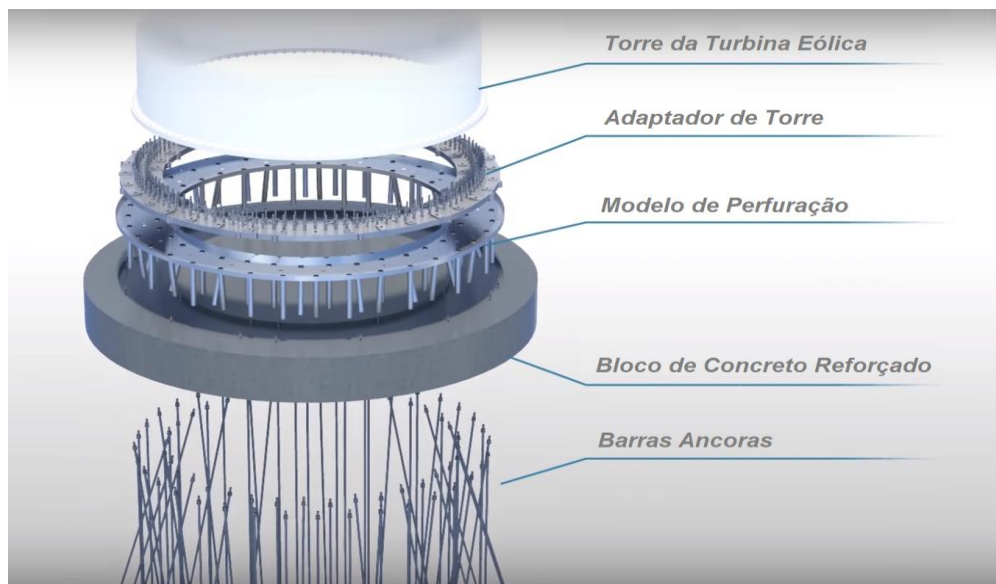
Devido as cargas elevadas que devem suportar e transmitir ao solo, esse componente deve possuir grande diâmetro, podendo chegar a até 20 metros de diâmetro.

O estudo e conhecimento do tipo do solo onde serão instalados o parque eólico é de extrema importância e fundamental para a determinação do tipo de fundação a ser utilizada.

As fundações rasas somente poderão ser escolhidas no caso de solos de alta capacidade de suporte ou se for encontrada em rocha resistente em baixa profundidade. Caso contrário, havendo camadas de solo mole, soluções com implantação de estacas profundas.

A Figura 23 apresenta o detalhamento da fundação de uma torre eólica. No Brasil a segurança de fundações deve obedecer às diretrizes da Norma ABNT NBR 6122/2010.

Figura 23 – Fundações da torre eólica



Fonte: GRUPO PEIKKO

2.5.2 Classificação de aerogeradores

A escolha dos aerogeradores requer análise detalhada dos equipamentos disponíveis no mercado e principalmente o conhecimento dos dados de medição do vento e das características do local onde este será instalado.

Essa análise técnica é realizada escolhendo mais de um modelo de aerogerador e comparando os seus resultados normalmente através de simulações computacionais.

Os modelos podem ser escolhidos com base na classificação dos aerogeradores estabelecida pela Norma IEC 61400-1 (IEC, 2005), onde os equipamentos são separados em quatro categorias de acordo com a velocidade do vento e intensidade de turbulência para os

quais foram desenvolvidos. O Quadro 1 mostra as classes de aerogeradores conforme a Norma IEC 61400-1.

Quadro 1 – Classes de Aerogeradores de Acordo com a Norma IEC 61400-1

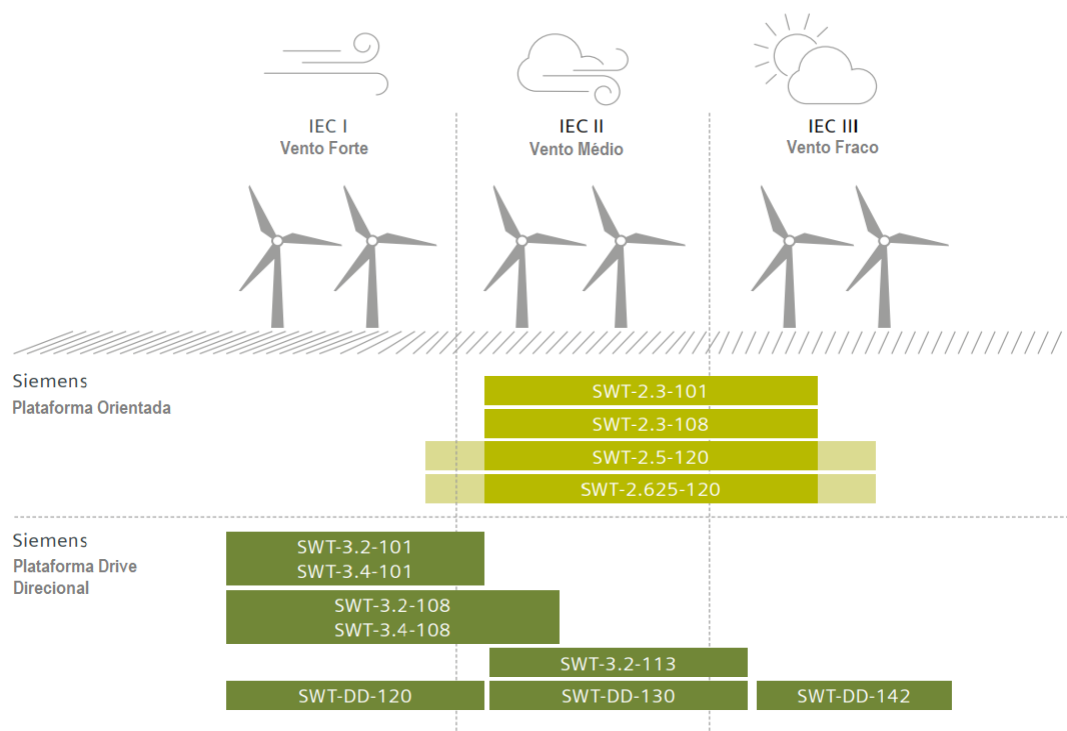
Classe do aerogerador		I	II	III	S
Velocidade média anual		Alta (10 m/s)	Média (8,5 m/s)	Baixa (7,5 m/s)	Especificado pelo fabricante
Intensidade de turbulência aos 15 m/s	A	Alta (0,16)			
	B	Média (0,14)			
	C	Baixa (0,12)			

Fonte: (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2005).

De acordo com o Quadro 1 para um terreno com média turbulência e velocidades de vento baixa é aconselhado utilizar aerogeradores Classe III-B, enquanto locais com baixa turbulência e velocidade de vento alta, são aconselhados aerogeradores Classe I-A. A informação da classe dos aerogeradores é fornecida pelo fabricante.

A título de exemplo, a Figura 24 apresenta a classificação dos aerogeradores de um determinado fabricante em relação a norma.

Figura 24 – Classificação de aerogeradores conforme a Norma IEC 61400-1



Fonte: Adaptada SIEMENS

Além de se observar a classe do aerogerador com base na referida norma, deve-se também verificar qual modelo de aerogerador possui o melhor resultado para o local, calculando a Produção Anual de Energia, a Eficiência e o Fator de Capacidade do gerador eólico ou de todo o parque eólico em simulação. Em resumo, quanto maiores essas três variáveis, melhor é o resultado técnico.

O cálculo da produção anual de energia gerada pelo aerogerador é um dos parâmetros determinísticos para escolha da máquina, uma vez que esse dado está diretamente relacionado ao *payback* do empreendimento.

Para calcular essa energia gerada é necessário estimar o tempo de permanência do gerador em cada faixa de potência possível em sua curva de potência, como será apresentado mais detalhadamente no item 2.6.

Da mesma forma, a eficiência do aerogerador, nessas condições, refere-se à potência média fornecida pela máquina durante o período de apuração relacionada a sua potência nominal.

Assim, outro importante indicador de aproveitamento da turbina eólica é o seu Fator de Capacidade, que é definido como a razão entre a energia elétrica total produzida anualmente pela energia produzida caso o aerogerador operasse na sua potência nominal durante todo o ano, ou seja, a relação da energia gerada pela capacidade de produção.

O Fator de Capacidade de um aerogerador é dado pela equação (9):

$$F_c = \frac{EAG}{8760 * P} \quad (9)$$

Onde:

F_c = fator de capacidade (admissional ou %);

EAG = energia anual gerada (kWh);

P = potência nominal do aerogerador (kW);

A Tabela 2 apresenta o fator de capacidade do aerogerador comercial Enercon E-48 de 800kW cuja energia anual gerada é válida para distribuição de Rayleigh.

Tabela 2 – Fator de capacidade de um aerogerador em função da velocidade do vento

Velocidade Média do Vento (m/s)	Energia Anual Gerada (MWh)	Fator de Capacidade (%)
4	513	7,3
5	1038	14,8
6	1681	24
7	2348	33,5
8	2973	42,4
9	3524	50,3
10	3990	56,9
11	4367	62,3

Fonte: (CUSTÓDIO, 2009)

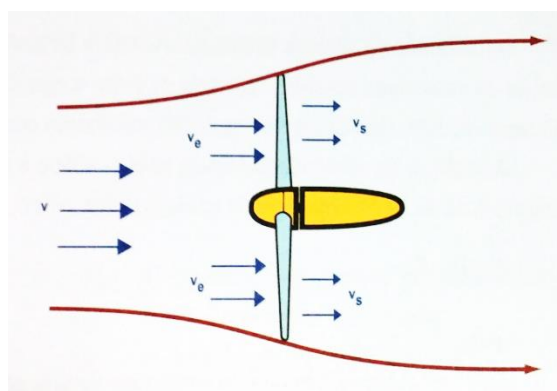
2.6 CONCEITOS DA CONVERSÃO DE ENERGIA

O entendimento da conversão de energia em um aerogerador pode ser iniciado no processo de extração do vento pela turbina eólica.

Como exemplificado no item 2.1, o vento possui um determinado potencial já equacionado, cuja análise é realizada através de um fluxo transversal do vento.

Em uma turbina eólica o processo de análise é bastante semelhante e a vazão do ar pode ser representado pelo tubo de vazão mostrado na Figura 25.

Figura 25 – Fluxo de vento através de uma turbina eólica



Fonte: (CUSTÓDIO, 2009)

Considerando que não existam dispersões de vento para fora do tubo de vazão e que a massa do ar não varia, a equação de Bernolli determina que a vazão de um fluido é constante para diferentes localizações ao longo de um tubo de vazões. Esse conceito é valido para velocidades de vento inferiores a 100m/s.

Assim obtém-se a equação (10) que representa a vazão de ar que atravessa a turbina:

$$Q = Av = Ae.Ve = As.Vs \quad (10)$$

Onde:

Q = vazão de ar que atravessa a turbina, dentro do tubo de vazões (m^3/s);

A = área da seção transversal do tubo de vazão, antes da turbina (m^2);

V = velocidade do vento livre, antes da turbina (m/s);

Ae = área da seção transversal do tubo de vazão do ar na entrada do rotor da turbina (m^2);

Ve = velocidade do vento na seção transversal do tubo de vazão do ar na entrada do rotor da turbina (m/s);

As = área da seção transversal do tubo de vazão do ar na saída do rotor da turbina (m^2);

Vs = velocidade do vento na seção transversal do tubo de vazão do ar na saída do rotor da turbina (m/s);

Ao converter a energia cinética do vento, a turbina provoca a redução da velocidade do vento na saída do rotor, resultando no aumento do diâmetro do tubo de vazões.

Dessa forma, a potência extraída pela turbina é a diferença de potência entre o fluxo de entrada e de saída do rotor, conforme a equação (11):

$$Pt = Pe - Ps \quad (11)$$

Onde:

Pt = potência extraída do vento pela turbina (W);

Pe = potência disponível no vento na entrada do rotor (W);

Ps = potência disponível no vento na saída do rotor (W);

Se ocorrer muita perda de velocidade do vento atrás do rotor da turbina, o ar fluirá pelas extremidades da área do rotor, ao invés de atravessá-lo.

Nesse contexto, a velocidade do vento na saída do rotor não poderá ser inferior a 1/3 da velocidade do vento incidente (V_e) para que se alcance a potência máxima que pode ser extraída do vento.

Dessa forma a turbina eólica absorverá energia equivalente a 2/3 da energia disponível no vento antes do rotor.

As equações (12) e (13) a seguir apresentam as condições para a máxima transferência de potência no sistema:

$$V_e = \frac{2}{3} V \quad (12)$$

$$V_s = \frac{1}{3} V \quad (13)$$

Onde:

V = velocidade do vento antes da turbina (m/s);

V_e = velocidade do vento na seção transversal do tubo de vazão do ar na entrada do rotor da turbina (m/s);

V_s = velocidade do vento na seção transversal do tubo de vazão do ar na saída do rotor da turbina (m/s);

Relembrando os conceitos vistos no item 2.1 onde foi apresentada a equação da potência disponível no vento e aplicando o fator de máxima absorção de energia pela turbina, dado pela equação (12), obtém-se a expressão (14):

$$P_e = \frac{1}{2} \dot{m} V^2 \longrightarrow P_e = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot V_e \cdot V^2 \longrightarrow P_e = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot \left(\frac{2}{3} V\right) \cdot V^2 \quad (14)$$

Da mesma forma aplicando o fator relativo a velocidade mínima do vento na saída do rotor pode-se calcular a potência de saída da turbina conforme a equação (15):

$$P_s = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot \left(\frac{2}{3}V\right) \cdot \left(\frac{1}{3}V\right)^2 \quad (15)$$

Onde:

P_s = potência do vento resultante na saída do rotor (W);

V = velocidade do vento livre (m/s);

ρ = massa específica do ar (kg/m³);

A = área da seção transversal (m²);

Considerando a equação (11), calcula-se a máxima potência do vento que pode ser extraída por uma turbina eólica e obtém-se a equação (16):

$$P_{t \text{ máx}} = \left(\frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot \left(\frac{2}{3}V\right) \cdot V^2\right) - \left(\frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot \left(\frac{2}{3}V\right) \cdot \left(\frac{1}{2}V\right)^2\right)$$

$$P_{t \text{ máx}} = \frac{16}{27} \left(\frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^3\right) = \frac{16}{27} P \quad (16)$$

Onde:

$P_{t \text{ máx}}$ = máxima potência possível de extração em uma turbina ideal (W);

ρ = massa específica do ar (kg/m³); V = velocidade do vento livre (m/s);

A = área da seção transversal (m²); P = potência disponível no vento (W);

Portanto, uma turbina eólica pode extrair 16/27 da potência disponível do vento, o que é equivalente a 59,3%. Esse percentual é conhecido por Máximo de Betz ou coeficiente de Betz.

No entanto, cabe observar que no processo real da extração da energia do vento, ou seja, considerando que as turbinas em condições verdadeiras de operação não são ideais, deve-se levar em conta as perdas aerodinâmicas do processo.

A relação entre a potência disponível no vento e a potência real extraída por uma turbina potência é indicada pelo coeficiente de potência C_p apresentado na equação (17).

$$C_p = \frac{P_t}{\frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v_3^3} \quad (17)$$

Onde:

C_p = Coeficiente de Potência (adim.); P_t = potência produzida pela turbina (W);

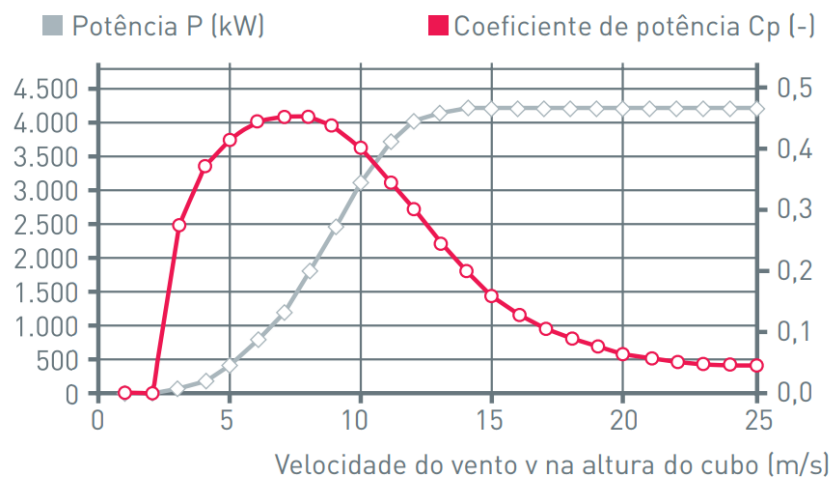
ρ = massa específica do ar (kg/m^3); v = velocidade do vento (m/s);

A = área varrida pela turbina (m^2);

O coeficiente de potência de uma turbina varia de acordo com a velocidade do vento, devido a variação da eficiência das pás da turbina para esta condição.

A Figura 26 mostra a curva do coeficiente de potência de um gerador eólico, representada na cor vermelha, onde seu ponto mais alto equivale a máxima eficiência da turbina para o vento incidente.

Figura 26 – Coeficiente de potência e curva de potência de um gerador eólico



Fonte: *WOBEN WINDPOWER*

2.7 PRODUÇÃO DE ENERGIA DE UM GERADOR

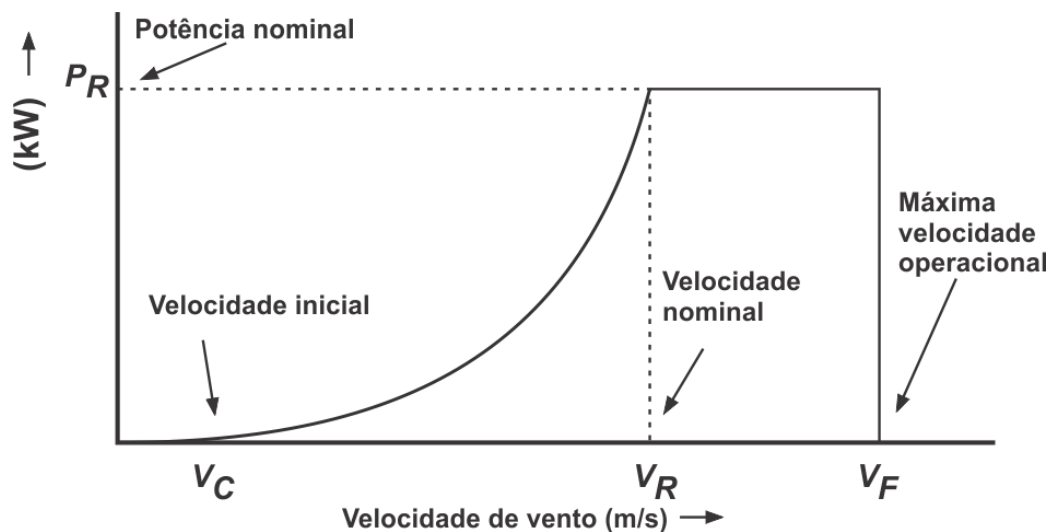
Os conceitos vistos no item 2.6 do capítulo 2, apresentam de forma simplificada as formulações envolvidas no processo de conversão da energia cinética do vento em um gerador eólico.

Para prever a produção de energia elétrica, sem considerar os detalhes técnicos dos demais componentes e outros fenômenos específicos intrínsecos, os aerogeradores possuem a chamada curva de potência. A curva de potência do aerogerador fornece informações

importantes sobre sua eficiência para diferentes velocidades de vento. Essa curva é fornecida pelos fabricantes desses equipamentos em seus catálogos de produtos.

A Figura 27 mostra uma curva de potência de um aerogerador genérico, que aponta três pontos importantes para a análise do desempenho da turbina: a velocidade inicial (V_C), a velocidade nominal (V_R) e a velocidade de corte ou máxima operacional (V_F).

Figura 27 – Curva de potência aerogerador genérico



Fonte: Autor desconhecido

A produção de energia de um gerador é o fator econômico de maior relevância em um projeto de geração eólica, pois é usada para estimar a renda do gerador ou parque relativo a venda de energia elétrica. Por isso é de extrema importância que incertezas na medição e erros na definição da curva de potência dos geradores devem ser eliminados, pois pequenas variações ou incertezas nesses parâmetros, podem levar a inexatidão na previsão da energia gerada e consequentemente, elevar o risco financeiro do empreendimento.

A produção de energia gerada é estimada com base anual, uma vez que esta depende com comportamento do vento, o qual possui variações sazonais durante o ano.

Para um determinado gerador a Energia Anual Gerada (EAG), pode ser estimada inicialmente determinando a frequência da distribuição da velocidade do vento conforme pode ser visto na Tabela 3.

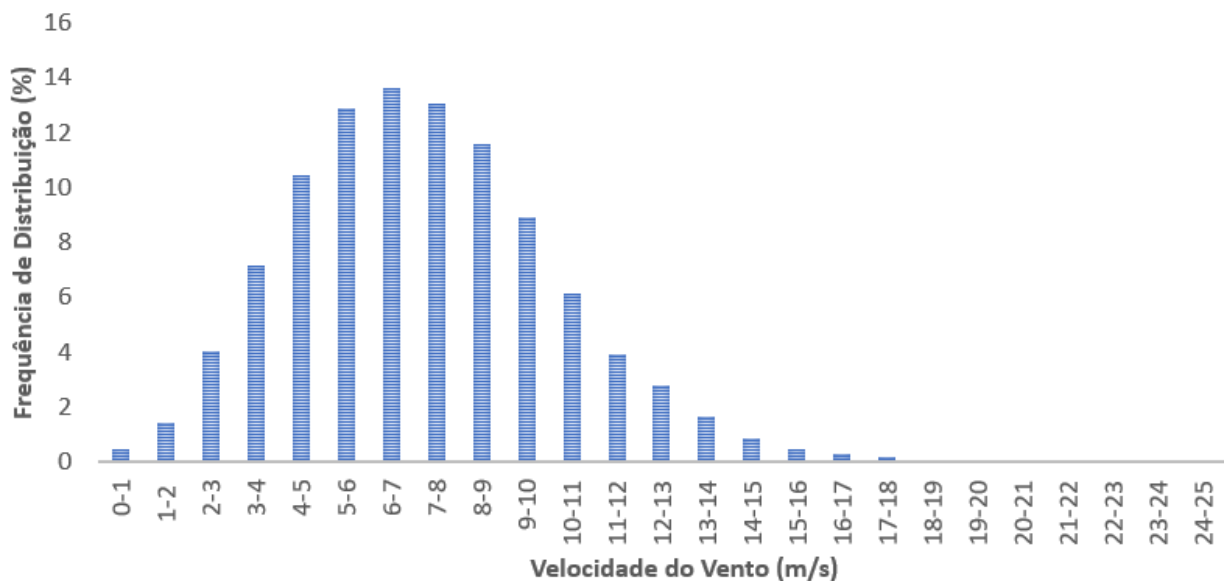
Tabela 3 – Estatística da Velocidade do Vento

Velocidade do Vento (m/s)	Frequência de Ocorrência (%)	Velocidade do Vento (m/s)	Frequência de Ocorrência (%)
1	0,473	14	1,673
2	1,435	15	0,884
3	4,016	16	0,452
4	7,148	17	0,267
5	10,465	18	0,182
6	12,854	19	0,09
7	13,616	20	0,021
8	13,039	21	0,003
9	11,596	22	0,001
10	8,906	23	0
11	6,143	24	0
12	3,941	25	0
13	2,796	26	0

Fonte: Autoria Própria

A representação gráfica da Tabela 3 mostra o histograma de velocidade do vento conforme pode ser visto na Figura 28.

Figura 28 – Histograma de velocidade do vento da Tabela 3



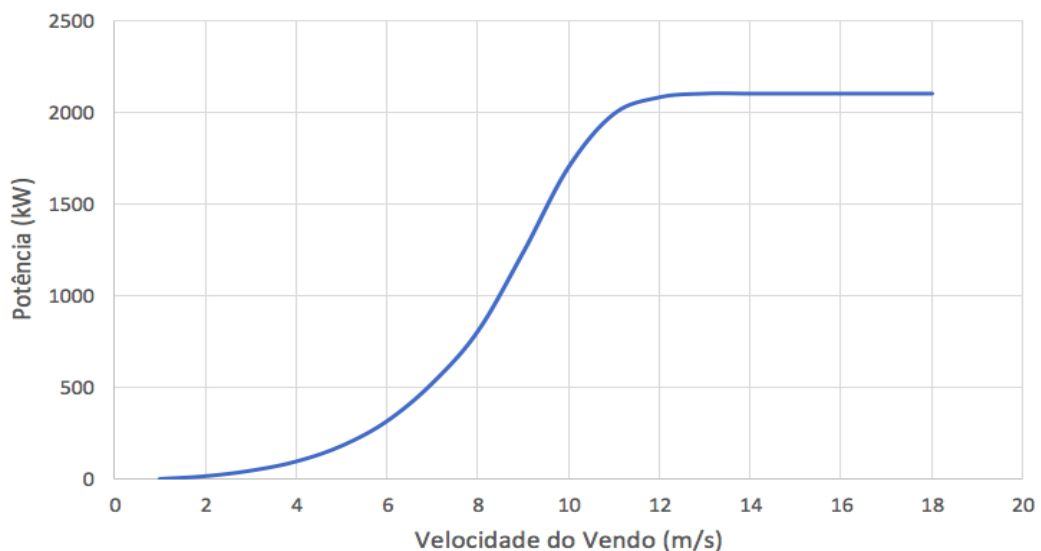
Fonte: Autoria Própria

A seguir, se faz necessário dispor dos dados de Potência x Velocidade do aerogerador, com os quais pode-se traçar sua curva de potência, conforme apresentado na Figura 29.

A obtenção da produção de energia do aerogerador é feita pela interseção da estatística da velocidade do vento com a curva de potência do gerador.

Na Tabela 3, pode-se notar que a velocidade do vento atinge 6,0m/s com uma frequência de 12,85%. Por sua vez, nessa velocidade, o aerogerador fornece uma potência de 315kW. Dessa forma o gerador produzirá 315kW durante 12,85% do tempo. Fazendo esta mesma análise para todas as velocidades e respectivas potências do gerador, obtém-se a potência total no período.

Figura 29 – Curva de potência aerogerador 2MW



Fonte: Wobben *WindPower*

Considerando que o ano possui 8760 horas, a Energia Anual Gerada por um aerogerador será dada pela equação (18):

$$EAG = \sum[f(v).P(v)] * 8760 \quad [kWh] \quad (18)$$

Onde:

v = velocidade do vento (m/s)

$f(v)$ = frequência de ocorrência do vento (%)

$P(v)$ = potência gerada pelo aerogerador na relativa velocidade do vento (kW)

Na Tabela 4 são realizados os cálculos para determinação do resultado entre a multiplicação da frequência de ocorrência do vento e a potência gerada pelo aerogerador. Por fim obtém-se o seu somatório.

Tabela 4 – Determinação da Energia Anual Gerada

Velocidade do Vento (m/s)	Frequência de Ocorrência (%)	Potência do Aerogerador (kW)	$f(v).P(v)$
1	0,473	0	0
2	1,435	15	0,21525
3	4,016	45	1,8072
4	7,148	95	6,7906
5	10,465	180	18,837
6	12,854	315	40,4901
7	13,616	522	71,07552
8	13,039	805	104,96395
9	11,596	1235	143,2106
10	8,906	1700	151,402
11	6,143	1990	122,2457
12	3,941	2080	81,9728
13	2,796	2100	58,716
14	1,673	2100	35,133
15	0,884	2100	18,564
16	0,452	2100	9,492
17	0,267	2100	5,607
18	0,182	2100	3,822
19	0,09	2100	1,89
20	0,021	2100	0,441
21	0,003	2100	0,063
22	0,001	2100	0,021
23	0	2100	0
24	0	2100	0
25	0	2100	0
26	0	2100	0
$\Sigma[f(v).P(v)] =$			801,72672

Atribuindo o respectivo valor do somatório na equação (18), pode-se determinar a energia anual gerada para o respectivo gerador nas características de vento conhecidas.

$$EAG = \sum [f(v) P(v)] * 8760 = 801,72 * 8760 = 7.023,12MWh$$

A estimativa de Energia Anual Gerada para um parque eólico corresponde ao somatório das produções individuais de todos os geradores que compõe a usina.

A determinação da energia gerada também pode ser feita com base nas funções de Weibull e Rayleigh, conforme apresentado no item 2.3.1 e 2.3.2.

No entanto a função de Weibull é a que apresenta melhores resultados em relação a função de Rayleigh devido à aproximação desta com o comportamento real do vento.

3 METODOLOGIA

Esse trabalho inicia-se com a obtenção dos dados de vento a partir de medição em torre anemométrica.

De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), são necessários três anos de medição e para validação e certificação dos dados diversos critérios devem ser seguidos.

Posteriormente inicia-se o tratamento de dados onde uma análise estatística é feita, anormalidades são expurgadas e eventuais correções são realizadas.

A torre utilizada possui 4(quatro) anemômetros tipo concha, instalados respectivamente a 60, 80, e 100 metros de altura. Nos 100 metros, 2(dois) anemômetros são instalados sendo um deles na função de backup.

Também existem 2(dois) medidores de direção do vento (*Wind Vanes*), instaladas respectivamente a 78 e 98 metros, 1(um) termo hidrômetro a 95 metros de altura, medindo a temperatura e umidade do ar e por fim 1(um) barômetro para medição da pressão atmosférica.

A obtenção do relatório de dados mensais é realizada através do sistema de gerenciamento de dados da Ammonit, empresa fabricante dos equipamentos de medição utilizados no projeto.

Cabe destacar que para análise de estimativa de geração foram apenas utilizados dois anemômetros, sendo um instalado a 100m (altura prevista para instalação do rotor do aerogerador) e um a 80m, para definição da camada limite atmosférica.

O passo seguinte para realização deste trabalho foi a identificação dos principais fabricantes de turbinas eólicas no Brasil e também no exterior.

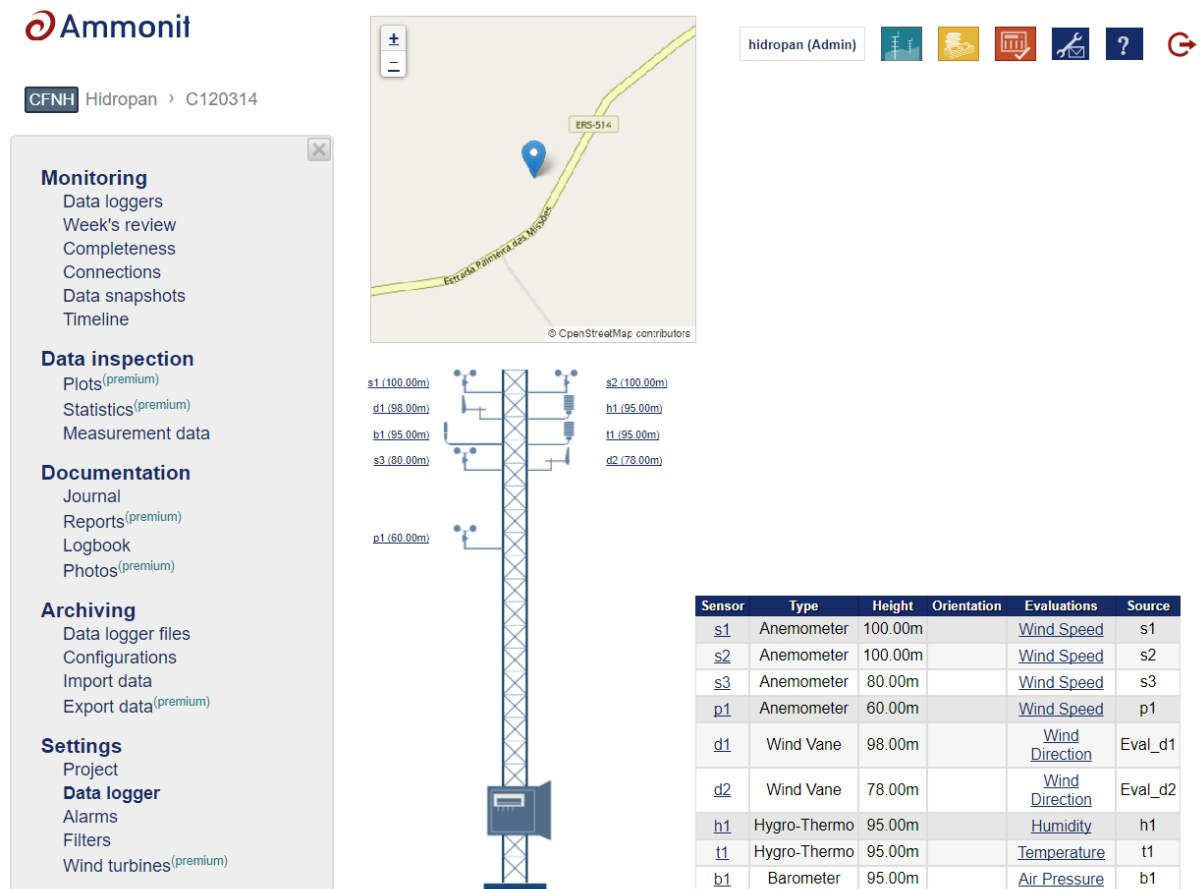
A maioria dos fabricantes de turbinas eólicas disponibiliza em seus sites os catálogos contendo os principais dados técnicos de seus equipamentos.

Assim, foram coletados os dados de diversos geradores eólicos e construídas suas curvas de potência.

A correlação entre os dados de medição de vento e as características do gerador eólico é necessária para conhecer a estimativa de geração de energia elétrica. Para realizar esta correlação foi utilizado o *software* Alwin.

A Figura 30 mostra a tela inicial do sistema *online* de gestão de medições da Ammonit.

Figura 30 – Tela principal do sistema de medição de vento



Fonte: AMMONIT



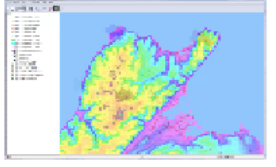

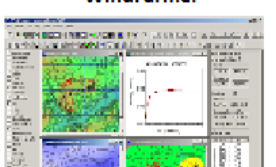
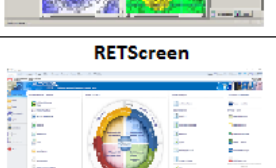

3.1 SOFTWARES DE SIMULAÇÃO EÓLICA

Toda análise preliminar para escolha de aerogeradores e posterior implantação de um parque eólico, requer simulações computacionais para conhecer o desempenho técnico e econômico do sistema.

Atualmente existem diversos *softwares* disponíveis para esta finalidade. Esses programas podem iniciar uma análise simples abrangendo apenas aerogeradores individuais, como também elaborar estudos completos envolvendo diversos parâmetros de medição de vento, topografia de terrenos, posicionamento e distribuição de geradores, entre outros.

O Quadro 2 apresenta um quadro resumo de alguns dos principais softwares utilizados para simulações eólicas.

Quadro 2 – Resumo dos principais *softwares* para simulação de sistemas eólicos

SOFTWARE	CARACTERÍSTICAS	DISPONIBILIDADE
 <p>WindPRO</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Possui diversos módulos que podem ser adquiridos individualmente. - Projeto orientado a objetos. - Possui biblioteca de aerogeradores e diversos modelos. - Permite a inserção de mapas. - Realiza simulações para aerogeradores individuais e de grupo de aerogeradores para parques eólicos. 	<p><i>Software</i> Pago. Possui versão de demonstração porem não é possível realizar cálculos ou salvar os projetos.</p>
 <p>WasP</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Realiza cálculos de escoamento de vento em áreas pré-definidas. - Permite inserção de mapas e objetos. - Indicado para locais de condição atmosférica normais e terrenos suaves. - Pode acarretar em erros quando aplicado sob condições não recomendadas. - Realiza simulações para aerogeradores individuais e de grupo de aerogeradores para parques eólicos. 	<p><i>Software</i> Pago. Valor da Licença (1ano): € 3.900,00. Licença Temporária: € 1.950,00</p>
 <p>Open Wind</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Modelado por Sistemas de Informações Geográficas (GIS), trabalhando com várias <i>layers</i>. - Possui ampla biblioteca de equipamentos. - Possibilita análise financeira considerando diversos fatores. - Permite otimização de <i>layout</i> do parque para melhor eficiência de parque. 	<p><i>Software</i> Gratuito.</p>
 <p>Greenius</p>	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Software</i> para simulação de diversas fontes de energia renovável. - Realiza extensa análise financeira e econômica para o fluxo detalhado de caixa do projeto. - <i>Software</i> modular que inclui um extenso banco de dados de turbinas eólicas permitindo atualizações frequentes dos equipamentos. - Oferece combinação de cálculos de desempenho técnico rápido, cálculos econômicos e interfaces de usuário para manipulação de parâmetros e análise dos resultados. 	<p><i>Software</i> Gratuito.</p>
 <p>WindFarmer</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Composto por vários módulos tais como: financeiro para cálculo dos aspectos econômico-financeiros, elétrico para determinação de perdas elétricas e planejamento de conexão com a rede, modulo de turbulência, entre outros. - Inclui uma versão gratuita do WasP. - Determina automaticamente o layout ótimo do parque eólico. - Permite representação tridimensional da integração de parques eólicos na paisagem, fotomontagem e uma otimização automática do layout em relação a deficiências visuais. 	<p><i>Software</i> Pago. Possui versão educacional.</p>
 <p>RETScreen</p>	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Software</i> para simulação de diversas fontes de energia renovável. - Permite aos seus usuários verificar o desempenho contínuo das suas instalações em matéria de energia. - Inclui base de dados de condições climáticas obtidas em mais de 6000 estações terrestres e satélites da NASA. 	<p><i>Software</i> Pago. Possui versão de demonstração porem não é possível realizar cálculos ou salvar os projetos.</p>
 <p>Alwin</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Realiza análise estatística de dados de velocidade e direção do vento a partir da elaboração de diagramas de frequência e elementos gráficos. Permite a realização de prognósticos do rendimento de energia e fator de capacidade através de curvas de potência de turbinas eólicas. - Realiza cálculos individuais para geradores adicionados a sua biblioteca. 	<p><i>Software</i> Gratuito.</p>

Fonte: Autoria Própria

Visto que o estudo previsto neste trabalho contempla a avaliação do desempenho energético dos diferentes aerogeradores de forma individual e não de um estudo abrangente de um parque eólico, optou-se pela utilização do *software* ALWIN para realização das simulações. A escolha se deu devido a sua simplicidade e objetividade de operação, fator que permitiu o alcance direto dos objetivos propostos.

3.1.1 *Software Alwin*

O *software* ALWIN é um programa desenvolvido em 1994 pela cooperação entre a empresa Ammonit e empresa DEWI e foi destinado a analisar e determinar as estatísticas de vento.

Além da análise estatística de dados de velocidade e direção do vento, elaboração de diagramas de frequência e elementos gráficos, o Alwin permite a realização de prognósticos do rendimento de energia e fator de capacidade através da curva de potência de turbinas eólicas adicionadas a sua biblioteca.

O desempenho médio de energia, a energia e o fator de capacidade, são calculados pelo *software* de acordo com os padrões do *International Energy Agency* (IEA) e *International Energy Comition* (IEC).

O programa Alwin oferece os seguintes recursos:

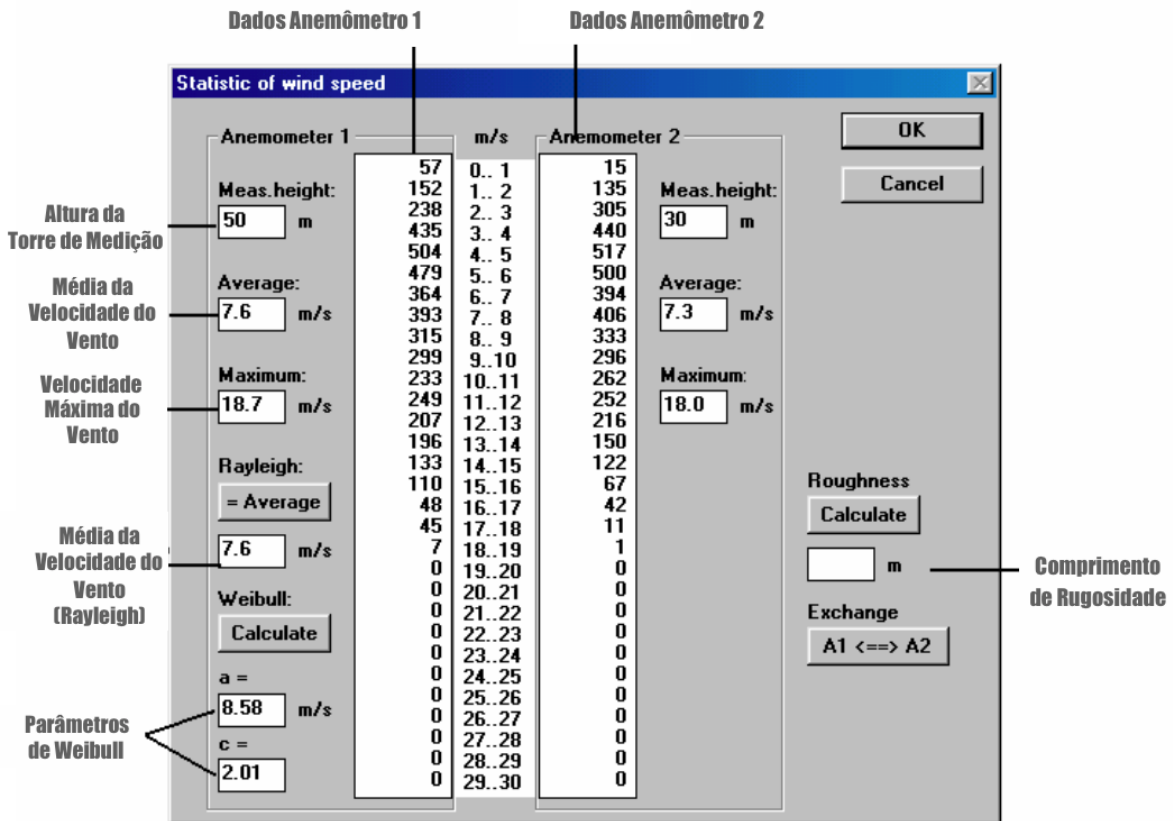
- Estimação do comprimento da rugosidade;
- Cálculo dos parâmetros de Weibull;
- Potencial eólico em qualquer local fictício através das velocidades médias e distribuições de Rayleigh ou Weibull;
- Histograma da velocidade dos ventos e Rosa dos Ventos;
- Curso diurno da velocidade do vento e estatística de calmarias;

O *software* possui diversas funcionalidades que permitem que possam ser usados dados de um ou dois anemômetros ou ainda trabalhar com valores de velocidade média através da definição da curva aproximada de Rayleigh.

No programa, dados de medição de vento podem ser importados diretamente de um data logger ou podem ser inseridos manualmente.

A Figura 31 apresenta a janela principal do *software* Alwin na qual são inseridas as características de vento e suas condições de medição, bem como do local onde os dados foram obtidos.

Figura 31 – Janela principal de inserção de dados de vento.



Fonte: *Software* Alwin

A partir dos dados introduzidos, o *software* emprega funções estatísticas em coerência com os dados originais para intervalos de 1 m/s, indexando a frequência dos dados medidos pelo método da média, a frequência por Rayleigh e por Weibull e mostra-os via tabela de dados e também graficamente conforme pode ser visto na Tabela 5 e na Figura 32.

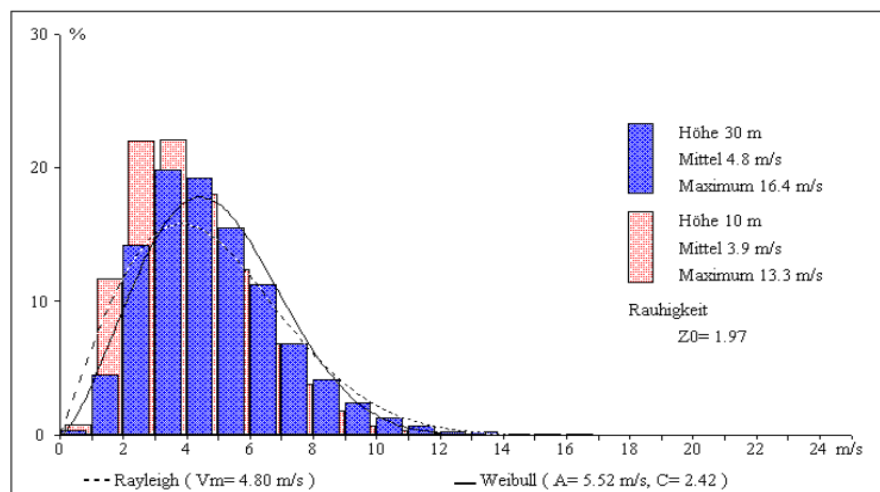
Uma das funções interessantes do *software* Alwin é que ele permite a correção da velocidade do vento para a altura desejada da instalação o aerogerador. Se por exemplo a medição do vento é realizada à 80 metros de altura e deseja-se instalar o aerogerador a 100 metros, o *software* realiza a adequação das características de vento empregando a Lei Potencial. Para isso precisa conhecer dados da rugosidade e camada limite, esta última também é definida por um algoritmo do programa.

Tabela 5 - Estatística da velocidade do vento de metro a metro, frequências de dados medidos, de Rayleigh e de Weibull.

Vel. (m/s)	Freq. (medida)	Freq. (Rayleigh)	Freq. (Weibull)
0-1	1.28	1.35	1.32
1-2	3.41	3.94	3.89
2-3	5.33	6.22	6.18
3-4	9.74	8.03	8.01
4-5	11.29	9.27	9.26
5-6	10.73	9.89	9.91
6-7	8.15	9.93	9.96
7-8	8.80	9.48	9.52
8-9	7.06	8.64	8.69
9-10	6.70	7.57	7.61
10-11	5.22	6.38	6.41
11-12	5.58	5.18	5.20
12-13	4.64	4.07	4.07
13-14	4.39	3.09	3.09
14-15	2.98	2.27	2.26
15-16	2.46	1.61	1.60
16-17	1.08	1.11	1.10
17-18	1.01	0.74	0.73
18-19	0.16	0.48	0.47
19-20	0.00	0.30	0.30

Fonte: *Software Alwin*

Figura 32 – Representação gráfica de velocidade do vento, frequências, distribuições de Rayleigh e de Weibull.



Fonte: (Revista DEWI, 1995)

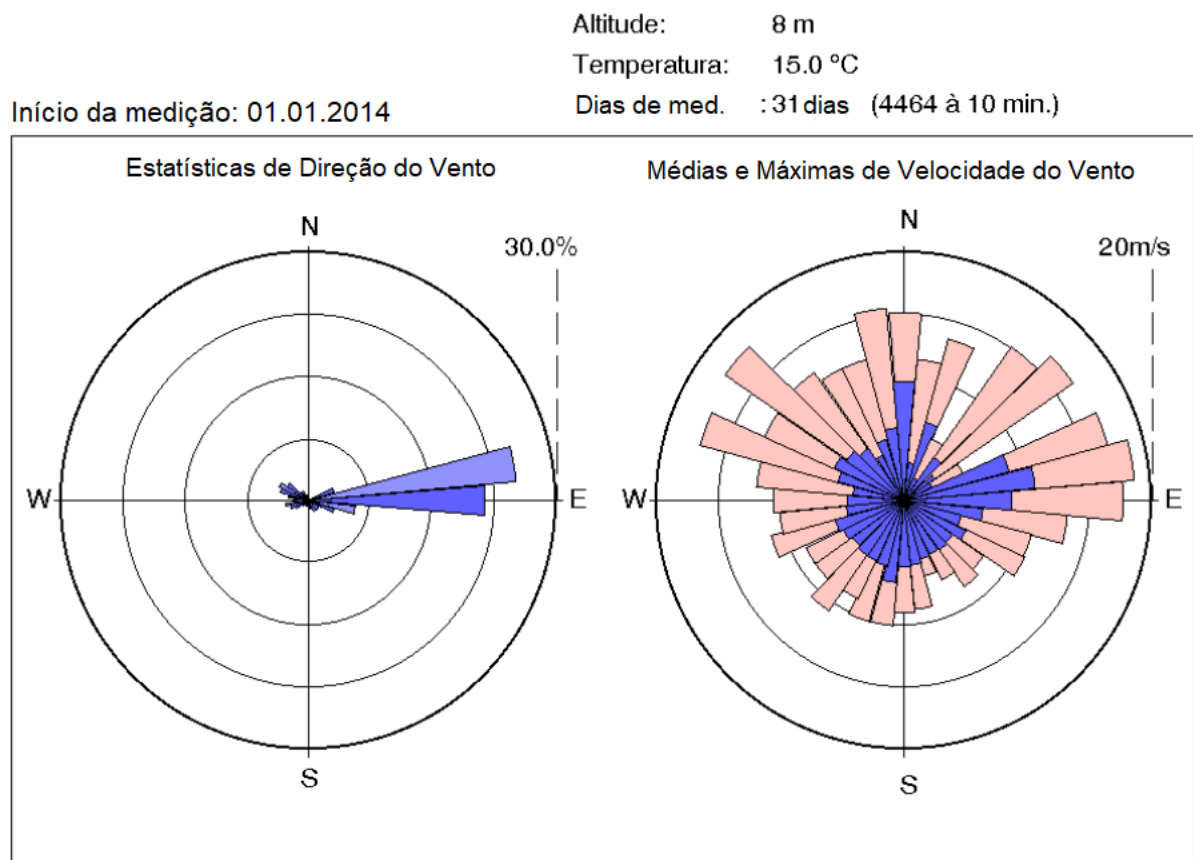
No que se refere a determinação da direção predominante do vento, para velocidades acima de 0,5 m/s, o programa Alwin faz uma distribuição estatística de cada valor obtido através da *windvane* (ou biruta) de vento e aloca-o ao respectivo setor, possibilitando também a obtenção da direção, da velocidade média do vento e a frequência da ocorrência, conforme pode ser visto na Tabela 6 e graficamente na Figura 33.

Tabela 6 – Dados de estatística da direção dos ventos para rosa dos ventos

Setor (°)	Freq. (%)	Média (m/s)	Máxima (m/s)	Setor (°)	Freq. (%)	Média (m/s)	Máxima (m/s)
355-5	0.3	9.6	15.1	175-185	0.9	5.4	9.1
5-15	0.2	3.1	11.5	185-195	0.8	6.7	10.1
15-25	0.1	6.6	13.5	195-205	0.7	5.5	10.2
25-35	0.3	2.0	5.5	205-215	0.3	5.4	8.8
35-45	0.3	4.3	15.1	215-225	0.8	5.4	10.8
45-55	0.5	3.1	16.6	225-235	1.0	5.2	8.9
55-65	0.4	2.6	5.3	235-245	1.9	5.5	8.8
65-75	3.4	8.9	17.1	245-255	2.3	5.8	11.1
75-85	25.3	10.7	18.7	255-265	2.8	4.7	10.1
85-95	21.4	8.7	17.8	265-275	1.6	4.6	10.6
95-105	5.8	6.5	13.3	275-285	2.5	4.2	12.0
105-115	3.4	4.9	10.7	285-295	3.7	5.6	17.1
115-125	1.8	5.6	10.8	295-305	4.0	6.2	12.4
125-135	1.5	4.9	7.9	305-315	3.3	5.7	17.6
135-145	1.6	5.0	8.5	315-325	1.4	5.2	12.6
145-155	1.2	4.9	7.1	325-335	1.1	4.1	11.8
155-165	1.0	5.0	6.3	335-345	0.6	5.2	11.8
165-175	1.1	5.3	8.9	345-355	0.8	5.9	15.6

Fonte: *Software Alwin*

Figura 33 - Estatística da direção dos ventos - rosa dos ventos



Fonte: *Software Alwin*

O resultado da simulação apresentado na Figura 34, mostra três variáveis principais necessárias a análise de estimativa de geração, sendo elas a Potência Média, a Energia Gerada e o Fator de Capacidade. Os valores são calculados considerando os valores medidos, a distribuição de Rayleigh e de Weibull.

Figura 34 – Resultados de potência média, geração e fator de capacidade

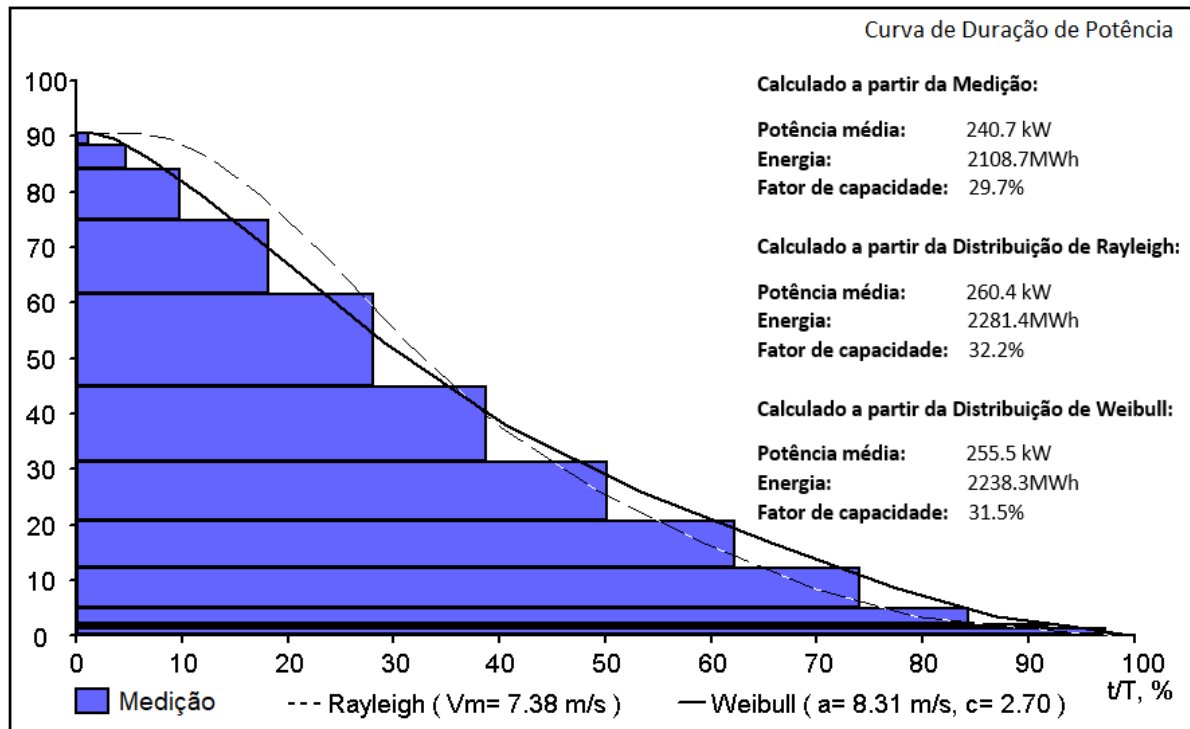
Parque Eólico

Per. 01-01-2014
Altitude: 560m

Altura da Med.: 100m
Temperatura: 20.7°C

Enercon 800 kw E48

Altura do Hub: 100m
Fator de Conversão: 1.0



Fonte: Software Alwin

A Potência Média (*Average Power*): representa a potência média do aerogerador no período de operação, de acordo com os dados medidos (média das velocidades de vento x curva de potência).

A Energia Gerada (*Energy (meas.)*): representa a geração de energia elétrica da turbina de acordo com os dados de velocidade do vento. Esse dado correlaciona distribuição de frequências de velocidade do vento, curva de potência do aerogerador e tempo de operação. Quanto mais longo o período de medição, mais próxima da realidade serão os resultados dados pelo software.

Fator de capacidade (*Capacity Factor*): significa o percentual de aproveitamento do aerogerador (potência média / potência pico). Considerando-se o caso acima da Figura 34, em que utilizando dados de um aerogerador de 800kW, o cálculo a partir das medições nos dá o indicador de 29,7%, que representa o percentual da potência do aerogerador que está efetivamente sendo utilizado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O primeiro passo a se iniciar no estudo proposto, como já mencionado anteriormente, parte da obtenção das curvas de potência de aerogeradores. Para isso foram escolhidos alguns fabricantes mais conhecidos no mercado e a partir dos catálogos de produtos, obtidos os dados de potência de cada modelo.

A Tabela 7 apresentada as marcas e modelos de turbinas eólicas escolhidas para determinação da estimativa de geração:

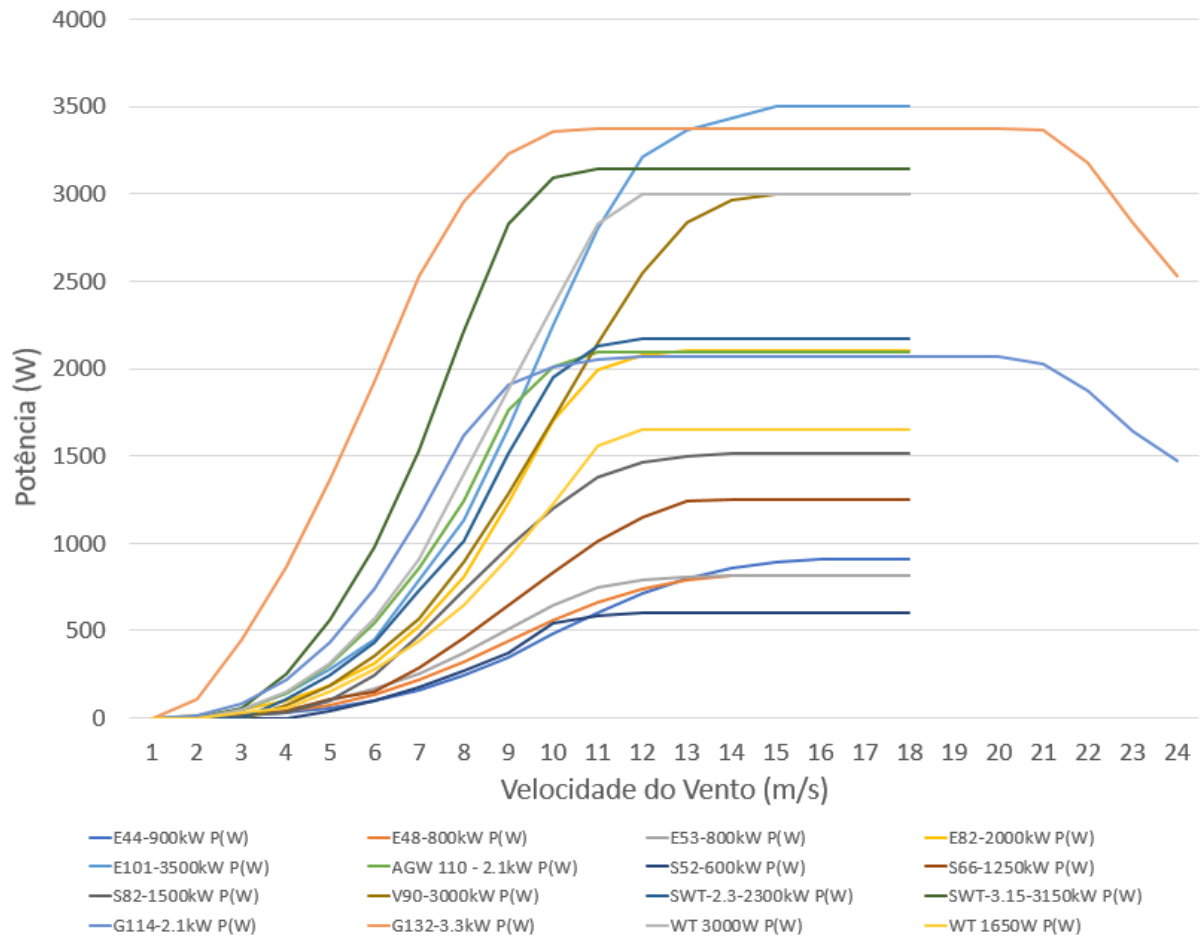
Tabela 7 – Fabricantes e modelos de aerogeradores analisados

WOB BEN	<ul style="list-style-type: none">▪ E48 – 800kW▪ E53 – 800KW▪ E44 – 900kW▪ E82 – 2000kW▪ E101 – 3500kW
SUZLON	<ul style="list-style-type: none">▪ S52 – 600kW▪ S66 – 1250kW▪ S82 – 1500Kw
VESTAS	<ul style="list-style-type: none">▪ V90 – 3000kW
SIEMENS	<ul style="list-style-type: none">▪ STW2.3 – 2300kW▪ STW3.15 – 3150kW
GAMESA	<ul style="list-style-type: none">▪ G114 – 2100kW▪ G132 – 3300kW
WEG	<ul style="list-style-type: none">▪ AGW110 – 2100kW
AMSC	<ul style="list-style-type: none">▪ WT 1650kW▪ WT 3000kW

Fonte: Autoria Própria

A Figura 35, apresenta as curvas de potência de todos modelos, adquiridos com base na curva de potência do catálogo de produtos dos fabricantes.

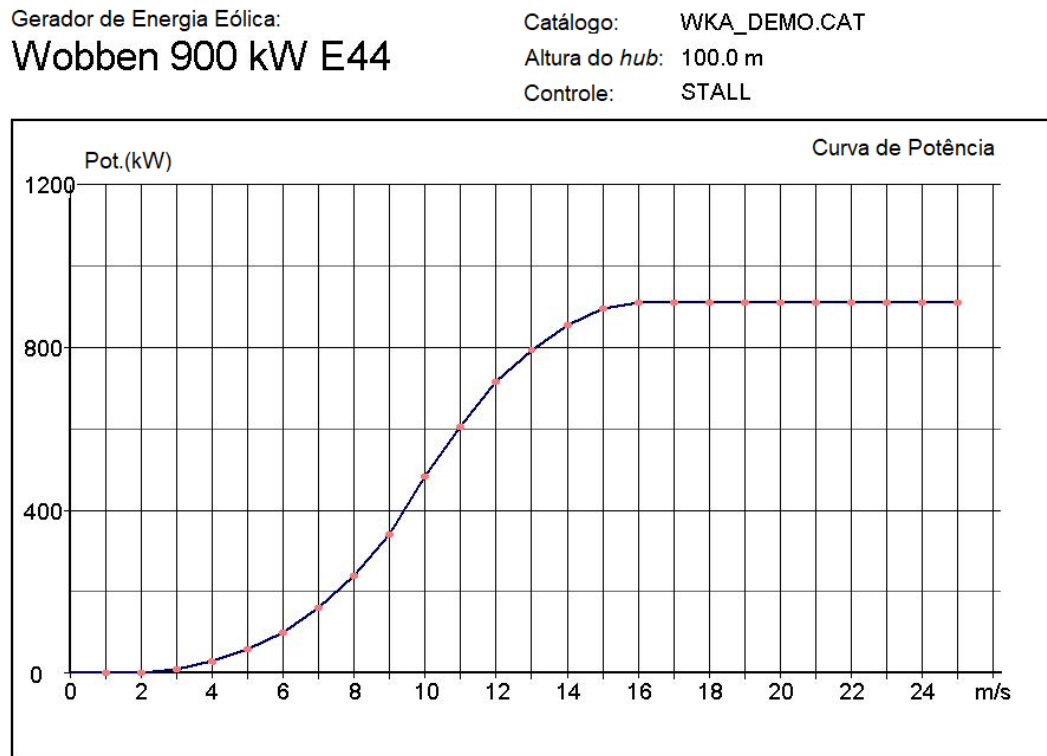
Figura 35 – Curva de potência de aerogeradores



Fonte: Autoria Própria

Para isso, todas as curvas foram inseridas na biblioteca de turbinas do *software* Alwin e após plotados os gráficos correspondentes como o exemplo mostrado na Figura 36.

Figura 36 – Reconstrução da curva de potência de aerogeradores no *software* Alwin



Fonte: *Software* Alwin

Concluídas as curvas dos aerogeradores foram adicionados os dados de distribuição e frequência das velocidades do vento no local, conforme apresentados na Figura 37.

Conforme pode ser observado, os valores correspondem a medições de dois anemômetros, estando o primeiro instalado a 100 metros e segundo a 80 metros de altura.

Adicionalmente foram informados valores médio e máximos de velocidade.

Os demais parâmetros, como rugosidade do terreno, velocidade média para distribuição de Rayleigh e os fatores de escala e de forma para distribuição de Weibull, foram calculados automaticamente pelo *software*.

A Figura 38 apresenta graficamente a distribuição de frequência das medições de velocidade do vento inseridas no *software*. Na figura é possível observar na cor roxa as barras de frequência de ocorrência dos valores de velocidade do vento e também na linha tracejada e continua, respectivamente as distribuições de Rayleigh e Weibull.

Figura 37 – Dados de medição de vento no ano de 2014

Anemometer 1		m/s	Anemometer 2	
Meas. height:	100 m	0.729	0.1	0.656
		2616	1.. 2	2680
		5221	2.. 3	5352
		7214	3.. 4	7365
		9833	4.. 5	10556
Average:	7.38 m/s	11273	5.. 6	12119
		11585	6.. 7	12881
		10890	7.. 8	11920
		10307	8.. 9	11819
		9462	9..10	9559
Maximum:	24.10 m/s	7930	10..11	6665
		4966	11..12	3731
		3400	12..13	1060
		1083	13..14	1.326
Rayleigh:	= Average	1.214	14..15	0.723
		0.662	15..16	0.424
		0.356	16..17	0.175
		0.236	17..18	0.078
		0.126	18..19	0.025
		0.034	19..20	0.006
		0.012	20..21	0.004
Weibull:	Calculate	0.004	21..22	0.002
		0.002	22..23	0.002
		0.002	23..24	0.002
a =	8.31 m/s	0	24..25	0
		0	25..26	0
		0	26..27	0
		0	27..28	0
		0	28..29	0
		0	29..30	0

Meas. height: 80 m

Average: 7.036 m/s

Maximum: 23.63 m/s

Roughness: 0.834 m

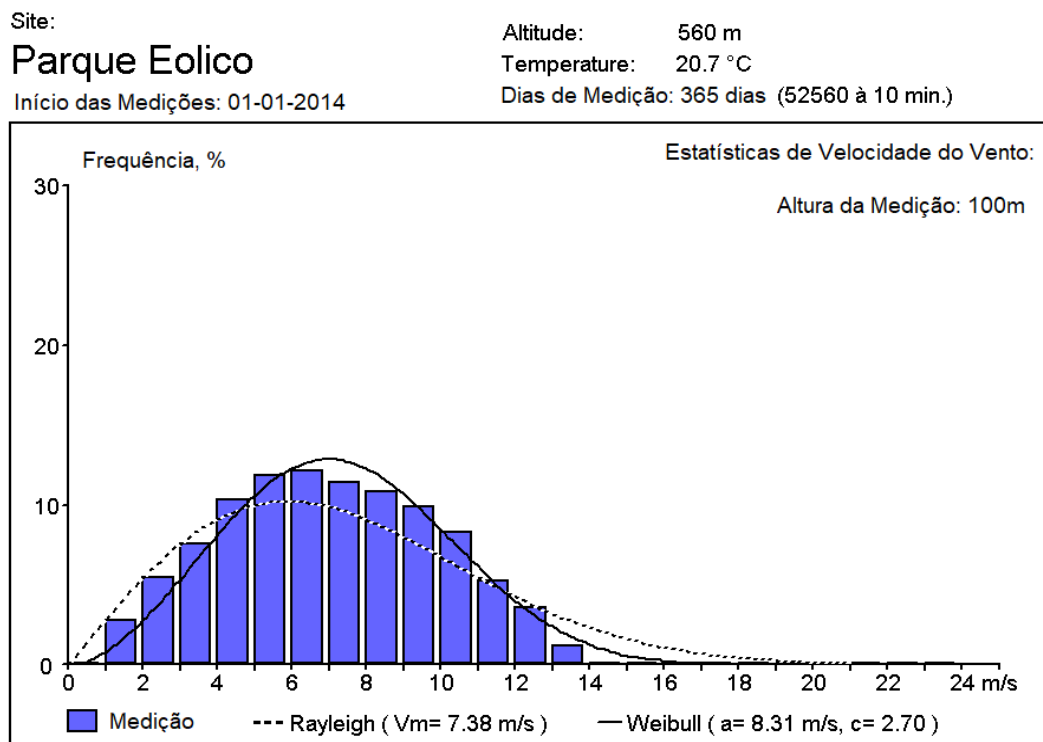
Exchange: A1 <=> A2

OK

Cancel

Fonte: Software Alwin

Figura 38 – Representação gráfica dos dados de vento



Fonte: Software Alwin

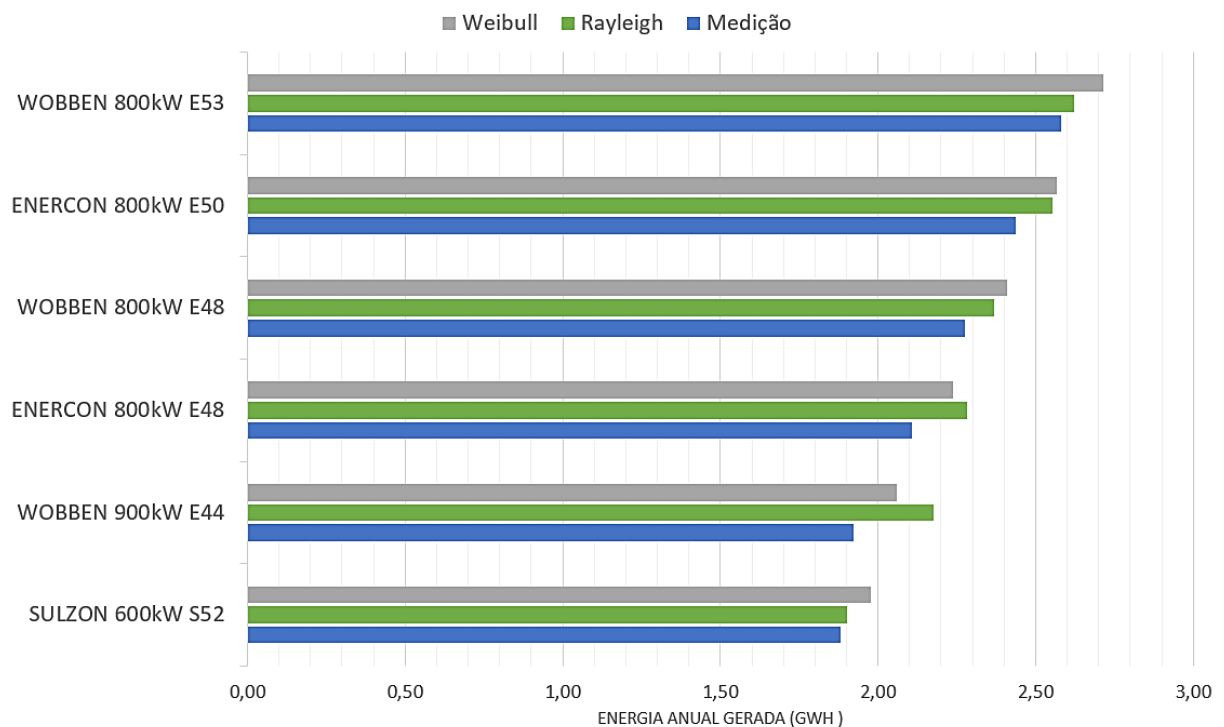
A fim de melhor observar os resultados obtidos nas simulações, os aerogeradores foram divididos em 3 grupos de potência:

- Potência nominal > 1MW;
- Potência nominal > 1MW e < 3MW;
- Potência nominal > 3MW;

Nas figuras a seguir serão apresentados os resultados das simulações realizadas no *software* Alwin. Os valores obtidos foram calculados considerando os valores reais de medição anemométrica, a distribuição de Rayleigh e distribuição de Weibull. O período de medição considerado foi o ano completo de 2014.

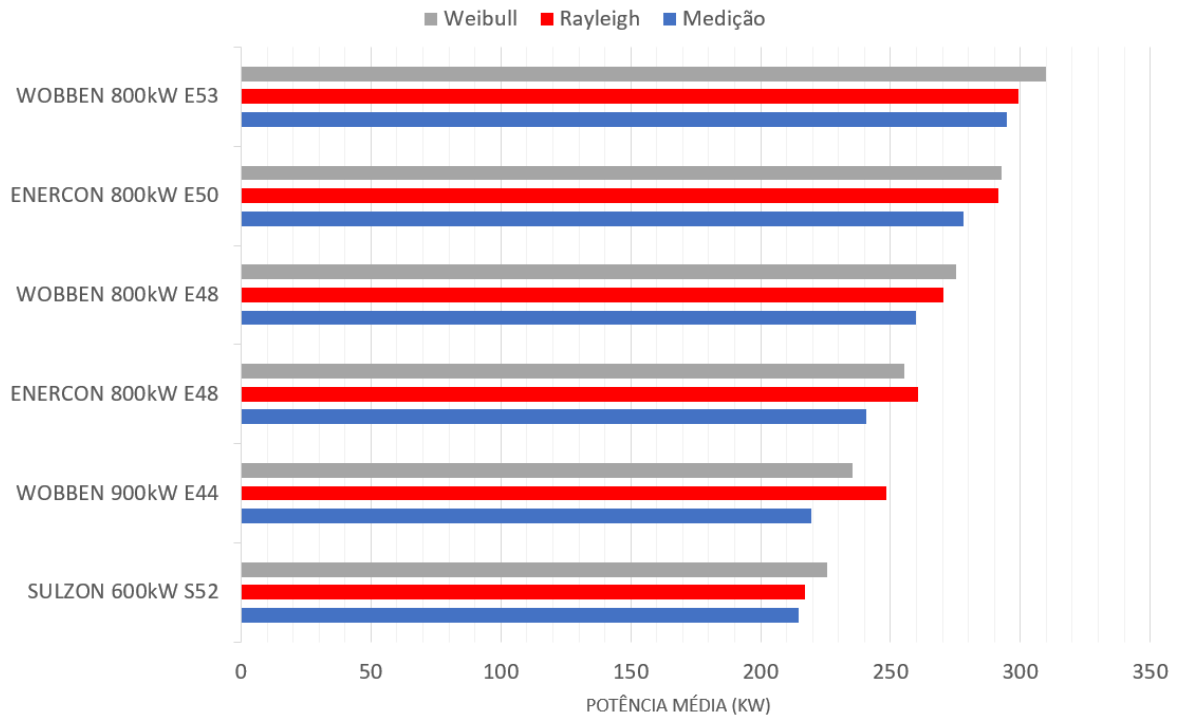
As Figuras 39, 40 e 41 respectivamente, mostram os valores de energia anual gerada, potência média e fator de capacidade dos aerogeradores com potência inferior a 1MW.

Figura 39 – Energia anual gerada para aerogeradores de potência nominal inferior a 1MW



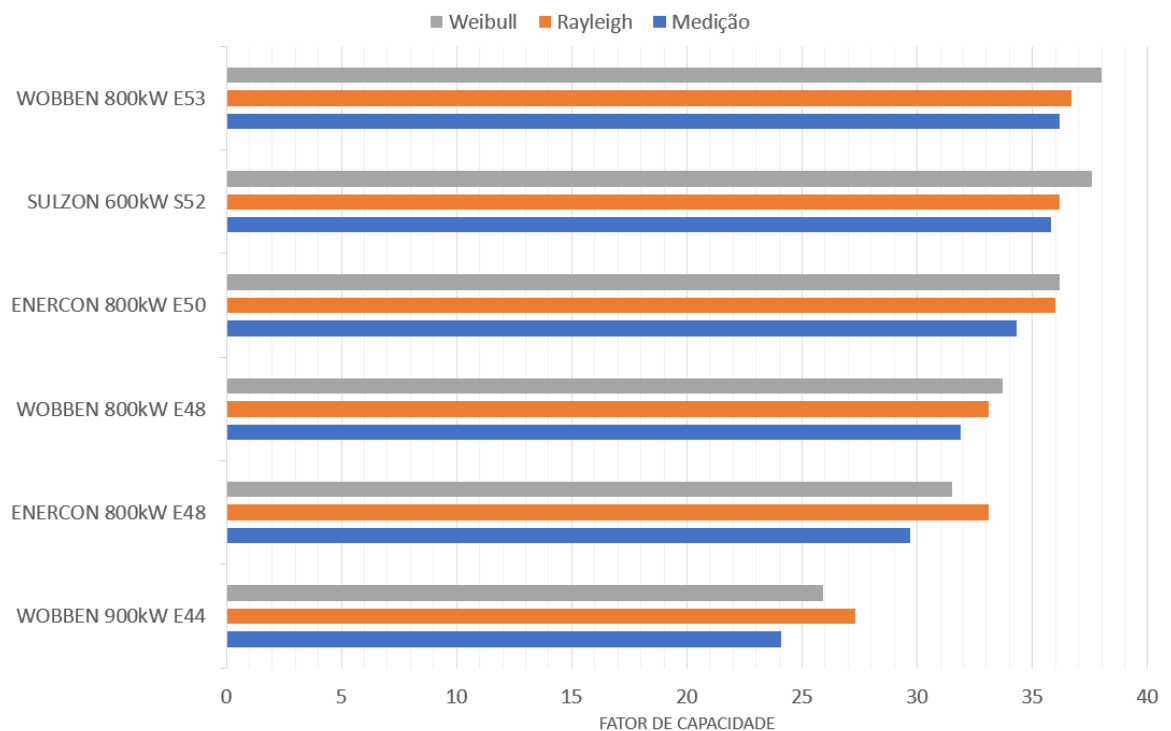
Fonte: Autoria Própria

Figura 40 – Potência média para aerogeradores de potência nominal inferior a 1MW



Fonte: Autoria Própria

Figura 41 – Fator de capacidade para aerogeradores de potência nominal inferior a 1MW



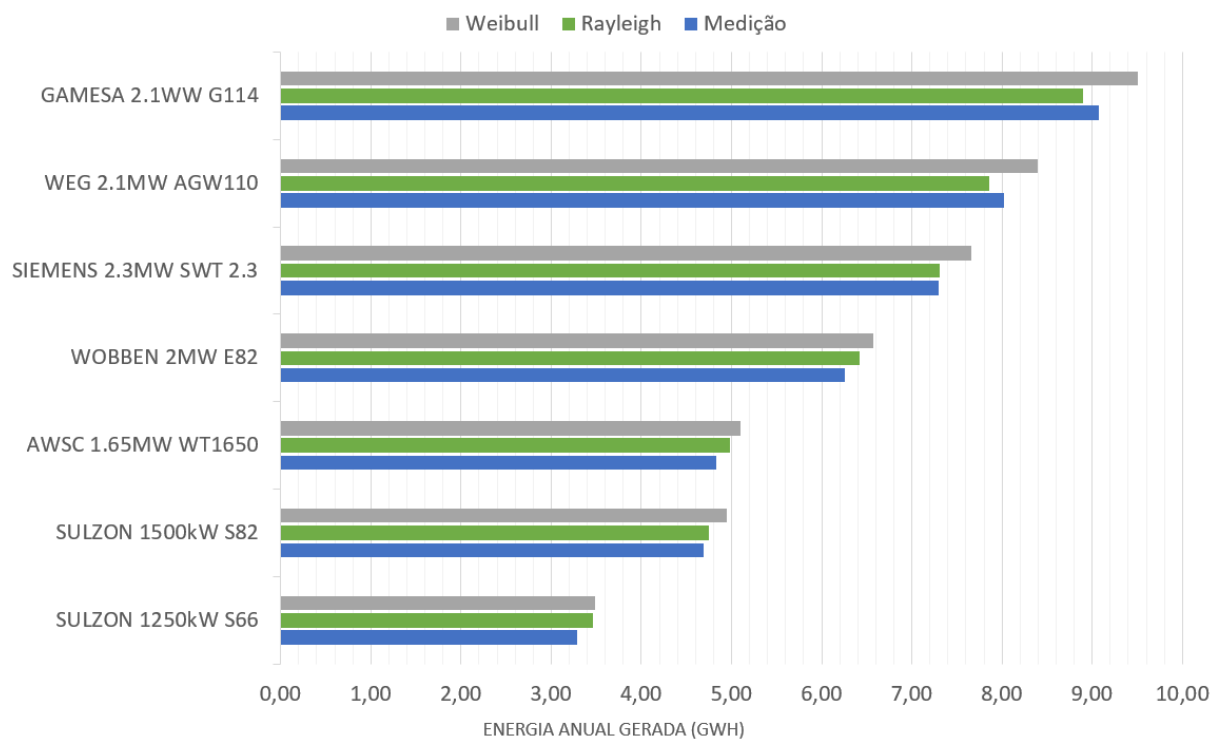
Fonte: Autoria Própria

Nesse grupo de geradores, pode-se identificar que a máquina que apresentou melhor desempenho, considerando os três fatores definidos, foi o aerogerador “E53” de 800kW da empresa Wobben.

Cabe observar que o aerogerador “S52” de 600kW da empresa Sulzon, apresentou expressivo Fator de Capacidade se comparado as demais máquinas do grupo o que representa maior eficiência em relação a capacidade de produção.

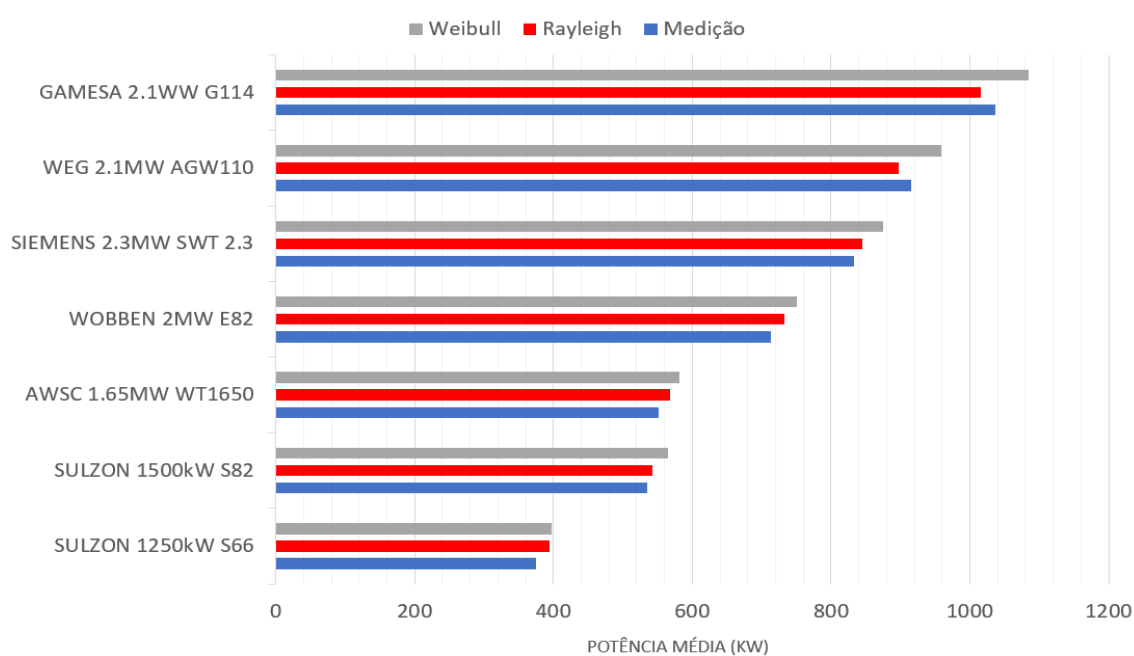
As Figuras 42, 43 e 44 respectivamente, mostram os valores de energia anual gerada, potência média e fator de capacidade dos aerogeradores com potência superior a 1MW e inferior a 3MW.

Figura 42 – Energia anual gerada para aerogeradores de potência nominal superior a 1MW e inferior a 3MW



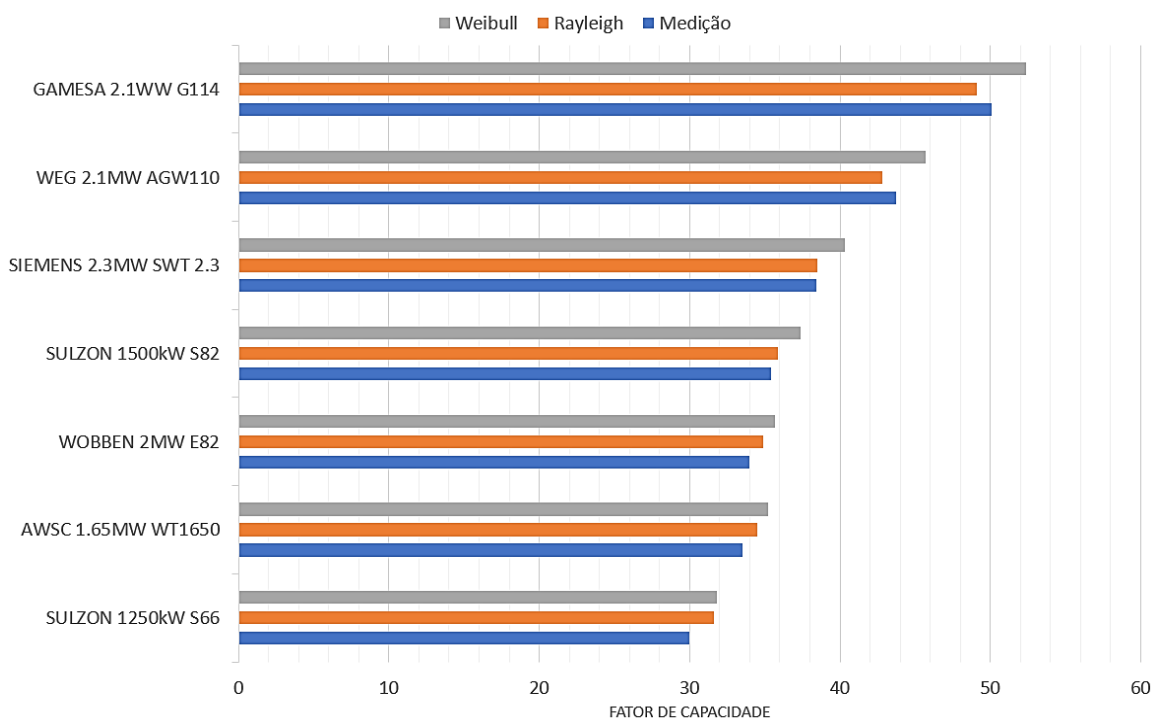
Fonte: Autoria Própria

Figura 43 – Potência média para aerogeradores de potência nominal superior a 1MW e inferior a 3MW



Fonte: Autoria Própria

Figura 44 – Fator de capacidade para aerogeradores de potência nominal superior a 1MW e inferior a 3MW



Fonte: Autoria Própria

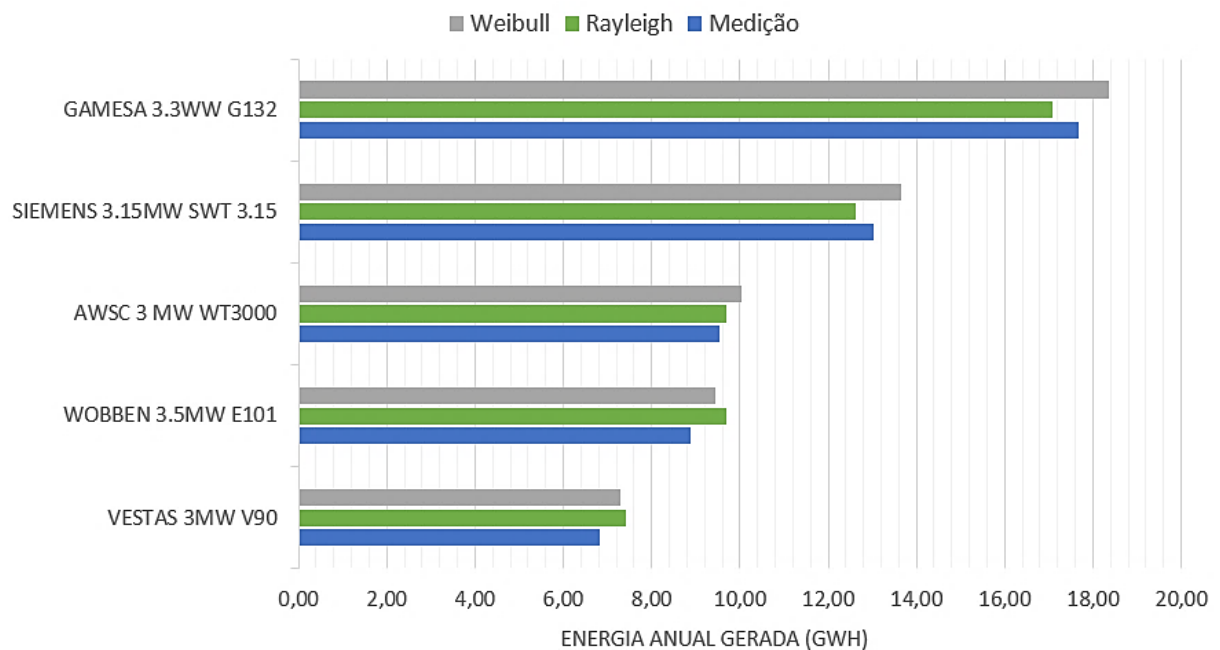
No segundo grupo de geradores, percebe-se que a máquina que apresentou melhor desempenho, considerando os três fatores definidos, foi o aerogerador “G114” de 2,1MW da empresa Gamesa.

Cabe observar que em relação a energia anual gerada, considerando os dados de medição, esse aerogerador apresentou resultado 13,23% maior que o modelo “AGW110” de mesma potência, fabricado pela empresa WEG.

Ainda para os valores de medição, a potência nominal e o fator de capacidade foram respectivamente 13,23% e 14,65% superiores a segundo modelo.

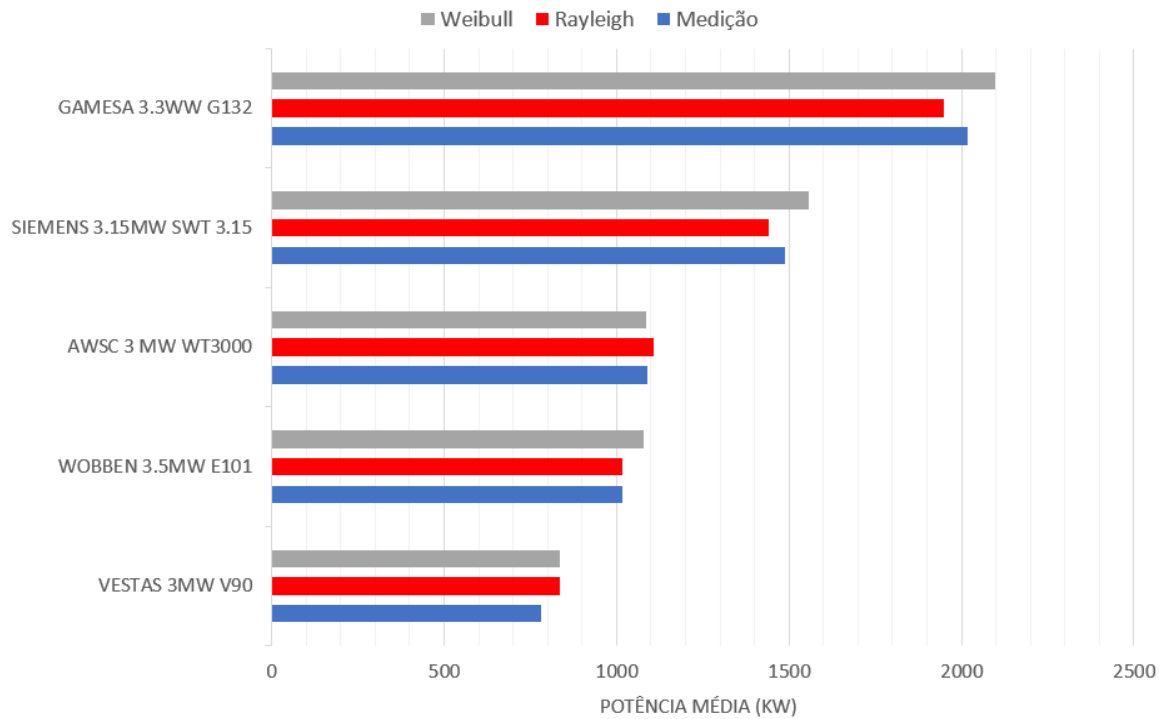
As Figuras 45, 46 e 47 respectivamente, mostram os valores de energia anual gerada, potência média e fator de capacidade dos aerogeradores do terceiro grupo de máquinas, ou seja, com potência superior a 3MW.

Figura 45 – Energia anual gerada para aerogeradores de potência nominal superior a 3MW



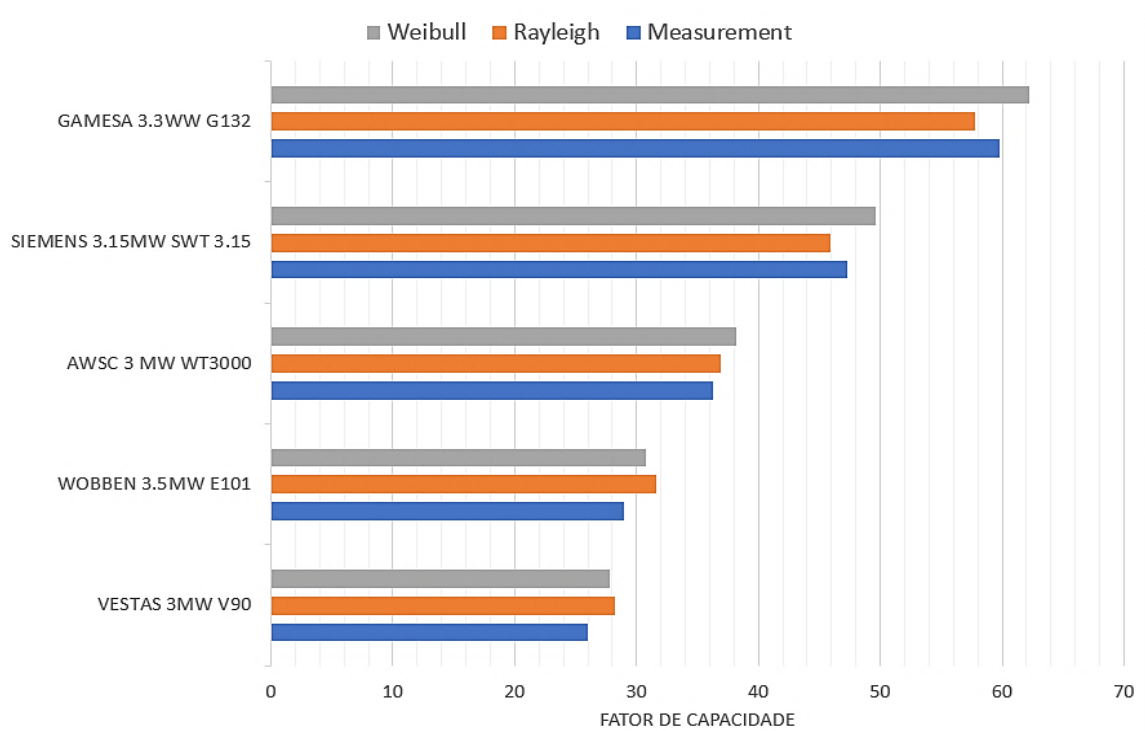
Fonte: Autoria Própria

Figura 46 – Potência média para aerogeradores de potência nominal superior a 3MW



Fonte: Autoria Própria

Figura 47 – Fator de capacidade para aerogeradores de potência nominal superior a 3MW



Fonte: Autoria Própria

No terceiro grupo de geradores, nota-se que a máquina que apresentou melhor desempenho, considerando os três fatores definidos, foi o aerogerador “G132” de 3,3MW da empresa Gamesa.

Cabe observar que em relação a energia anual gerada, considerando os dados de medição, esse aerogerador apresentou resultado 35,45% maior que o modelo “SWT3.15” de 3,15Mw, fabricado pela empresa Siemens.

Ainda para os valores de medição, a potência nominal e o fator de capacidade foram respectivamente 35,45% e 26,43% superiores a segundo modelo.

Inicialmente tinha-se a perspectiva de que geradores de menor potência se adequariam melhor as características de vento do local em estudo, porém as simulações e resultados mostraram situação diferente. Observa-se que dos aerogeradores simulados, os que apresentaram maiores montantes de geração foram os de potência superior a 2MW.

Cabe salientar que o estudo não trata da análise econômica e financeira como critérios para a escolha do aerogerador, fator de extrema importância na real implementação de um parque eólico, mas apenas demonstra o desempenho dos geradores para a atual condição.

No entanto, considerando as máquinas analisadas neste estudo, o aerogerador que apresentou melhor desempenho no requisito energia anual gerada, potência média e fator de capacidade, foi o modelo “G132” de 3,3MW da fabricante Gamesa.

5 CONCLUSÕES

Nesse trabalho, foram realizadas simulações e pode-se conhecer o desempenho energético dos diferentes modelos de aerogeradores para os dados do potencial do vento disponível.

Para cada um dos três grupos caracterizados, destacaram-se respectivamente o modelo “E53” de 800kW da empresa Wobben, (categoria potência nominal inferior a 1MW), o modelo “G114” de 2,1MW da empresa Gamesa (grupo de potência nominal maior que 1MW e menor que 3MW), e por último, na categoria de aerogeradores com potência nominal superior a 3MW o modelo “G132” de 3,3MW também da empresa Gamesa.

Observa-se que o modelo “G132” não só apresentou melhor desempenho no seu grupo, mas também de todos os aerogeradores considerados neste estudo.

Cabe salientar que esta análise considerou apenas os critérios técnicos de cada modelo de forma individual, podendo os resultados sofrer alterações para outras características de vento ou quando outros preceitos forem classificados.

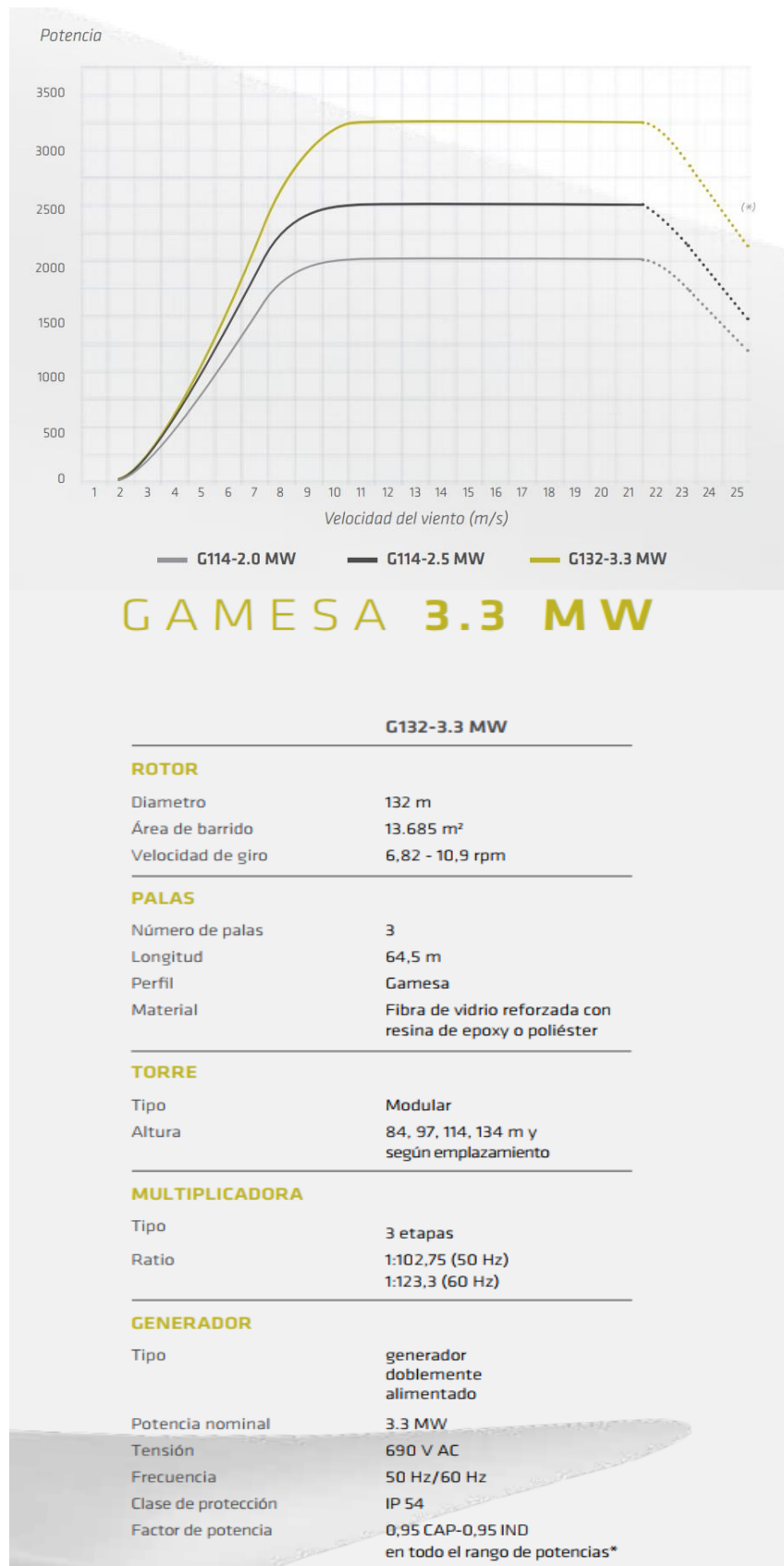
No contexto geral, as simulações para análise de desempenho dos aerogeradores relacionados ao potencial de vento conhecido, expuseram os objetivos propostos e possibilitaram maior conhecimento dos conceitos de geração de energia eólica, tipos de aerogeradores e *softwares* de simulação.

Como previsão de trabalho futuros, propõem-se a simulação de um parque eólico em sua totalidade a partir de *software* de maior complexidade e abrangência, implementando os aerogeradores que apresentaram melhor desempenho neste estudo. O *software* OpenWind e Wasp seriam os mais indicados para esta análise.

Após o estudo técnico, pode-se ainda realizar análise econômica e financeira para a efetiva implantação de um parque eólico no local de estudo.

A Figura 48 apresenta os dados técnicos do aerogerador “G132”, obtidos a partir do catalogo do fabricante.

Figura 48 – Datos técnicos gerador Gamesa G132



Fonte: GAMESA Energia Renovável

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (Brasil). Atlas de energia elétrica do Brasil. Brasília: ANEEL, 2002.

AMMONIT Measurement GmbH: Ammonit 2017. Disponível em: <<https://www.ammonit.com>>

ASMC. Fabricante de turbinas e geradores eólicos. Disponível em: <<http://www.asmc.com>>

AWS TruePower. Disponível em: <<https://www.awstruepower.com>>

CAMARGO, O. A. et al. Atlas eólico do Rio Grande do Sul: Secretaria de Energia, Minas e Comunicações. 2002. ed. Porto Alegre: SEMC, 2002.

CANAL BIOENERGIA, 2015. Disponível em:<<http://www.canalbioenergia.com.br/energia-eolica-registra-records-de-expansao-no-brasil/>>

CUSTÓDIO, Ronaldo dos Santos – Energia Eólica para produção de energia elétrica – Rio de Janeiro. Eletrobrás 2009.

DEWI. Alwin for Windows: DEWI 1995

DRACHMANN, A.G. (1961) "Heron's Windmill", Centaurus, 7, pp. 145–151

ENERGY CLASSROOM. Disponível em: <<http://energyclassroom.com/change-wind-to-power/>>

EPE, E. d. Plano Decenal de Expansão de Energia 2024. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/PDEE/Relat%C3%B3rio%20Final%20do%20PDE%202024.pdf>>

EWEA – The Europe Wind Energy Association. Disponível em: <<http://http://www.ewea.org/>>

GAMESA Renewable Energy. Fabricante de turbinas e geradores eólicos. Disponível em: <<http://www.gamesacorp.com>>

HANSEN, L. H.; HELLE, L.; BLAABJERG, F. et al. Conceptual survey of generators and power electronics for wind turbines. Roskilde, Denmark, 2001. Risø National Laboratory.

HILL, Donald R. (May 1991). «Mechanical Engineering in the Medieval Near East». Scientific American. 264 (5): 64–69. doi:10.1038/scientificamerican0591-100 Verifique data em: |data=(ajuda) (cf. Hill, Donald R., Mechanical Engineering)

PETRY, A. P., Mattuella, J. M. L. “Análise do Potencial Eólico e Estimativa da Geração de Energia Empregando o “Software” Livre Alwin”, Porto Alegre, 2007.

PORTAL BRASIL. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br>>

PORTAL DA ENERGIA. Disponível em: <<https://www.portal-energia.com/>>

ROCA, W. B. Dimensionamento de um Parque Eólico e sua Subestação, Comparando Ferramentas de CFD e Atlas Eólicos. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.

SCHUBERT, C.; Eletrosul Atlas Eólico do Rio Grande do Sul 2014. AGDI, 2014

SCHUBERT, Camargo; ELETROSUL, Centrais Elétricas S.A; Atlas eólico do Rio Grande do Sul. 2014. ed. Porto Alegre: SDPI: AGDI, 2014.

SIEMENS Wind Power. Fabricante de turbinas e geradores eólicos. Disponível em: <<http://www.siemens.com>>

SULZON Powering a Greener Tomorrow. Fabricante de turbinas e geradores eólicos. Disponível em: <<http://www.sulzon.com>>

THE RENEVABLE ENERGY WORLD, 2014. Disponível em: <<http://www.renewableenergyworld.com/ugc/articles/2014/11/history-of-wind-turbines.html>>

TOLMASQUIM, Mauricio T. et al. Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica. Rio de Janeiro: EPE, 2016. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/Documents/Energia%20Renov%C3%A1vel%20-%20Online%2016maio2016.pdf>>.

VESTAS. Fabricante de turbinas e geradores eólicos. Disponível em: <<http://www.vestas.com>>

WEG Generation, Transmission and Distribution. Fabricante de turbinas e geradores eólicos. Disponível em: <<http://www.weg.net/br>>

WOBLEN WindPower. Fabricante de turbinas e geradores eólicos. Disponível em: <<http://www.wobben.com.br>>