



Grupo de Estudo de Geração Eólica, Solar e Armazenamento-GES

ANÁLISE DA CURVA DE POTÊNCIA DE AEROGERADOR CONSIDERANDO A VELOCIDADE NA ALTURA DO EIXO DO ROTOR E AS VELOCIDADES ATUANDO NA EXTENSÃO DAS PÁS

MARCELO GUEDES AZEVEDO VIANA(1); CHARLES EGBERTO GUEDES VONNEGUT VIEIRA DE MELLO(2);
JOão IGNÁCIO DA SILVA FILHO(3); MARIA REGINA DE OLIVEIRA PEREIRA DE ARAÚJO(4); MIGUEL HIROO
HIRATA(5);
HORIZONTE E. R.(1);HORIZONTE E. R.(2);HORIZONTE E. R.(3);HORIZONTE E. R.(4);HORIZONTE E. R.(5);

RESUMO

Este informe técnico reporta resultados da análise do vento e curva de potência de um aerogerador considerando a velocidade no eixo e as velocidades atuando na extensão das pás. As medições foram obtidas por sensoriamento remoto com LiDAR. A análise do vento é realizada pelo perfil de velocidades e pela turbulência, e a curva de potência utilizando critérios de velocidade no eixo e velocidade equivalente sem e com turbulência. Dentre as contribuições, destaca-se a influência da turbulência atmosférica no cálculo da velocidade equivalente do vento pelo fluxo de energia no rotor e seu impacto na curva de potência do aerogerador.

PALAVRAS-CHAVE

Energia eólica, Perfil vertical do vento, Velocidade equivalente do vento, Curva de potência de aerogerador

1.0 - INTRODUÇÃO

O método mais comum para levantar a curva de potência de um aerogerador considera a medição simultânea do vento livre à altura do eixo do rotor e da potência gerada. Essa curva de potência é usada para certificar o equipamento e conferir se o desempenho está de acordo com o esperado.

A utilização desta prática pode comprometer os aspectos mencionados uma vez que a velocidade do vento, medida na altura do eixo do rotor, pode não representar fielmente o fenômeno aerodinâmico como será ilustrado a seguir.

A demanda por turbinas mais eficientes e o avanço nas tecnologias de fabricação, logística e instalação disponíveis viabilizam a utilização de turbinas maiores instaladas em torres mais altas. A consequência imediata é que a diferença entre a maior (e menor) altura alcançada pela ponta das pás e a altura do eixo aumenta, o mesmo podendo acontecer entre as velocidades do vento que ocorrem nestas alturas e a velocidade na altura do eixo.

Para a certificação e estudos de desempenho de turbinas eólicas, o aumento da altura do eixo e do diâmetro da pá requer especial atenção não apenas pelo motivo acima descrito, mas também pelo fato de que as pás destas turbinas operam no interior da camada limite atmosférica, caracterizada pela presença de fortes variações no gradiente de velocidades.

Para a operação de turbinas eólicas nas regiões tropicais um importante fator, que se adiciona aos acima mencionados, está relacionado à intensa incidência dos raios solares que ao aquecer a superfície da Terra provoca um fluxo de calor ascendente resultando numa forte estratificação térmica. Ao longo do dia, associada a esta estratificação, observa-se uma variação do comportamento da atmosfera passando do equilíbrio instável com um perfil de velocidades que se apresenta mais ou menos constante nas maiores alturas, no período diurno,

para o equilíbrio estável no período noturno com o perfil de velocidades apresentando um comportamento mais ou menos linear aumentando com a altura.

Considerar, portanto, somente a velocidade do vento atuando na altura do eixo do rotor pode não representar a melhor prática, podendo levar a resultados pouco precisos e confiáveis. Urgente se torna um melhor conhecimento da distribuição vertical da velocidade do vento (o perfil de velocidades) ao longo de todo o disco da turbina. O levantamento deste perfil de velocidades com a utilização de torres anemométricas com a altura desejada pode representar um custo elevado e, por esta razão, a utilização de técnicas de sensoriamento remoto aliadas a modelos de previsão teóricos representam uma tendência que se observa; a utilização do LiDAR (Light Detection and Ranging) consiste numa das tecnologias existentes.

Em 2017, a IEC revisou a norma IEC 61400-12-1 (1) para incluir uma metodologia alternativa para levantamento da curva de potência de turbinas eólicas com base numa grandeza denominada de velocidade equivalente. A velocidade equivalente – V_{EQ} – está associada ao fluxo de energia através do disco do rotor; o valor do cubo desta velocidade multiplicado pela área do disco do rotor fornece o fluxo de energia ao longo deste disco. Assim sendo esta velocidade depende não apenas do diâmetro do rotor, mas também da distribuição da velocidade do vento ao longo do disco do rotor.

Neste Informe Técnico são apresentadas as análises das velocidades do vento medidas numa torre anemométrica e com o auxílio de um LiDAR assim como da energia gerada por uma turbina de um parque eólico em operação no litoral do nordeste brasileiro, com clima representativo dos locais de grande parte dos projetos eólicos instalados na região. Os ventos nesta região sofrem forte influência das brisas (marítimas e terrestres) com comportamento bem diferenciado entre os períodos diurno e noturno; a rosa dos ventos mostra que os ventos sopram preferencialmente no interior de um setor com um ângulo de abertura muito pequeno.

Ao considerar os dados de vento de 10 minutos medidos em alturas variando entre 28 m e 150 m, durante 32 dias, e um aerogerador com diâmetro do rotor com 122 m instalado à 89 m, os resultados dos estudos apresentaram uma diferença entre a velocidade medida na altura do eixo e a velocidade equivalente da ordem de 0,98 a 1,08 e de 0,99 a 1,06, ao considerar, respectivamente, os períodos diurnos e noturnos. Ao considerar a velocidade equivalente (calculada levando-se em consideração) a turbulência, a variação com a velocidade na altura do cubo modifica para 0,97 a 1,06 e 0,99 a 1,06. Entretanto, há uma menor dispersão no caso da velocidade equivalente com turbulência. Os valores do período diurno são menores que os do período noturno devido às diferenças entre o comportamento do vento ao longo do dia. Na curva de potência do aerogerador não foi observada diferença significativa ao considerar os três tipos de velocidade: na altura do eixo, equivalente e equivalente com turbulência. Isto se deve principalmente à grande dispersão dos dados de geração para um mesmo valor de velocidade. Entretanto, mesma essa pouca diferença torna-se relevante ao considerar a produção anual de energia (AEP).

2.0 - A DISTRIBUIÇÃO VERTICAL DA VELOCIDADE DOS VENTOS E O APROVEITAMENTO EÓLICO

O comportamento dos movimentos do ar na atmosfera (ventos) é tipicamente turbulento e sofre influência marcante do aquecimento do ar provocado pelos raios solares. Como é prática comum na análise deste tipo de escoamento, a velocidade instantânea $V(z,t)$ é representada pela soma de um valor médio $U(z)$ com uma flutuação $u(z,t)$:

$$V(z,t)=U(z) + u(z,t) \quad (1)$$

Normalmente, U representa o valor médio calculado ao longo de 10 minutos e assume-se que o valor médio da flutuação seja nulo ($\bar{u} = 0$).

2.1 Perfil Vertical da Velocidade do Vento

No período diurno os fluxos ascendentes de calor e massa produzem um efeito que se soma aos efeitos inerentes ao escoamento turbulento provocando um forte efeito de mistura entre as camadas, o que resulta numa homogeneização das propriedades do escoamento, incluindo a velocidade. Observa-se forte gradiente de velocidade nas partes adjacentes ao solo para permanecer aproximadamente constante nas partes mais altas da camada limite atmosférica CLA (ver Figura 1).

No período noturno, cessada a ação dos raios solares, há uma inversão do fluxo de calor e o efeito térmico inibe parcialmente os efeitos de mistura do escoamento turbulento. O gradiente de velocidades nas partes baixas da

CLA apresenta valores moderados e, nas partes altas, um comportamento quase linear.

Diz-se que estas duas situações são típicas de uma atmosfera estratificada termicamente. A descrição matemática do perfil de velocidades numa atmosfera termicamente estratificada é feita pela lei logarítmica modificada [2].

No início da inversão térmica e quando a velocidade do vento atinge valores muito elevados, os efeitos mecânicos (associados à força inercial) do escoamento turbulento praticamente anulam os efeitos térmicos e o escoamento comporta-se como se isotermicamente fosse. Nesta situação a atmosfera apresenta um estado de equilíbrio neutro e o perfil de velocidades comporta-se de maneira logarítmica [2, 3].

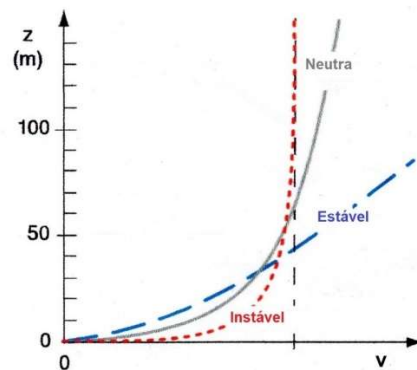


FIGURA 1. Perfil de velocidades para diferentes estados de equilíbrio da atmosfera terrestre

A Figura 2 ilustra esquematicamente a distribuição da velocidade ao longo do disco de um aerogerador de acordo com o comportamento vertical da atmosfera: estável, neutra ou instável. As diferenças entre os tipos de comportamento vertical da atmosfera tornam-se mais marcantes nas regiões tropicais.

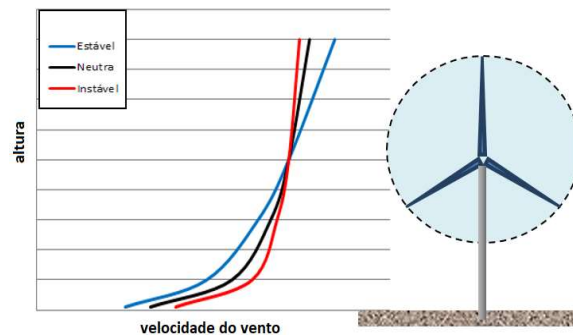


FIGURA 2. Influência do perfil de velocidades no fluxo de energia através do disco da turbina

2.2 A Velocidade Representativa do Fenômeno: A Velocidade Equivalente

Como mencionado na introdução e ilustrado na Figura 2, a velocidade do vento (V_H) medida na altura do eixo do rotor pode não ser a que melhor representa o fenômeno. Na IEC 61400-12-1 a velocidade representativa é a velocidade equivalente (V_{EQ}) calculada em função do fluxo de energia através do disco da turbina. A velocidade equivalente depende das variações verticais da velocidade, direção e turbulência dos ventos. Como na região onde os dados foram medidos, para aplicação no estudo, é desprezível a variação da direção dos ventos com a altura, no IT não será considerado a influência da direção do vento.

Na IEC 61400-12-1 a velocidade equivalente é calculada por:

$$(V_{EQ})^3 A = \int_A U(z)^3 dA \quad (2)$$

A velocidade equivalente pode ser facilmente calculada se o valor da velocidade for conhecido em diferentes

alturas. Nesta expressão, “A” representa a área do disco da turbina.

No entanto, se os efeitos da turbulência forem considerados (V_{EQT}), uma alternativa à eq. (2) pode ser escrita por:

$$(V_{EQT})^3 A = \int_A (\bar{V}^3) dA \quad (3)$$

Com esta interpretação, toma-se o valor médio do cubo da velocidade, como representada pela eq. (1). Levando-se em consideração a definição da intensidade da turbulência, o fato de que o valor médio da flutuação é nulo e desprezando termos de ordem superior, a (V_{EQT}) a forma discretizada da eq. (3) se escreve.

$$V_{EQT} = \left\{ \sum U_i^3 \left(\frac{A_i}{A} \right) [1 + 3 I_t^2] \right\} \quad (4)$$

Nesta expressão, U_i representa o valor médio da velocidade no elemento de superfície cuja área é representada por A_i e, I_t é a intensidade de turbulência no elemento de área considerado.

3.0 - DADOS DE CAMPO UTILIZADOS NOS ESTUDOS

Os dados de vento e de geração de energia elétrica foram medidos em um parque eólico em operação no litoral do nordeste brasileiro, durante 32 dias, nos meses de agosto e setembro. Os dados de vento foram medidos com um equipamento LiDAR (Light Detection and Ranging) instalado a 450 m de um aerogerador Alstom ECO122/2700. Algumas características dos equipamentos e dados medidos são:

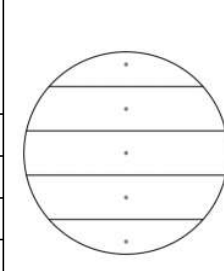
LiDAR - Alturas de medição: 28, 50, 89, 120 e 150 metros. Dados referenciados a cada 10 minutos. Velocidade: média, desvio padrão e intensidade de turbulência. Direção: média.

Aerogerador – Diâmetro do rotor: 122 m. Altura do eixo: 89 m. Geração: potência média em 10 minutos. Potência máxima 2700 kW.

Em função das alturas de medição do vento e as dimensões do aerogerador, para calcular as V_{EQ} e V_{EQT} foram utilizados os dados da Tabela 1

Tabela 1 – Alturas e áreas de referências utilizadas no estudo

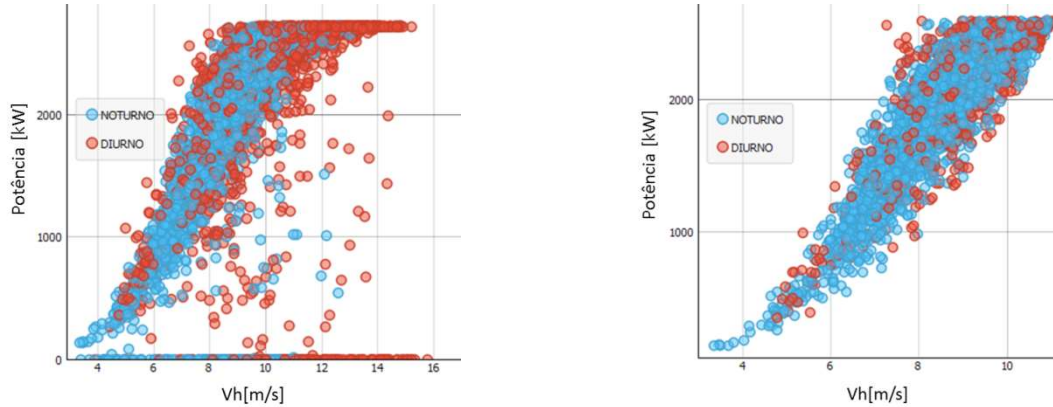
| Altura medição (m) | Altura inferior da faixa área rotor (m) | Altura superior da faixa área rotor (m) | Área faixa ponderada com área total (%) |
|--------------------|---|---|---|
| 28 | 28 | 39 | 4,5 |
| 50 | 39 | 69,5 | 25,5 |
| 89 | 69,5 | 104,5 | 36,0 |
| 120 | 104,5 | 135 | 27,0 |
| 150 | 135 | 150 | 7,0 |



Foi feita uma análise expedita dos dados de geração com o objetivo de retirar das séries de produção, aqueles considerados espúrios. Foram utilizados os seguintes critérios:

- dados fora do intervalo [10 kW, 2600 kW], a saturação da curva de potência é de 2700 kW.
- direção do vento fora do intervalo [30°, 110°], intervalo de direção com vento livre de obstáculos.
- geração maior que $0,3 \times \frac{1}{2} \times 1,1 \times V_h^3$, eficiência mínima assumida para operação normal do aerogerador.

Os gráficos com a geração antes e depois da retirada de dados considerados espúrios estão apresentados na Figura 3.



a) dados medidos b) dados considerados nos estudos
FIGURA 3. Dados de geração considerados no estudo

4.0 - ANÁLISE DOS DADOS MEDIDOS E RESULTADOS DOS ESTUDOS

4.1 Perfil Vertical da Velocidade do Vento em Função do Período do Dia

Na Figura 4 estão apresentados os perfis de velocidade medidos no período de 1 dia, a cada 10 minutos, separados em dia e noite, onde pode ser observado uma nítida diferença dos perfis ao considerar os dois períodos do dia. No período diurno o perfil do vento tem características de uma atmosfera instável e no noturno de atmosfera estável. Em vista deste fato, para fins dos estudos, a massa de dados foi dividida em período noturno e diurno.

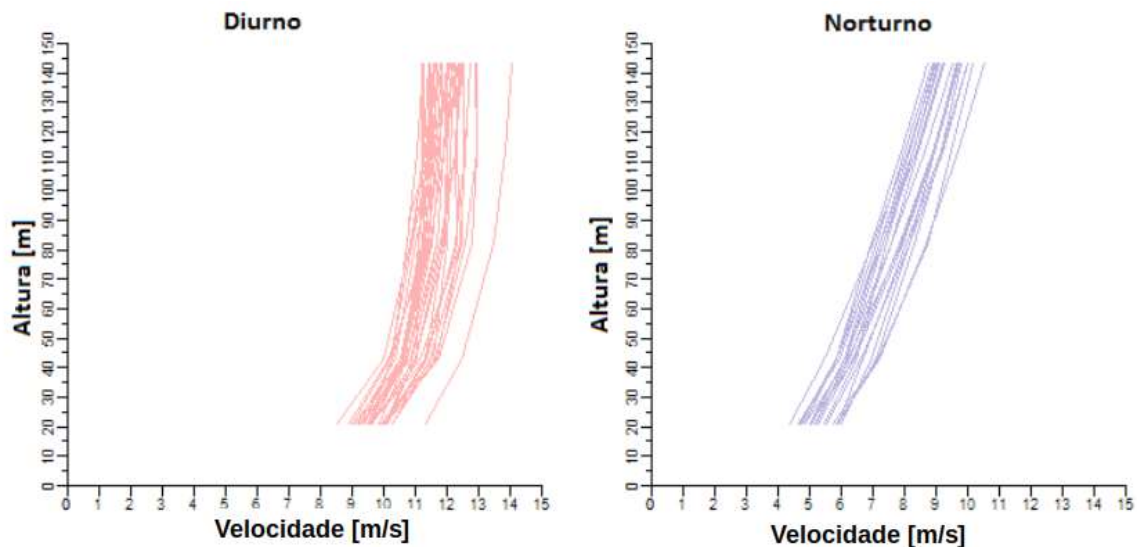


FIGURA 4. Comportamento do perfil de velocidades em cada período do dia

4.2 Velocidade na Altura do Eixo x Velocidade Equivalente

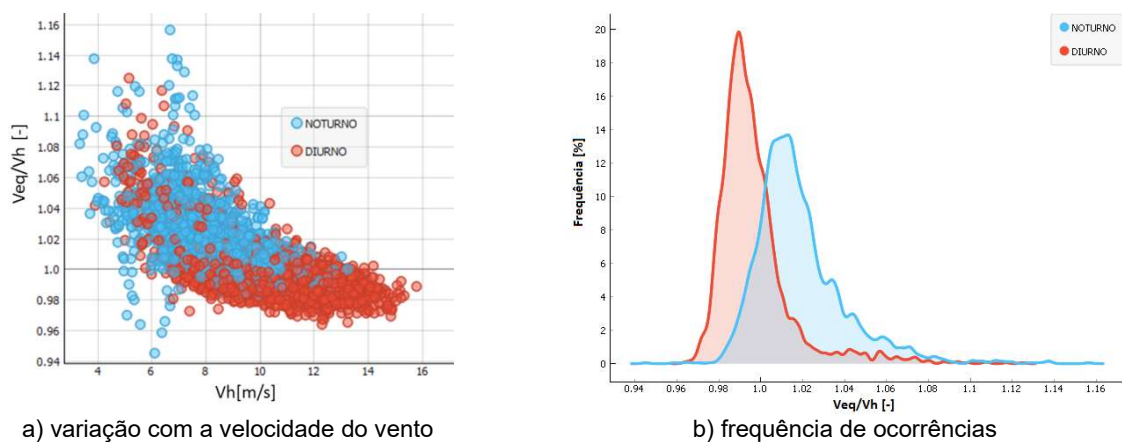
Para discutir as diferenças encontradas entre as V_H e V_{EQ} , lembra-se aqui as características do aerogerador: diâmetro de 122 m, com eixo do rotor a 89 m e pontas das pás mais baixa e mais alta de 28 m e 150 m, respectivamente.

Na Figura 5.a observa-se o comportamento da razão $[V_{EQ}/V_H]$ em função da velocidade do vento V_H (velocidade a 89 m). Na Figura 5.b, tem-se em forma de histograma o número de ocorrências dos valores da razão. Nos dois

casos foram considerados em separados os períodos diurno e noturno.

No período diurno a atmosfera apresenta um comportamento instável, onde acima da altura de 40 m é pouca a variação da velocidade do vento com a altura, ou seja, nas condições do estudo praticamente toda extensão do rotor está submetido à uma pequena variação da velocidade do vento. Por isso a influência do perfil do vento na V_{EQ} deve-se à variação da velocidade entre 28 m e 40 m, que tem velocidades menores que V_H ; com isto há uma redução na V_{EQ} .

No período noturno, a razão V_{EQ}/V_H assume valores maiores porque predomina uma atmosfera com comportamento estável, onde o perfil da velocidade do vento aumenta continuamente com a altura. Por isso, V_{EQ} tende a apresentar valores maiores que V_H .



a) variação com a velocidade do vento

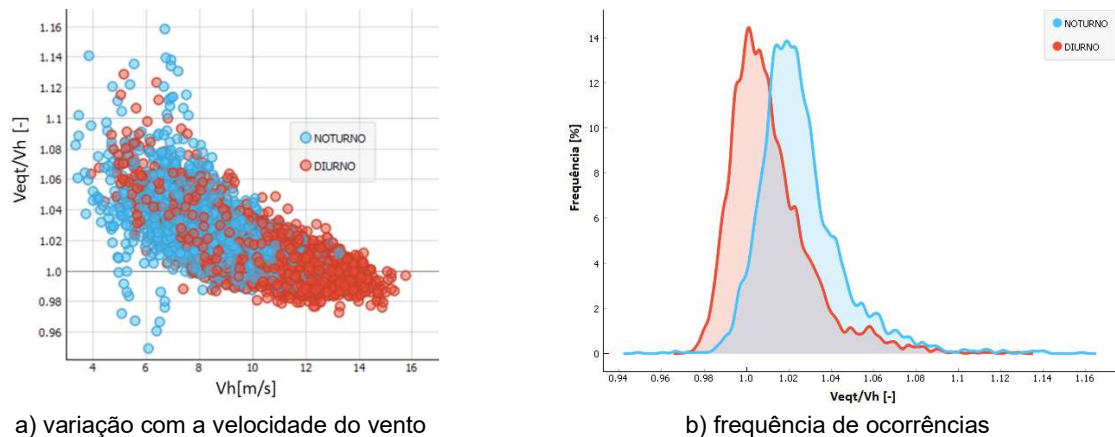
b) frequência de ocorrências

FIGURA 5. Comparação entre as velocidades na altura do eixo do rotor (V_H) e equivalente (V_{EQ})

Com base na Figura 5, a grosso modo, pode-se dizer que a média da razão é de 0,99 e 1,02 para os períodos diurno e noturno, respectivamente. Entretanto nota-se que há uma considerável dispersão no entorno desses valores, que pode implicar em diferenças, ao considerar V_H ou V_{EQ} , quando o objetivo é calcular a produção mensal do aerogerador.

4.3 Velocidade na Altura do Eixo x Velocidade Equivalente com Turbulência

A intensidade da turbulência atua no sentido de aumentar a velocidade equivalente (ver Equação 3). Por isso foi introduzida a turbulência observada em cada uma das alturas de medição e calculada para cada 10 minutos a V_{EQT} . As mesmas características de alturas do aerogerador foram aqui consideradas. Os resultados obtidos para a razão V_H/V_{EQT} estão apresentados na Figura 6.



a) variação com a velocidade do vento

b) frequência de ocorrências

FIGURA 6. Comparação entre as velocidades na altura do eixo do rotor (V_H) e equivalente com turbulência (V_{EQT})

Comparando os gráficos das Figuras 5 e 6, observa-se um aumento de V_{EQT} em relação à V_{EQ} , nos dois períodos do dia, como era de se esperar, sendo que a diferença maior ocorreu durante o dia, devido a turbulência ser maior. Também é clara a diminuição da dispersão dos valores.

4.4 Produção da Turbina em Função das Diferentes Velocidades Representativas

Na Figura 7 está apresentada em forma gráfica a produção do aerogerador em função das velocidades V_H , V_{EQ} e V_{EQT} . Na construção dos gráficos as velocidades foram agrupadas em intervalos de 0,5 m/s e só foram considerados os dados de produção citados no Item 3.0.

Neste gráfico observa-se que para um dado valor da potencia do aerogerador, o valor da velocidade, medida na altura do eixo (V_H), é sempre menor do que a velocidade equivalente (com ou sem a correção dos efeitos da turbulência), em outras palavras, a potencia especificada em função da velocidade no eixo é sempre maior do que a potencia especificada pelo mesmo valor da velocidade se esta for a velocidade equivalente.

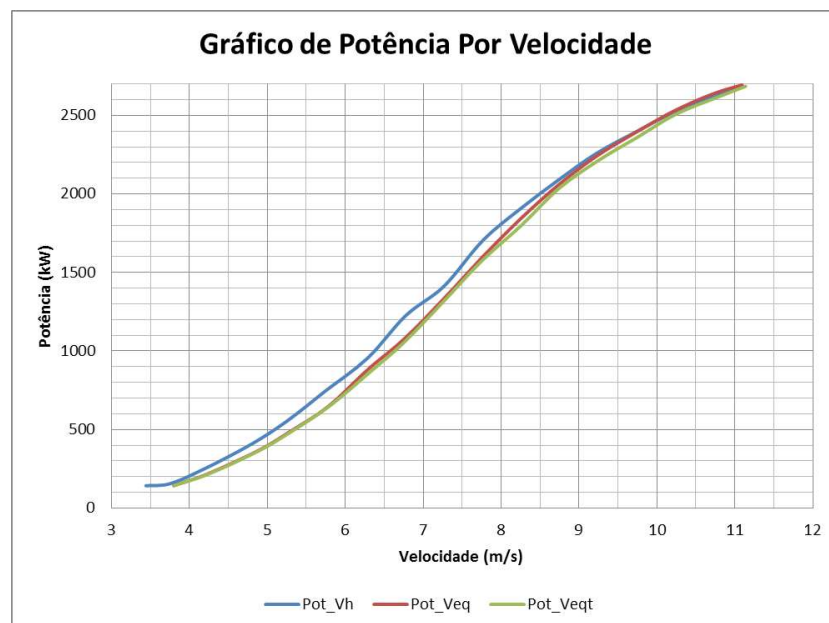


FIGURA 7. Gráficos de potência por velocidade obtidas com as velocidades V_H , V_{EQ} e V_{EQT}

5.0 - CONCLUSÃO

Os resultados permitem observar que para a região estudada:

O comportamento da atmosfera depende do período do dia, sendo instável no período diurno e estável no período noturno;

Como as velocidades V_{EQ} e V_{EQT} dependem do perfil vertical do vento na atmosfera instável e estável, o cálculo dessas variáveis deve ser feito dividindo a série em dois períodos, diurno e noturno.

Devido a maior variação da velocidade entre as alturas de 28 m e 50 m no período diurno, as V_{EQ} e V_{EQT} apresentam uma quantidade maior de valores de velocidades menores que a V_H .

Na média dos 32 dias as razões entre V_{EQ}/V_H e V_{EQT}/V_H apresentam pouca variação, próxima a 0,98 para o período diurno e 1,02 para o período noturno. Entretanto, ao considerar os valores de cada 10 minutos encontram-se uma dispersão considerável de valores para essas razões.

A curva de potência considerando cada tipo de velocidade não apresentou diferença significativa entre as mesmas. Pode-se especular que isso ocorreu pela grande dispersão da produção de energia para um mesmo intervalo de velocidade do vento, possivelmente causada por outras variáveis que não o vento, tais como as devidas ao tipo de operação do aerogerador no parque eólico.

Recomenda-se a continuidade deste tipo de estudo (abrangendo um tempo mais longo de medições e, também,

outros sítios com diferentes características) para outras massas de dados para determinar as diferenças em outras regiões climáticas do Brasil.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] IEC 61400-12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines Edition 2, Committee Draft 2.

[2] ARYA, S. P. "Introduction to Micrometeorology, 2001, Academic Press, INC.

[3] KUNDU, P.K. "Fluid Mechanics" (1990) Academic Press, INC

[4] R WAGNER, et al "Rotor equivalent wind speed for power curve measurement – comparative exercise for IEA WIND Annex 32", 2014, Journal of Physics: Conference Series 524 (2014) 012108 doi:10.1088/1742-

[5] D.L Elliot, J.B. Cadogan "Effects of wind shear and turbulence on wind turbine power curves", 1990 European Community Wind Energy Conference and Exhibition, 10 a 14 de Setembro de 1990; Madri, Espanha

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Marcelo Guedes Azevedo Viana, nascido em Belo Horizonte, em 1987. Engenheiro mecânico graduado pela UFMG em 2009 e pós-graduado em Gestão de Projetos pela Estácio em 2017. Exerce a função de engenheiro na área de desenvolvimento de projetos eólicos na Horizonte Energias Renováveis Ltda. Tem participação em projetos de pesquisa e desenvolvimento no setor elétrico e tem publicações em seminários e congressos nacionais.

Charles Egberto Guedes V Vieira de Mello, nascido no Rio de Janeiro, em 1995. Estudante de engenharia mecânica pela UFRJ e estagiário na área de desenvolvimento de projetos eólicos na empresa Horizonte Energias Renováveis Ltda.

João Ignácio da Silva Filho, nascido em Guaratinguetá SP, em 1949. Engenheiro civil graduado pela UFRJ em 1978 e MSc em 1981 pela COPPE/UFRJ na área de recursos hídricos, com especialização em análise estatística e processamento de dados pela ENCE. Exerceu por 33 anos atividades profissionais no CEPEL, na área de linhas de transmissão com ênfase em estudos de otimização, banco de dados meteorológicos, ação do meio ambiente em instalações elétricas, impacto ambiental e aproveitamento eólico. Tem várias publicações em seminários e revistas nacionais e internacionais sobre LTs e aproveitamento eólico. Atualmente é consultor independente de empresas do setor elétrico e pesquisador em projetos de P&D.

Miguel H. Hirata, nascido em Penápolis SP, em 1943. Engenheiro Naval graduado pela USP, em 1966, MSc em 1968 pela COPPE/UFRJ na área de Hidrodinâmica do Navio e PhD em 1972 pela "The University of Michigan. Professor aposentado pelo PEM-COPPE/UFRJ e pelo DEM da UERJ, campus de Resende. Foi professor visitante em várias instituições no País e no exterior, incluindo a USP e UNIFEI no Brasil, YNU e Hokkaido University no Japão e IC na Inglaterra. Atualmente é consultor independente de empresas do setor de aproveitamento de fontes renováveis de energia e pesquisador em projetos de P&D.

Maria Regina O. P. de Araújo, nascida em Lagoa da Prata MG, em 1955. Engenheira Mecânica graduada pela UnB, em 1979, MSc em 1989 pela COPPE/UFRJ na área de Energia Eólica e Doutora em Engenharia Mecânica pela COPPE/UFRJ na área de Aerodinâmica. Pesquisadora do CEPEL em energia eólica, Professora com bolsa de Recém Doutora e Professora Visitante no Programa de Engenharia Mecânica da UFRJ. Trabalhou na Iberdrola, empresa espanhola geradora de energia, durante 7 anos, inicialmente como engenheira e posteriormente como diretora técnica responsável por desenvolvimento de parques eólicos. Trabalhou na



XXV SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

4669
GES/04

10 a 13 de novembro de 2019
Belo Horizonte - MG

Wobben WindPower, empresa fabricante de aerogeradores Enercon no Brasil, como diretora comercial até fundar a Horizonte Energias Renováveis em 2010. Na Horizonte desenvolve projetos de parques eólicos e é também pesquisadora em Projetos P&D.