DIMENSIONAMENTO DE UM AEROGERADOR PARA SUPRIR A DEMANDA ENERGÉTICA DE UMA RESIDÊNCIA UNIFAMILIAR EM CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ

Caio Caetano Belletti⁽¹⁾ (caioibcaetano@gmail.com), Luana Ximenes Figueira⁽¹⁾ (lxfigueira@hotmail.com),
Francisco de Assis Léo Machado⁽¹⁾ (franciscoleomachado@gmail.com)

⁽¹⁾ Universidade Candido Mendes (UCAM); Engenharia Mecânica

RESUMO: A exploração de combustíveis fósseis vem aumentando de maneira significativa, gerando diversas consequências negativas para o meio ambiente. Uma solução é a utilização de recursos inesgotáveis e limpos para a geração de energia elétrica, como por exemplo o vento. Neste presente artigo, foi dimensionado um aerogerador de pequeno porte, capaz de produzir energia elétrica para suprir a demanda de uma residência localizada no município de Campos dos Goytacazes-RJ, mais precisamente na região litorânea da praia do Farol de São Thomé. Ao realizar o dimensionamento, a potência calculada para o aerogerador de eixo horizontal analisado, modelo ELV-H6.4, foi de 1822,72 W, enquanto a turbina modelo GS-5kW, de eixo vertical do tipo Darrieus, apresentou como resultado uma potência de 1188,75 W. A demanda mínima de pico de energia encontrada para a residência foi de 11350 W, já a demanda de pico real correspondeu a 11990 W. Com a instalação de 7 turbinas do modelo de eixo horizontal é possível atender ambos casos de demanda energética, porém para operar com o modelo de eixo vertical do tipo Darrieus, faz-se necessária a instalação de 10 turbinas para suprir a demanda mínima ou 11 turbinas para atender a demanda de pico real.

PALAVRAS-CHAVE: ENERGIA EÓLICA, ELETRICIDADE, AEROGERADOR.

SIZING OF A WIND TURBINE TO SUPPRESS THE ENERGY DEMAND OF A UNIFAMILIARY RESIDENCY IN CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ

ABSTRACT: The exploitation of fossil fuels has been increasing significantly. One solution is the use of inexhaustible and clean resources for the generation of electric energy. In this article, a small wind turbine was designed, capable of producing electricity to supply the demand for a residence located in the municipality of Campos dos Goytacazes-RJ, more precisely in the coastal of Farol de São Tomé's beach. When performing the sizing, the calculated power for the analyzed horizontal axis wind turbine, ELV-H6.4 model, was 1822.72 W, while the turbine model GS-5kW of Darrieus type vertical axis, showed a power of 1188.75 W. The minimum energy peak demand found for the residence was 11350 W, while the real peak demand was 11990 W. With the installation of 7 turbines of the horizontal axis model, it is possible to meet both cases of energy demand, but to operate with the Darrieus type vertical axis model, it is necessary to install 10 turbines to supply the minimum demand or 11 turbines to meet the real peak demand.

KEYWORDS: WIND ENERGY. ELECTRICITY. WIND TURBINE.

1. INTRODUÇÃO

A partir do processo de Revolução Industrial no século XVIII, fez-se necessária a obtenção de energia para suprir a demanda advinda do desenvolvimento tecnológico e econômico, principalmente dos países industrializados. Mantendo o foco apenas no ideal de crescimento da produtividade e fomentação do consumo, negligenciando os possíveis impactos ambientais gerados por tal processo, os recursos naturais foram desordenadamente explorados culminando na atual situação da humanidade, onde os efeitos negativos causados por este processo, tanto ao meio ambiente como a sociedade, alcançaram um estágio intolerável.

Nas últimas décadas, com a crescente dilatação populacional e aumento do consumo per capita em todo o mundo, instalou-se um cenário de grande exploração dos combustíveis fósseis e recursos naturais para geração de energia elétrica, principalmente através de termelétricas e hidrelétricas, recursos aos quais se responsabilizam grande parte dos problemas ambientais que assombram o planeta, tais como a emissão de gases poluentes (gás carbônico, óxidos de enxofre e nitrogênio), surgimento de chuvas ácidas, efeito estufa, desmatamento, inundações de áreas florestais e interferência no fluxo de rios.

A obtenção de energia elétrica através de fontes naturais inesgotáveis e não poluentes, como o sol, marés, ondas e vento, aparece no atual cenário como uma potencial alternativa para reduzir a queima de combustíveis fósseis, uma vez que partindo do princípio sustentável, garantem energia para suprir a grande demanda e baixo ou nenhum impacto ambiental.

No viés das fontes renováveis, a eólica exhibe um panorama ascendente há alguns anos no Brasil, que é justificado pela grande evolução e confiabilidade desta tecnologia simultaneamente a significativos investimentos governamentais, como o programa de incentivo às fontes de energia e o programa de Ventos do Sul. Por ser extraída através da energia cinética presente nas massas de ar em movimento, é apontada como uma fonte renovável, limpa e amplamente disponível e de baixo custo para obtenção.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para realização do dimensionamento foi necessário:

- Estudar as características ambientais do local de instalação, como pressão atmosférica, regime de ventos, relevo e camada limite;
- Utilizar o *Software Google Earth*;
- Utilizar o Atlas do Potencial Eólico do Rio de Janeiro;

- Utilizar a página de Registro de Dados Climáticos;
- Analisar os tipos de turbinas eólicas disponíveis no mercado;
- Conhecer a demanda de pico de energia elétrica de uma residência unifamiliar.

2.1 Estudo do potencial eólico do município de Campos dos Goytacazes

Utilizou-se o Atlas Eólico do Estado do Rio de Janeiro, elaborado por Amarante et al (2002), para auxiliar a escolha do local de estudo. A Figura 1 apresenta as três áreas sugeridas para instalação de projetos eólicos no Estado do Rio de Janeiro, sendo o litoral Norte Fluminense representado na área 1, a região dos lagos na área 2 e a região serrana (polígono Piraí-Vassouras-Petrópolis) na área 3.

FIGURA 1. Áreas potenciais para empreendimentos eólio-elétricos. Fonte: Amarante et al (2002).

Como pode-se observar, na região Norte Fluminense, as maiores velocidades médias de vento são registradas nas áreas costeiras, além disso, estas áreas mais próximas ao mar apresentam baixa rugosidade superficial, devido à formação vegetal de restinga. Portanto, a praia de Farol de São Thomé, localizada no município de Campos dos Goytacazes foi selecionada para o presente estudo.

2.2 Regime de Ventos

Utilizando o *software Google Earth* foi definido o local exato na praia do Farol de São Thomé para realização do estudo, sendo este, no ponto de coordenadas geográficas 22°01'14.5"S

41°00'34.5"W. Em seguida, utilizou-se novamente o Atlas do Potencial Eólico do Rio de Janeiro (2002) para extrair a velocidade média anual do vento no referido ponto, que foi de 6,5 m/s a uma altura de 50 m, como pode ser visto na Figura 2.

FIGURA 2. Potencial eólico do local de estudo a 50m de altura. Fonte: Amarante et al (2002), adaptado pelo autor (2018).

Visto que o estudo em questão tem como objetivo analisar a viabilidade técnica de um aerogerador de pequeno porte, foi realizado o cálculo da camada limite do local escolhido para nortear o valor de velocidade do vento no local que mais se aproxime da realidade.

2.3 Escolha das turbinas

Optou-se por selecionar dois aerogeradores de pequeno porte, distintos entre si principalmente, mas não apenas, pela posição do eixo do rotor. Foram analisadas suas características técnicas e operacionais para balisar as escolhas, sendo as principais: posição do eixo, potência nominal, velocidades do vento para operação e dimensões do conjunto.

O primeiro modelo selecionado foi o aerogerador de eixo horizontal ELV-H6.4, fabricado pela companhia brasileira Eletrovento, que pode ser vislumbrado na Figura 3, juntamente com seus dados técnicos. Selecionou-se este modelo, pois as turbinas de eixo horizontal são as mais eficientes entre os aerogeradores de pequeno porte. É importante pontuar que o ruído é superior neste tipo de microgerador eólico, além do custo e complexidade da instalação serem elevados

pela necessidade de montá-lo sobre um suporte giratório, permitindo que o disco varrido pelas pás esteja sempre perpendicular à direção do vento.

Dados Técnicos	
Modelo	ELV-H6.4
Fabricante	Eletrovento
Eixo	Horizontal
Rotor	-
Potência nominal (kW)	5
Coeficiente de potência (Cp)	0,4
Rendimento do gerador (η)	0,8
Altura da Torre (m)	-
Área varrida pelo rotor (m ²)	-
Diâmetro das pás	6,6m
Velocidade de partida (m/s)	2,5
Velocidade nominal (m/s)	10
Velocidade de corte (m/s)	50

FIGURA 3. Aerogerador de eixo horizontal ELV-H6.4 e seus dados técnicos. Fonte: Eletrovento (2018), (adaptado pelo autor).

O segundo modelo escolhido foi o GS-5kW, aerogerador de eixo vertical do tipo Darrieus fabricado pela empresa Greef, que é representado na Figura 4 juntamente com seus dados técnicos. Este rotor é um dos mais indicados para aplicações urbanas, uma vez que seu funcionamento gera baixo ruído sem significativa redução de eficiência. O custo para aquisição é alto e normalmente necessita de sistema de aceleração inicial, todavia não depende de mecanismos de acompanhamento para variações na direção do vento.

Dados Técnicos	
Modelo	GS-5kW
Fabricante	Greef
Eixo	Vertical
Rotor	Darrieus
Potência nominal (kW)	5
Coeficiente de potência (Cp)	0,35
Rendimento do gerador (η)	0,85
Altura da Torre (m)	8
Área varrida pelo rotor (m ²)	24
Diâmetro das pás	-
Velocidade de partida (m/s)	2,8
Velocidade nominal (m/s)	11
Velocidade de corte (m/s)	50

FIGURA 4. Aerogerador de eixo vertical GS-5kW. Fonte: Made in China (2018), adaptado pelo autor.

2.4 Demanda de pico de energia

Para realização deste estudo, faz-se necessário conhecer a sua demanda de pico de energia. A Tabela 1 apresenta estes dados para uma residência habitada por uma família de 4 pessoas.

TABELA 1. Demanda de pico de energia de uma residência unifamiliar.

DEMANDA DE PICO DE ENERGIA				
Unidade residencial de uma família				
AMBIENTE	ITENS	POTÊNCIA (dia)	POTÊNCIA (noite)	POTÊNCIA (máxima)
Sala	Iluminação	-	40 W	40 W
	TV	200 W	200 W	200 W
	Computador	-	300 W	300 W
Dormitório 1	Iluminação	-	40 W	40 W
	TV	200 W	200 W	200 W
	Ar condicionado	-	1300 W	1300 W
Dormitório 2	Iluminação	-	40 W	40 W
	TV	200 W	200 W	200 W
	Ar condicionado	-	1300 W	1300 W
Cozinha	Iluminação	-	40 W	40 W
	Forno Micro-ondas	750 W	750 W	750 W
	Geladeira	250 W	250 W	250 W
Área de serviço	Iluminação	-	40 W	40 W
	Máq. lav. roupas	1500 W	-	1500 W
	Ferro	1000 W	-	1000 W
Banheiro	Iluminação	-	40 W	40 W
	Secador	1250 W	1250 W	1250 W
	Chuveiro	6000 W	6000 W	6000 W
TOTAL:		11350 W	11990 W	14490 W

Fonte: CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais, adaptado pelo autor (2018).

Os três valores totais de demanda de pico apresentados na Tabela 1 fazem referência às situações distintas de solicitação energética, sendo o primeiro valor, correspondente à demanda mínima de pico, onde apenas os equipamentos de uso diurno estão ligados ao mesmo tempo. No segundo valor, há um acréscimo de equipamentos ligados simultaneamente, por se tratar do período noturno, onde há um pico real de demanda de energia elétrica. A demanda de pico máxima desta residência é apresentada através da terceira potência total, considerando que todos os equipamentos estão ligados ao mesmo tempo, um caso extremo, que deve ser analisado e discutido.

2.5 Dimensionamento dos aerogeradores

2.5.1 Parâmetros do local

O conhecimento de determinadas propriedades do local de implementação é de suma importância, como pressão atmosférica, fator de compressibilidade do ar, massa específica do ar, viscosidade do ar e camada limite. A determinação destes valores requer o conhecimento da altitude e da temperatura média anual de Campos dos Goytacazes.

A altitude foi obtida com auxílio do *software Google Earth*, encontrada nos pontos de coordenadas do local escolhido para este trabalho. O valor da temperatura média anual foi extraído da pagina da web de Registro de Dados Climáticos, site que traz o detalhamento das temperaturas médias mensais das cidades em todo o mundo.

2.5.1.1 Pressão atmosférica

Para encontrar o valor de pressão atmosférica no local de estudo, foi necessário previamente obter o valor da altitude, e então utilizar a Tabela 2, realizando uma interpolação linear.

TABELA 2. Valores da pressão atmosférica em função da altitude.

ALTITUDE E PRESSÃO ATMOSFÉRICA	
Altitude acima do nível do mar (m)	Pressão atmosférica (kPa)
0	101,332
153	99,537
305	93,751
458	95,909
610	94,143
763	92,476

Fonte: Delmée (1982) adaptado pelo autor (2018).

2.5.1.2 Fator de Compressibilidade e Massa Específica do ar

O desvio da conduta dos gases reais em relação a um gás perfeito é encontrado através do fator de compressibilidade. Utilizou-se a pressão atmosférica já obtida acima e a temperatura média anual do local de instalação do aerogerador para efeitos de cálculos. A Tabela 3 foi usada

como base, porém os valores da temperatura e da pressão atmosférica não aparecem em exato, por esta razão realizou-se três interpolações para obtermos o valor correto do fator de compressibilidade do ar.

TABELA 3.Fatores de compressibilidade do ar.

Fator de Compressibilidade do Ar								
Pressão	Temperatura (°C)							
kPa	-50	0	20	50	100	150	200	250
9,806	0,99984	0,99994	0,99996	0,99999	1,00001	1,00002	1,00003	1,00003
39,226	0,99938	0,99977	0,99985	0,99995	1,00004	1,00010	1,00013	1,00014
98,066	0,99845	0,99941	0,99963	0,99987	1,00011	1,00024	1,00031	1,00035
392,266	0,99379	0,99763	0,99852	0,99948	1,00045	1,00099	1,00127	1,00142
980,665	0,98465	0,99430	0,99651	0,99888	1,00125	1,00253	1,00324	1,00362
3922,660	0,94190	0,98037	0,98888	0,99780	1,00659	1,01125	1,01374	1,01502
6864,656	0,90770	0,97210	0,98590	1,00030	1,01430	1,02150	1,02540	1,02720
9806,652	0,88750	0,97050	0,98820	1,00650	1,02420	1,03330	1,03790	1,04000

Fonte: Delmée (1982) adaptado pelo autor (2018).

Com as propriedades calculadas, foi utilizada a Equação 1 (DELMÉE, 1982) para encontrar a massa específica do ar. Para aplicar esta equação foi necessário conhecer os valores das constantes massa molar do ar (Mm) e constante molar dos gases (R).

$$\rho = \frac{Mm(ar).pop}{R.Top.Zop} \quad (1)$$

Onde:

Mm(ar) - Massa molar do ar (kg/mol);

Pop - Pressão atmosférica (Pa);

R - Constante molar dos gases (N.m/mol.K);

Top - Temperatura em Kelvin (K);

Zop - Fator de Compressibilidade do ar.

2.5.1.3 Viscosidade do ar

A viscosidade do ar varia em função da temperatura e foi calculada através da Tabela 4. Visto que na tabela utilizada como base para o cálculo não há o valor exato da temperatura do local, foi realizada uma interpolação linear.

TABELA 4. Alguns valores da viscosidade cinemática.

Fluido à pressão de 1 atm = 1,033kgf/cm ² =101,302 kPa			
	T (°C)	Viscosidade Absoluta 10 ⁶ μ	
		N.s/m ²	kgf.s/m ²
Ar de composição normal	-50	14,4	1,47
	0	16,9	1,72
	15	17,8	1,71
	30	18,5	1,89
	50	19,5	1,99
	100	22,1	2,25
	140	23,7	2,42

Fonte: Delmée (1982) adaptado pelo autor (2018).

2.5.1.4 Camada limite

Sabendo que a camada limite é a região próxima à superfície terrestre onde o vento é perturbado pelo atrito com o solo e os obstáculos, gerando uma redução em sua velocidade e maior turbulência, deve-se garantir a instalação das pás do aerogerador fora deste meio.

Para encontrar a espessura da camada limite, foi realizado o cálculo do número de Reynolds, através da Equação 2 (DELMÉE, 1982), para classificar o regime de escoamento do vento.

$$Re_x = \frac{\rho \cdot v_{\infty} \cdot x}{\mu} \quad (2)$$

Onde:

ρ - Densidade do ar (Kg/m³);

v_{∞} - Velocidade do fluido (m/s);

x - Distância do mar até a turbina – platô (m);

μ - Viscosidade absoluta (N.s/m²).

De acordo com o número de Reynolds encontrado na Equação 2, classifica-se o regime como laminar ou turbulento, utilizando assim, fórmulas específicas para cada um deles no cálculo da espessura da camada limite local.

Nº de Reynolds $\leq 5.10^5$, o regime é considerado laminar, utilizando a Equação 3 (DELMÉE, 1982):

$$\delta(x) = \frac{5x}{\sqrt{Re_x}} \quad (3)$$

Onde:

$\delta(x)$ = Espessura da camada limite local (m);

x = Distância do mar até a turbina – platô (m);

Re_x = Número de Reynolds local.

Nº de Reynolds $\geq 5.10^5$, o regime é considerado turbulento, utilizando a Equação 4 (DELMÉE, 1982):

$$\frac{\delta(x)}{x} = \frac{0,370}{Re_x^{1/5}} \quad (4)$$

Onde:

$\delta(x)$ = Espessura da camada limite local (m);

x = Distância do mar até a turbina – platô (m);

Re_x = Número de Reynolds local.

2.5.2 Parâmetros das turbinas

2.5.2.1 Potência disponível no vento

A potência disponível no vento para cada turbina será calculada aplicando a Equação 5 (PINTO, 2017). Para aplicar esta equação, será necessário conhecer a massa específica do ar, calculada no item 2.5.1.2, a velocidade do vento no local escolhido, retirada do Atlas Eólico do Rio de Janeiro (2002) e a área varrida de cada turbina. Este último valor foi disponibilizado apenas pelo fabricante da turbina GS-5kW conforme a Figura 4. Para o modelo ELV-H6.4, faz-se necessário

calcular tal parâmetro, e por se tratar de uma turbina de eixo horizontal, o cálculo da área varrida pelo rotor é dado pela Equação 6 (PINTO, 2017).

$$P_{disp} = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (5)$$

Onde:

ρ = Massa específica do ar (Kg/m³);

A = Área varrida pelas hélices do rotor (m²);

v = Velocidade do vento (m/s).

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (6)$$

Onde:

π = Pi;

D = Diâmetro das pás do rotor (m).

Na prática, o aerogerador não consegue extrair toda a potência disponível no vento, uma vez que durante o processo de conversão de energias, ocorrem perdas aerodinâmicas, mecânicas e elétricas. Sendo assim, utilizou-se a Equação 7 (PINTO, 2017) para calcular a potência real extraída pelas turbinas. Os valores das variáveis coeficiente de potência e rendimento do gerador são informados pelos fabricantes, conforme Figuras 3 e 4.

$$P_t = P_{disp} \cdot C_p \cdot \eta \quad (7)$$

Onde:

P_{disp} = Potência disponível no vento (W);

C_p = Coeficiente aerodinâmico de potência do rotor;

η = Eficiência do conjunto gerador/transmissão.

3. RESULTADOS

3.1 Parâmetros do local

A pressão atmosférica foi calculada através da interpolação dos dados apresentados na Tabela 2, utilizando o valor da altitude do local de estudo que corresponde a 7 metros. Realizando a

interpolação, o valor obtido para pressão atmosférica foi de 101,249 kPa como mostrado na Tabela 5.

TABELA 5. Cálculo da pressão atmosférica.

Pressão Atmosférica				
Altitude (ft)	psi (a)	kPa	Altitude (m)	
		101,332	0	Tabela
0,00	0,0000	101,249	7	Interpolado
		99,537	153	Tabela
0	0	-1,795	153	Diferença Tabela

Fonte: Delmée (1982) adaptado pelo autor (2018).

Para o cálculo do fator de compressibilidade (Z), os valores apresentados na Tabela 3 foram utilizados para realizar três interpolações. Além da tabela, tomamos como referência a pressão atmosférica encontrada acima ($1,0325 \text{ kgf/cm}^2$) e a temperatura média anual de Campos dos Goytacazes (23,6 °C). Obteve-se para o fator de compressibilidade o valor de 0,999640, conforme a Tabela 6.

TABELA 6. Cálculo para o fator de compressibilidade.

Z	Temp.	1 kgf/cm ² abs
0,99963	20	Tabela
0,999659	23,6	Interpolado
0,99987	50	Tabela
0,00024	30	Diferença Tabela

Z	Temp.	4 kgf/cm ² abs
0,99852	20	Tabela
0,998635	23,6	Interpolado
0,99948	50	Tabela
0,00096	30	Diferença Tabela

Z	Pressão	
0,99966	1	Tabela
0,999648	1,032	Interpolado
0,99864	4	Tabela
-0,0010236	3	Diferença Tabela

Fonte: Delmée (1982) adaptado pelo autor (2018).

Dispondo da temperatura média anual do município estudado em kelvin (296,75 K), da pressão atmosférica, do fator de compressibilidade, e sabendo que para as constantes massa molar dos gases e constante molar dos gases os valores atribuídos são 0,0289644 kg/mol e 8,3143 N.m/mol.K respectivamente, realizou-se o cálculo da massa específica do ar, através da Equação 1, obtendo como resultado $1,2125 \text{ kg/m}^3$, que quando comparado com o valor de massa específica indicado no Atlas Eólico do Rio de Janeiro (2002) para a mesma região, de $1,19 \text{ kg/m}^3$, mostra-se coerente.

$$\rho = \frac{0,0289644 \cdot 101249}{8,3143 \cdot 296,75} \approx 1,2125 \text{ kg / m}^3$$

A viscosidade do ar também foi encontrada através de uma interpolação linear, utilizando o valor da temperatura média anual na localidade de estudo, que corresponde a 23,6 °C. O valor obtido para a viscosidade foi de $17,832 \times 10^{-6} \text{ N.s/m}^2$, como mostrado na Tabela 7.

TABELA 7. Cálculo da viscosidade do ar.

Viscosidade do ar				
		N.s/m ² x 10 ⁶	Temp. (°C)	
		17,800	15	Tabela
0,00	0,0000	17,8320	23,6	Interpolado
		18,5	30	Tabela
0	0	0,700	15	Diferença Tabela

Fonte: Delmée (1982) adaptado pelo autor (2018).

Determinou-se o número de Reynolds utilizando a Equação 2. Aplicou-se à equação os valores calculados da massa específica do ar ($1,2125 \text{ kg/m}^3$) e da viscosidade absoluta do ar ($17,832 \times 10^{-6} \text{ N.s/m}^2$), e os valores obtidos na literatura, sendo estes a velocidade média do vento (6,5 m/s) e o platô (360 m). O platô representa a distância entre o mar e o local de instalação do aerogerador, tendo sido aferido através do *Google Earth*, utilizando como referência as coordenadas definidas para o presente estudo.

$$\text{Re}_x = \frac{1,2125 \cdot 6,5 \cdot 360}{17,83 \times 10^{-6}} = 159107515 = 1,6 \times 10^8$$

Como $1,6 \times 10^8 \geq 5 \times 10^5$, o regime de escoamento do vento é classificado como turbulento, logo a Equação 4 é utilizada para calcular a camada limite, resultando em uma espessura de 3,049 m.

$$\frac{\delta(360)}{360} = \frac{0,370}{159107515^{1/5}} \Rightarrow \delta(360) = 3,049m$$

A turbina ELV-H6.4, possui pás com 3,3 metros de comprimento, distância referente ao centro do cubo até a extremidade da pá, que deve trabalhar fora da região da camada limite. Com a espessura da camada limite calculada e sabendo que o fabricante da turbina não informou a altura da torre de sustentação, conclui-se que a altura mínima da torre para assegurar o perfeito funcionamento da turbina é de aproximadamente 6,5 metros.

O segundo modelo analisado, GS-5kW, conta com pás de 5,2 metros de comprimento. Divergindo do rotor de eixo horizontal, devido a sua configuração característica, o valor de referência a ser mantido acima da espessura da camada limite foi obtido dividindo o comprimento das pás pela metade. Sendo este valor igual a 2,6 metros, a altura da torre de sustentação de 8 metros, dada pelo fabricante, mantém a turbina na região ideal de operação.

3.2 Parâmetros da turbina

A potência disponível no vento foi calculada utilizando a Equação 5 através das variáveis: massa específica, área varrida pelas pás da turbina e velocidade média do vento local.

Para a turbina ELV-H6.4, foi calculada a área varrida pelo rotor através da Equação 6, visto que não foi informada pelo fabricante, obtendo-se o valor de $34,212 m^2$.

$$A = \pi \frac{6,6^2}{4} = 34,212m^2$$

Com a área varrida pelo rotor da turbina encontrada, e aplicando as demais variáveis na Equação 5, encontramos a potência disponível no vento ($P_{disp,1}$) de 5696 W.

$$P_{disp,1} = \frac{1}{2} \cdot 1,2125 \cdot 34,212 \cdot 6,5^3 = 5696W$$

Uma vez que a potência real extraída pela turbina eólica (P_{t1}) deve considerar o coeficiente de potência (C_p) da mesma e o rendimento do gerador (η), ambos informados pelo fabricante, sendo respectivamente 0,4 e 0,8, a Equação 7 foi aplicada e o valor obtido foi 1822,72 W.

$$P_{t1} = 5696 \cdot 0,4 \cdot 0,8 = 1822,72W$$

No caso da turbina GS-5kW, a área varrida pelo rotor foi informada pelo fabricante, sendo esta igual a 24 m^2 . Sendo assim, utilizou-se apenas a Equação 5, e o valor calculado para potência disponível no vento ($P_{disp.2}$) foi de 3995,79 W.

$$P_{disp.2} = \frac{1}{2} \cdot 1,2125 \cdot 24 \cdot 6,5^3 = 3995,79W$$

Da mesma maneira que foi feita para a turbina ELV-H6.4, calculou-se a potência real extraída pelo modelo GS-5kW, assumindo o coeficiente de potência (C_p) de 0,35 e o rendimento do gerador (η) de 0,85, culminando no valor de 1188,75 W.

$$P_{t2} = 3995,79 \cdot 0,85 \cdot 0,35 = 1188,75W$$

As potências calculadas acima para os dois modelos de turbinas, tendo como base os fatores do local de estudo, foram significativamente menores que as potências nominais informadas pelos fabricantes, que é de 5 kW para ambos aerogeradores. Se analisarmos a Equação 5, constatamos que a potência disponível no vento varia com o cubo da velocidade desse vento, ou seja, esta última variável tem grande influência na potência de uma turbina eólica. Uma vez que as velocidades de vento nominais para operação dos modelos ELV.H6.4 e GS-5kW são respectivamente 10 m/s e 11 m/s e que a velocidade média do vento no local é consideravelmente menor, equivalente a 6,5 m/s, concluímos que esta diferença é uma das principais causas para o decréscimo das potências calculadas em relação às potências fornecidas pelos fabricantes.

A diferença entre a potência real calculada para os dois modelos de aerogeradores analisados, sendo maior para o modelo ELV-H6.4, que dispõe de rotor de eixo horizontal, está em consonância com os conceitos teóricos relacionados à geração de energia através de turbinas eólicas e com o fato dos equipamentos de 3 pás e eixo horizontal serem os mais disseminados ao redor do mundo para esta aplicação. Os fatores que corroboram para o aumento da potência de saída são: área varrida pelo rotor, coeficiente de potência e incidência do vento perpendicular as

pás. Analisando as duas turbinas com base nestes parâmetros, a ELV-H6.4 é sempre superior sobre a GS-5kW.

Com base na Tabela 2 e nas potências reais calculadas para os dois modelos de aerogeradores, foi elaborada a Tabela 8, apresentando a quantidade necessária de cada modelo de aerogerador analisado a fim de suprir as três situações de demanda de pico de energia.

TABELA 8. Quantidades de turbinas eólicas.

	QUANTIDADES DE TURBINAS PARA A DEMANDA MÍNIMA	QUANTIDADES DE TURBINAS PARA A DEMANDA REAL	QUANTIDADES DE TURBINAS PARA A DEMANDA MÁXIMA
POTÊNCIA TOTAL	11350 W	11990 W	14490 W
AEROGERADOR DE EIXO HORIZONTAL ELV-H6.4	6,23	6,58	7,95
AEROGERADOR DE EIXO VERTICAL GS-5Kw	9,55	10,09	12,19

Fonte: Autor (2018).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para suprir a demanda mínima de energia, seriam necessárias 7 turbinas de eixo horizontal ELV-H6.4 ou 10 turbinas de eixo vertical GS-5kW, enquanto para o caso de demanda real, se utilizariam 7 turbinas de eixo horizontal ELV-H6.4 ou 11 turbinas de eixo vertical GS-5kW. Já para atender à demanda máxima, que corresponde a situação onde todos os eletrodomésticos estão ligados, seria preciso 8 turbinas de eixo horizontal ELV-H6.4 ou 13 turbinas de eixo vertical GS-5kW.

Analisando tecnicamente, a instalação dessa quantidade de turbinas eólicas é viável contanto que, seja uma grande área, a fim de que esses equipamentos tenham uma distância significativa entre si, permitindo que o vento os atinja com velocidade máxima. O ruído causado por essa volumosa quantidade de turbinas eólicas implicaria um efeito sonoro significativo. Em termos econômicos, é de suma importância destacar que a implantação de abundantes aerogeradores resulta em gastos significativos, e por esta razão o alto investimento necessário ainda é um fator limitante. Vale ressaltar que este trabalho teve como objetivo o dimensionamento dos aerogeradores, e não o levantamento de custos.

REFERÊNCIAS

AMARANTE, O. A. C.; SILVA, F. J. L.; RIOS FILHO, L. G. Atlas eólico do estado do Rio de Janeiro. 1ª ed. Rio de Janeiro: CEPEL, 2002.

CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais. Potência média de aparelhos residenciais e comerciais. Disponível em: <<https://www.cemig.com.br/pt-br/atendimento/Clientes/Documents/POT%C3%80NCIA%20M%C3%89DIA%20DE%20APARELHOS%20RESIDENCIAIS%20E%20COMERCIAIS.pdf>>. Acesso em: 27 de novembro 2018.

CLIMATE-DATA.ORG. Clima Campos dos Goytacazes. Disponível em: <<https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/rio-de-janeiro/campos-dos-goytacazes-4053/>>. Acesso em: 25 de novembro 2018.

DELMEÉ, Gérard Jean. Manual de Medição de Vazão. São Paulo: Edgard blücher, 1982. 476p.

ELETROVENTO. Modelo ELV-H6.4 – 5 kW. Disponível em: <<http://www.eletrovento.com.br/produto/modelo-elv-h6-4-5-kw/10/>>. Acesso em: 18 de novembro 2018.

MADE IN CHINA. Disponível em: <https://pt.made-in-china.com/co_qd-greef/product_5000W-Darrieus-Type-Vertical-Wind-Turbine-with-Controller-and-Inverter_eugsrrysy.html>. Acesso em: 18 de novembro 2018.

PINTO, N. O. Fundamentos da energia eólica. Rio de Janeiro: LTC, 2017.