

## COMPARAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE DOIS PERFIS DE PÁ EM TURBINA EÓLICA DE EIXO VERTICAL PARA USO URBANO

Paulo Roberto Nogueira Bastos  
Fernando Wesley Silva de Oliveira  
Prof. Dr. Paulo Alexandre Rocha

### INTRODUÇÃO

Desde os anos 70, no contexto de crise do petróleo, onde o preço dos combustíveis fósseis sofreu um grande aumento, o Brasil manifestou um maior empenho no desenvolvimento de métodos alternativos de geração de energia; nessa ocasião, as atenções estavam voltadas para os veículos automotores, no entanto, esse cenário deu lugar à preocupação com a geração e o consumo de energia elétrica. Para reverter essa situação, a maioria dos estudos desenvolve diversas manobras para diminuir a demanda, como racionamentos, horário de verão e multas por baixos fatores de potência. Essa demanda está principalmente concentrada sobre as hidrelétricas, que representam cerca de 70% da matriz energética do Brasil.

Os estados litorâneos, que possuem um notório potencial eólico e solar, motivaram mais ainda as pesquisas no âmbito das energias renováveis. O Ceará foi o pioneiro nesse desenvolvimento, apesar de não ser o maior produtor. Nesse estado, cerca de 15% da matriz energética é renovável, mas a previsão da ENEL – distribuidora de energia elétrica do Ceará – é que até o ano de 2050 seja de 50%. Tal aumento foi proposto devido ao surgimento da lei de compensação, proveniente da Resolução Normativa 482 da ANEEL, de 2012, que permite a microgeração residencial sem o cancelamento do convênio com a concessionária, de modo que o usuário pode usufruir de uma geração própria de energia, entregue à companhia, revertida em desconto na fatura mensal. Além disso, o titular da conta pode distribuir o excedente em outros pontos de consumo. Assim, espera-se que a prática seja cada vez mais difundida.

Com ensejo nestas mudanças, surge um cenário bastante promissor para a microgeração residencial, de modo que para que esta prática se torne viável, é necessária a disponibilidade de equipamentos no mercado, com preços e condições acessíveis, bem como linhas de crédito fornecidas pelos bancos, para aumentar a gama de consumidores; e mão de obra qualificada para dimensionamento, projetos, acompanhamento das instalações e manutenção dos sistemas.

O quadro de consumidores finais da matriz energética brasileira é dominado pelo setor industrial, que representa 34%; Os outros principais são os setores de transportes, 28%, e o residencial, 11%, e é sobre este último que trata este trabalho. [2]

São objetivos deste trabalho: elaborar uma sequência de passos a fim de comparar as eficiências de dois perfis aerodinâmicos, o NACA 0012 e o NACA 0018, ambos simétricos, de fácil construção, suficientemente eficientes para a implantação de uma turbina eólica de eixo vertical, tipo de aerogerador que vem se apresentando mais adaptado ao cenário urbano [3], de modo que esta tenha toda sua demanda de energia elétrica suprida; a implementação de códigos para a execução dos cálculos de potência, seu coeficiente, sua velocidade relativa,

suas perdas aerodinâmicas e a impressão de suas respectivas curvas de operação e a curva de consumo coberto pela máquina ao longo do ano, de acordo com dados de vento adquiridos[4][5].

## METODOLOGIA

A metodologia do trabalho pode ser definida em duas etapas: O dimensionamento da unidade de consumo em questão e o projeto do aerogerador baseado na demanda de energia elétrica. Na primeira parte foi aplicado o roteiro de cálculo de potência instalada para uma unidade (residência) hipotética, sugerido pelo UNIDO - Renewable Energy Observatory [6], Centro de pesquisa ligado às Nações Unidas, publicado em 2011.

Na segunda etapa foi feita a concepção do aerogerador, levando-se em conta as primícias de projeto e as condições de contorno selecionadas. Aqui divide-se em alguns subtópicos, como a concepções Aerodinâmicas: metodologia de projeto direto de Manwell.

## DESENVOLVIMENTO

As principais fontes de dados de velocidade e direção do vento foram os programas *Prediction of Worldwide Energy Resource (POWER)*[7] - Um banco de dados fornecido livremente pela NASA, e o software *RETScreen Suit*, produzido pelo governo canadense na sua quarta versão [4]. O programa observa as coordenadas próximas ao aeroporto Pinto Martins, situado em Fortaleza, Ceará, de onde são emitidos dados continuamente.

Os dados de  $C_l$  e  $C_d$  dos perfis foi estimado numericamente a partir do quadro de velocidades obtido e dos modelos matemáticos de Lonzaforme (2011) e Messina (2011).

Foram simulados perdas aerodinâmicos pelo uso de ferramentas computacionais, tendo como valores de entrada os ângulos de ataque desejados.

As simulações foram realizadas em dois softwares, o XFOIL e o XFLR5 ambos livres.

O primeiro não respondeu bem, pois não convergiu para ângulo de ataque maior que 15 graus. O segundo gerou curvas de  $C_L$  e  $C_D$  que foram empregados nas equações propostas pelas metodologias citadas por algoritmo escrito no ambiente *SciLab*, pois carecem de métodos iterativos para solução.

Com isso foi possível encontrar valores de sustentação e arrasto necessários para calcular os esforços no rotor e, por conseguinte, torque e potência gerada.

Tratando-se de rotores verticais, há algumas modificações no equacionamento da teoria do BEM: Primeiramente o ângulo de escoamento é formado pela perpendicular à corda do elemento de pá em relação à direção da corrente de vento em análise, portanto, obtêm-se se outra expressão de velocidade relativa e, por analogia, um novo ângulo de ataque.

A potência total perdida em vista do torque promovido pelo arrasto é calculada pela integração da equação descrita em relação à distância da torre até a pá. Neste caso, o valor da espessura da estrutura varia com a distância. No entanto, à priori, para simplificar o projeto, esse parâmetro será considerado constante e, portanto, sairá da integral, fazendo da equação uma integral simples definida, como mostrado. Com essa consideração, tem-se que o coeficiente de arrasto, dado um campo de escoamento irrotacional, ou seja, sem variação ao longo do perfil é constante também [9] [10].

Deduzindo a potência roubada pela haste da potência produzida, foi encontrado um valor nominal de capacidade para o gerador e analisar a aplicação na unidade de consumo em questão.

Assim pôde-se obter a curva de operação do gerador.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Utilizando as equações propostas, foram calculadas as probabilidades acumuladas de velocidade de vento, que pode ser convertida em termos de potência disponível, descrita também por modelo estatístico. Esses dados acumulados foram imputados nos modelos analíticos de potência por meio de métodos numéricos. Esse procedimento começou com a determinação de parâmetros de projeto descrita pelas equações mencionadas a partir das condições preestabelecidas.

Para calcular os coeficientes de sustentação e arrasto foram usados dois programas. Foram apresentados valores que, comparados com as literaturas de referência, foram coerentes. Imprimiu-se as respectivas curvas de desempenho em função do ângulo de ataque e seus respectivos valores.

Levando-se em conta a densidade de probabilidade dos dados de vento, calculou-se um valor nominal de potência e CP para os geradores baseados nos dois perfis. Os resultados foram:

NACA 0012:  $P = 44,47 \text{ kW}$   $C_p = 0,38631$

NACA 0018:  $P = 36,5 \text{ kW}$   $C_p = 0,31558$

Ainda sobre a potência gerada em vista dos dados estatísticos de vento, avaliou-se a produção de energia comparada ao consumo estimado de uma residência com 4 pessoas.

Os resultados apontam para a hipótese e de cobertura total ao longo do ano. Mesmo com tais devidas correções na potência nominal alcançada, a solução parece ser viável e merecedora de desenvolvimento.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foi possível elaborar uma metodologia computacional para comparar a eficiência de diferentes perfis de pá para um aerogerador de pequeno porte e de eixo vertical, a partir de uma sequência de passos bem definidos. Com essa análise pôde -se atestar que, dadas as considerações construtivas e os dados de vento dispostos, o sistema produz energia 40% superior à demanda de uma unidade habitacional para um núcleo familiar de 4 pessoas.

Conseguiu-se simular as respostas aerodinâmicas dos dois perfis propostos e comparar seus parâmetros, a partir das condições de vento coletadas no banco de dados do RETScreen. O perfil NACA 0012 apresentou um  $C_p$  20% maior que o NACA 0018. Foi observado que um dos softwares, o XFOIL, não é indicado para simulações com eixo vertical pois não converge com ângulos de ataque superiores a 15 graus. Foi possível criar um algoritmo em base livre para o cálculo de potência gerada e suas respectivas curvas de operação, a partir dos dados obtidos nas simulações. Esses algoritmos podem ser utilizados posteriormente como ferramentas de projeto para aerogeradores de eixo vertical.

**Palavras-chave:** Energia eólica, Geração Distribuída, Aerogerador, VAWT, NACA, XRL5, XFOIL, Aerodinâmica.

## REFERÊNCIAS

- [1] B. d. I. d. G. ANEEL, Agência nacional de energia elétrica, Brasília. Decreto (5143).
- [2] J. Twidell, T. Weir, Renewable energy resources, Routledge, 2015.
- [3] A.-S. Yang, Estimation of wind power generation in dense urban area. (China) [On the urban wind power], Applied Energy.
- [4] Software para acesso ao banco de dados meteorológicos.
- [5] R. dos Santos Custódio, Energia elétrica para produção de energia elétrica, Eletrobras, 2009.
- [6] Renewable energy observatory.
- [7] [wind-power-program.com/betz](http://wind-power-program.com/betz).
- [8] J. F. Manwell, J. G. McGowan, A. L. Rogers, Wind energy explained: theory, design and application, John Wiley & Sons, 2010.
- [9] E. Hau, H. Von Renouard, The wind resource, Springer, 2006.
- [10] A. Rezaeiha, Effect of the shaft on the aerodynamic performance of urban vertical axis wind turbines.