

EQUAÇÕES MATEMÁTICAS E CONCEITOS FÍSICOS APLICADOS A UMA TURBINA EÓLICA VERTICAL DE PEQUENO PORTE

MATHEMATICAL EQUATIONS AND PHYSICAL CONCEPTS APPLIED TO A SMALL VERTICAL WIND TURBINE

Josué Marcos de Moura Cardoso, josue.mmc@puccamp.edu.br
Denise Helena Lombardo Ferreira, lombardo@puc-campinas.edu.br
PUC-Campinas, Campinas, São Paulo

Submetido em 13/01/2015

Revisado em 02/04/2015

Aprovado em 08/09/2015

Resumo: Este artigo tem como objetivo apresentar algumas equações matemáticas e conceitos físicos aplicados a uma turbina eólica vertical de pequeno porte. A partir dos dados contidos no Instituto Nacional de Meteorologia, como velocidade do vento e densidade do ar, foi possível avaliar se a implementação de uma turbina eólica do tipo Savonius é uma opção viável em algumas cidades dispostas em diferentes regiões do Brasil. As cidades consideradas neste estudo foram Florianópolis, Natal, Goiânia, Manaus e Sorocaba. Com os dados em mãos, equações matemáticas e conceitos físicos esclarecidos, e por meio da ferramenta *Microsoft Excel* foram obtidas as potências elétricas e os gráficos correspondentes a cada uma das cidades. A escolha das cidades foi feita de forma aleatória para retratar a grandiosidade e a diversidade do Brasil. Os resultados demonstram que as cidades que não pertencem a costa litorânea não apresentam ser uma opção viável para a instalação de turbinas verticais do tipo Savonius, já as cidades da costa litorânea, sobretudo aquelas pertencentes à região nordeste do Brasil mostram ser interessantes para a implementação da turbina Savonius.

Palavras chave: Turbina eólica. Equações matemáticas. Energia renovável.

Abstract: The aim of this article is to present some mathematical equations and physical concepts applied to a small vertical wind turbine. From the data contained in National Institute of Meteorology as wind speed and air density, it was possible to assess whether the implementation of a Savonius type wind turbine is a viable option in some cities located in different regions of Brazil. The cities considered in this study were Florianópolis, Natal, Goiânia, Manaus and Sorocaba. With data available, mathematical equations and physical concepts clarified, and through the Microsoft Excel tool, the electrical powers and graphics

related to each of the cities were obtained. Picking the cities was made at random to portray the greatness and diversity of Brazil. The results show that cities that do not belong to coastline are not a viable option for the installation of vertical Savonius type turbines, whereas the coastline cities, especially those belonging to the northeast of Brazil, have proven to be interesting for the implementation of the Savonius type turbine.

Keywords: Wind turbine. Mathematical equations. Renewable energy.

Introdução

Um dos assuntos mais recorrentes em todo o mundo atualmente é a preocupação com as fontes de energia renováveis. O previsível esgotamento das jazidas de petróleo aliado à alta dos preços dos combustíveis fósseis, e os grandes períodos de estiagem, consequências do aquecimento global, propiciam uma busca constante por novas fontes alternativas de energia (LEITE, 2013).

JACOBI (2007) assinala que o quadro social, político, econômico e ambiental que caracteriza as sociedades contemporâneas revela que os impactos dos humanos sobre o meio ambiente estão se tornando cada vez mais complexos.

Em um mundo contemporâneo que traz uma crescente demanda por energia elétrica é de vital importância avaliar alternativas quanto à produção de energia elétrica com o menor impacto ambiental possível, ou seja, alternativas sustentavelmente renováveis. Dentre as várias fontes sustentáveis de geração de energia pode-se citar a energia produzida por painéis solares (a energia solar); aquelas provindas de aerogeradores (a energia eólica); e, ainda a energia proveniente de quedas d'água, as hidrelétricas (a energia hidráulica). Todas essas fontes mostram-se como ótimos recursos, visto que geram eletricidade sem agredir o meio ambiente, e dessa forma ocasionam constantes debates entre ambientalistas e estudiosos.

Atualmente é muito discutida a funcionalidade ecológica das usinas hidrelétricas, tendo em vista o impacto causado aos ecossistemas naturais, devido ao alagamento de grandes áreas para criar reservatórios para formação de quedas d'água que por fim produzem energia elétrica. Mesmo com todas as questões ecológicas e sustentáveis em debate essa é a fonte de geração de eletricidade mais produtiva, pois consegue abastecer grandes centros urbanos com energia barata e considerada limpa (LEITE, 2013).

A energia solar obtida por meio de painéis solares é considerada a fonte de geração de energia mais limpa, pois não emite nenhum gás nocivo ao efeito estufa e os painéis podem ser construídos utilizando materiais reciclados.

A energia eólica é baseada no aproveitamento do vento. A energia cinética gerada pelo movimento da massa de ar é convertida em energia mecânica, que gira as pás das turbinas eólicas, e finalmente converte em energia elétrica.

A participação da energia eólica na geração de energia elétrica no Brasil ainda é tímida se comparada com alguns países europeus e a China. Provavelmente, isso ainda ocorra devido ao custo dos equipamentos e eficiências, quando comparados à geração da energia elétrica proveniente de usinas nucleares, queda d'água ou carvão. Entretanto, pode-se dizer que os recentes desenvolvimentos tecnológicos (sistemas avançados de transmissão, melhor aerodinâmica e estratégias de controle e operação dos aerogeradores), vêm modificando esse cenário, reduzindo os custos e melhorando o desempenho e a confiabilidade dos equipamentos (PEREIRA, 2004). Além disso, a energia eólica não libera gases nocivos do efeito estufa, como o CO₂ e óxidos de nitrogênio na atmosfera, como faz o carvão e pode levar a eletricidade para áreas de difícil acesso e de elevado custo na transmissão elétrica.

O presente artigo traz algumas análises interpretativas a respeito de uma turbina eólica de pequeno porte, sua funcionalidade e especificidades, destacando algumas equações matemáticas utilizadas no estudo do potencial eólico de cinco cidades do território brasileiro.

A energia eólica e sua utilização

A atmosfera da Terra apresenta-se como uma enorme máquina térmica. Os raios solares, incidentes com mais força na linha do Equador do que nos pólos extremos aquece o ar tropical que se eleva cedendo lugar para o ar polar mais frio que se movimenta e acaba ocupando o espaço onde havia o ar aquecido. Devido ao movimento de rotação da Terra, enquanto um lado do planeta é aquecido pelo Sol o outro lado se resfria, pois, perde o calor para o espaço. Contudo, este ciclo não ocorre de forma regular e distribuída na superfície terrestre. Por exemplo, um oceano se aquece mais lentamente que as terras envoltas porque a água tem uma capacidade maior de reter calor. Como consequência existe um enorme sistema de aquecimento/resfriamento sobre a superfície terrestre. Deste sistema surgem inúmeras massas de ar com características diferentes: secas ou úmidas, oceânicas ou terrestres, quentes ou frias. Da colisão entre duas massas de ar com características diferentes originam-se os ventos.

Historicamente, o vento tem sido um recurso natural muito utilizado pelo homem. Na Idade Média e no Renascimento, ocorrido na Europa, chegando até a Revolução Industrial é possível encontrar aplicações simples, porém eficazes deste recurso. Como por exemplo, as caravelas usadas em expedições, os moinhos de vento que eram usados na moagem de grãos para a produção de farinhas e ração animal e também para a extração de água em poços fazendo às vezes de uma bomba hidráulica.

Com os avanços propiciados pela ciência, o aproveitamento eólico tem sido usado em larga escala principalmente para a geração de energia elétrica. Foi por volta do século XIX que apareceram as primeiras tentativas para transformar a força do vento em geração de eletricidade. Contudo, apenas com a crise mundial do petróleo por volta da década de 1970 é que estudos mais aprofundados possibilitaram a viabilização de desenvolvimento e aplicação prática de turbinas eólicas geradoras de energia elétrica. Assim, com os avanços da aerodinâmica e da eletrônica foi possível o aparecimento de aerogeradores mais eficientes e com consequente custo por kW (quilowatt) comparável ao utilizado pela hidrelétrica.

Tendo em vista que o custo associado à produção de eletricidade é elevado, avaliar fontes alternativas e renováveis para a geração de energia é de substancial importância quando se visa a questão da sustentabilidade. O alto custo da produção de energia aliado com as vantagens da energia eólica, como uma fonte de energia renovável e amplamente disponível, tem levado vários países a estabelecer incentivos, regulamentando e dirigindo investimentos financeiros para estimular a geração de energia eólica.

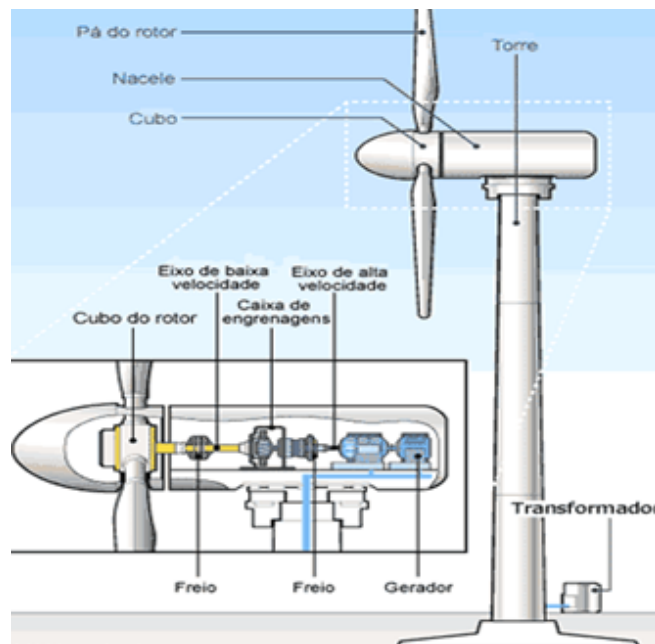
Os aerogeradores

As turbinas eólicas podem ser classificadas em duas categorias de acordo com a direção de seu eixo de rotação: Turbina Eólica de Eixo Vertical (TEEV) e Turbina Eólica de Eixo Horizontal (TEEH). Porém, ambos os tipos possuem os mesmos componentes como rotor; torre de sustentação; controles eletrônicos de frequência (que trabalham para garantir a geração de energia elétrica de acordo com a velocidade do vento); controle de acionamento e interrupção da turbina; conversor de energia mecânica em energia elétrica.

Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal (TEEH)

As TEEHs, como o próprio nome diz, são dispostas no solo de forma horizontal. Elas são as mais potentes e eficazes para produzir eletricidade. O estudo com a finalidade de prever o comportamento aerodinâmico dos geradores horizontais é mais simples, o que tem levado a coleta de resultados mais eficientes e satisfatórios para estes modelos de turbinas. Em geral, estas turbinas possuem uma torre extensa, o que possibilita a coleta dos ventos a uma altura muito acima do solo, permitindo coletar ventos mais constantes e mais intensos, e como consequência há maior geração de energia elétrica. A Figura 1 mostra a configuração de uma TEEH (UOL, 2006).

Figura 1. Modelo de uma turbina eólica horizontal.



Fonte: UOL, 2006.

Turbinas Eólicas de Eixo Vertical (TEEV)

As TEEVs têm seu eixo de rotação orientado na mesma direção da torre que suporta a estrutura do rotor, ou seja, numa direção que é perpendicular à direção do movimento do vento. Uma característica muito vantajosa desse tipo de turbina é o fato dela não depender da direção do vento. Outro ponto favorável é a própria configuração vertical do eixo, alguns modelos de turbinas são construídos próximos ao nível do solo, o que requer uma estrutura de

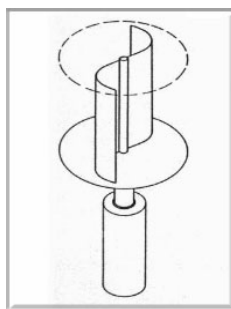
sustentação mais simples, logo não encarece o custo do equipamento usado. Entretanto, a eficiência desse tipo de turbina é baixa, pois em cada rotação (giro) uma das pás atravessa o escoamento na direção contrária ao sentido do escoamento ao qual foi projetado, o que acarreta fraca potência desenvolvida por unidade de área de coleta do vento.

Entre as várias características positivas a respeito das turbinas eólicas verticais pode-se citar:

- Em geral, se a turbina apresenta grandes dimensões, a caixa de velocidades e o gerador elétrico podem ser instalados próximos à base da torre, o que facilita a manutenção desses equipamentos;
- As TEEVs podem ser agrupadas próximas umas das outras;
- O funcionamento das TEEVs é bastante silencioso, sendo este o principal fator quando comparadas com as TEEHs;
- A estrutura do rotor de uma TEEV é, normalmente, menos complexa se comparada com a estrutura do rotor de uma TEEH, isto facilita a construção e manutenção da turbina e reduz os esforços estruturais na torre.

A turbina eólica tipo Savonius, considerada uma turbina de pequeno porte, muito acessível para construção e implementação, em uma de suas configurações é mostrada na Figura 2 (REUK, 2006).

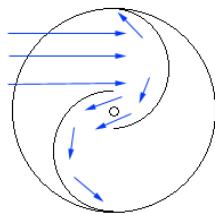
Figura 2. Exemplo de uma turbina eólica do tipo Savonius.



Fonte: REUK, 2006.

O rotor da turbina Savonius consiste em dois semicilindros, um côncavo e outro convexo, colocados na vertical, com uma pequena sobreposição no centro, como apresentado na Figura 3.

Figura 3. Comportamento do vento das pás de uma Turbina Savonius.



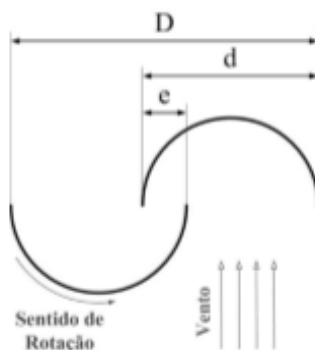
Fonte: UWM, 2014.

O desenho do rotor é relativamente simples, e consequentemente a construção deste tipo de turbina é mais econômica. Todavia, a turbina Savonius apresenta baixo rendimento o que a torna pouco atrativa para a produção de eletricidade.

A Turbina Eólica tipo Savonius

A turbina Savonius recebe esse nome em homenagem ao seu inventor e pesquisador, o finlandês S. J. Savonius, por volta do ano de 1925. É classificada como uma turbina eólica de eixo vertical (TEEV) e na maior parte das vezes se apresenta em pequeno porte. O rotor consiste em dois semicírculos, um côncavo e outro convexo, colocados na vertical, com uma pequena sobreposição no centro, como apresentado na Figura 4 (ÔLO, 2012).

Figura 4. Projeto de uma Turbina Savonius com Utilização de Componentes em Fim-de-Vida.



Fonte: Ôlo, 2012.

O funcionamento dessa turbina resulta das diferenças da força de arrasto entre as faces côncavas e convexas dos semicírculos, que originam em um momento de força, que por fim faz girar o rotor, daí a potência é extraída pela turbina.

O que torna as turbinas eólicas vantajosas para a geração de energia elétrica?

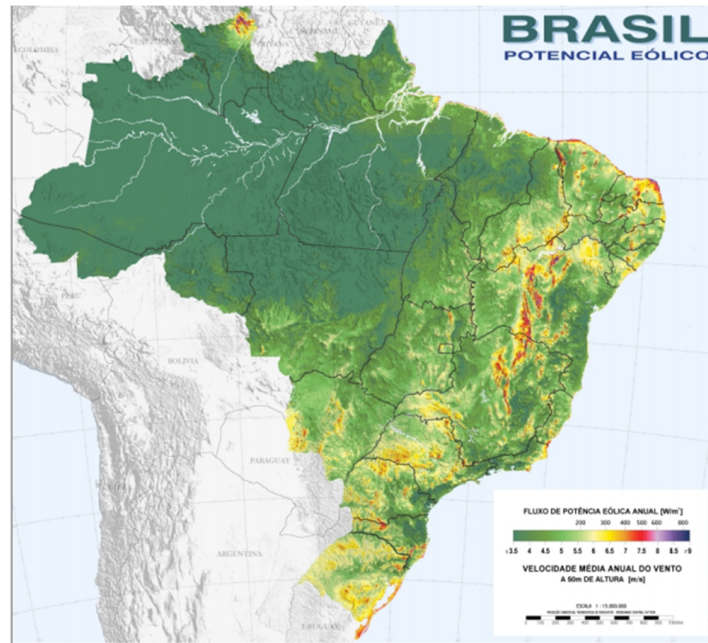
Diante das alterações observadas no meio ambiente é necessário cada vez mais alertar as pessoas a respeito do uso racional de energia e ao mesmo tempo pensar na criação e/ou aprimoramento das fontes de energia alternativas para suprir a demanda da população.

Ao analisar a energia eólica, como possível fonte de energia, é perceptível como esta fonte é vantajosa quando comparada a outras fontes de geração de energia. Tais vantagens incluem a fácil manutenção, facilidade de construção e implementação, a matéria prima para o funcionamento é uma fonte inesgotável e renovável (o vento). O impacto ambiental causado pelas turbinas eólicas é quase nulo, e como consequência esta fonte se mostra uma ótima opção.

No Brasil há uma característica muito positiva para a implantação de turbinas eólicas, já que o país possui uma imensa costa litorânea. A Figura 5 permite abstrair algumas noções a respeito da distribuição dos ventos no território brasileiro. Pode-se observar que regiões litorâneas apresentam melhor potencial eólico ao longo do ano.

Para verificar a característica do potencial eólico brasileiro foi realizado um estudo com os dados contidos no site Banco de Dados Meteorológicos para o Ensino e Pesquisa - BDMEP (BDMEP, 2014) referentes aos anos de 2003 a 2013. Foram coletadas informações sobre o comportamento do vento em algumas cidades, levando em conta os dados relativos a densidade do ar e velocidade do vento. Com estes dados é possível obter análises sobre a qualidade do vento apresentada em cada cidade abordada, possibilitando prever a sua respectiva potência energética.

Figura 5. Atlas eólico brasileiro.



Fonte: Brasil, 2014.

Equações matemáticas e conceitos físicos relacionados à Turbina Eólica Savonius

A energia eólica é basicamente a energia cinética contida no movimento de uma massa de ar. A potência é igual ao trabalho dividido pela variação de tempo, dado pela Equação (1).

$$P = \frac{W}{\Delta t} \quad (1)$$

O trabalho realizado pela massa de ar, o vento, por estar em movimento é a energia cinética, resultando a Equação (2).

$$W = E_c = \frac{mv^2}{2} \quad (2)$$

Assim, substituindo a Equação (2) na Equação (1), associando potência ao trabalho, o resultado será a Equação (3).

$$P = E_c = \frac{mv^2}{2} \frac{1}{\Delta t} \quad (3)$$

A partir da Equação (3) obtém-se a equação associada a potência de uma turbina eólica, representada pela Equação (4).

$$P = \frac{mv^2}{2\Delta t} \quad (4)$$

Nas Equações (3) e (4) é possível observar uma razão entre a massa do ar com a variação do tempo. Essa razão pode ser expressa pelo símbolo \dot{m} que é a vazão da massa de ar, como resultado obtém-se a Equação (5).

$$P = \frac{mv^2}{2\Delta t} = \frac{m}{\Delta t} \frac{v^2}{2} = \frac{\dot{m} v^2}{2} \quad (5)$$

O termo \dot{m} (kg) é o fluxo de massa de ar que passa perpendicularmente por uma seção transversal de área S . Este fluxo é descrito pela Equação (6). A Figura 6 ilustra a vazão do vento ao passar por uma turbina e ajuda a compreender como o vento se comporta ao passar por um rotor, o modelo de tubo apresentado foi feito por Betz (MELO, 2012).

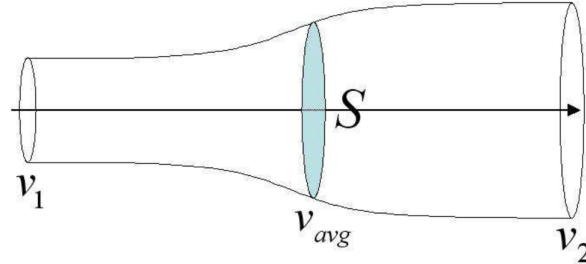
$$\dot{m} = Q = \rho v S \quad (6)$$

Onde ρ é a densidade do ar (kg/m^3), v a velocidade do vento (m/s) e S a área do rotor da turbina perpendicular à direção do vento (m^2).

A geração de energia elétrica no gerador está diretamente relacionada à transformação da energia cinética contida nos ventos, logo, a potência máxima que pode ser extraída do vento é aquela na qual a velocidade de saída do rotor é nula. Todavia, caso isto ocorra, haverá um acúmulo de ar na saída do rotor, o que irá interromper o fluxo de ar e, conseqüentemente, a geração de energia elétrica. Entretanto, Betz provou fisicamente que para alcançar a máxima potência teórica possível, é necessário que a velocidade na saída do rotor seja exatamente igual a um terço ($1/3$) da velocidade na entrada do rotor, ou seja,

dois terços ($2/3$) da energia cinética contida na massa de ar que atravessa este rotor seria “capturada” e convertida em energia elétrica (MELO, 2012).

Figura 6. Tubo de Betz.



Fonte: Melo, 2012.

Pela Figura (6) v_1 é a velocidade do vento na entrada do rotor (m/s); v_{avg} é a velocidade ao passar pelo rotor; e v_2 é a velocidade do vento na saída do rotor (m/s).

Feito essa análise substituindo a Equação (6) na Equação (5), conclui-se que a potência contida no vento que atravessa a seção transversal de área S é dada pela Equação (7).

$$P = \frac{\rho v S v^2}{2} = \frac{\rho v^3 S}{2} \quad (7)$$

A Equação (7) apresenta o cálculo da potência de uma turbina eólica, onde P é a potência elétrica (W); v é a velocidade (m/s); $\rho = 1,29$ (kg/m³) (aproximadamente). Vale ressaltar que o valor da densidade do ar sofre variações de acordo com a localização da cidade e diminui com o aumento da altitude.

A energia recuperável do vento está associada à energia cinética ao atravessar o rotor da turbina. A Equação (7) mostra que a potência contida no vento varia com o cubo da velocidade do vento, com a massa específica do ar e com a área S , varrida pelas pás da turbina usada para o ensaio, e cortada por este fluxo de massa de ar (vento). Dessa forma, a energia gerada pelas turbinas é muito sensível à velocidade do vento que passa pelas pás do aerogerador (v^3). Há ainda uma alta sensibilidade com relação ao diâmetro do rotor, como mostrado na Equação (8).

$$A = \frac{\pi}{4} D^2 \quad (8)$$

Onde, A é a área da seção transversal cortada pelo fluxo de ar (m^2) proposto pelo modelo de Betz em sua teoria; π é a constante 3,14... e D o diâmetro do rotor.

Outro parâmetro muito importante na análise da turbina eólica é o Coeficiente de Potência (C_P), denominada medida de eficiência para uma turbina eólica. Para o físico Albert Betz, responsável por investigar o funcionamento e a potência de um rotor ideal, baseando-se na quantidade de movimento axial, existe um limite para o aproveitamento eólico em turbinas. Os melhores registros teóricos de aproveitamento eólico chegam a 59% (referente ao valor de $C_P=0,59$) (ÔLO, 2012). Este valor sugere que um rotor ideal seja feito para funcionar de tal forma que a velocidade do vento no rotor é de $2/3$ da velocidade do vento, considerada em seu livre percurso, onde $8/9$ da energia cinética contida neste fluxo de ar é perdida. Dentre os efeitos que causam uma diminuição do coeficiente de potência pode-se apontar a rotação das pás a jusante do rotor, o número de pás associado à perda na ponta das mesmas, e forças de resistência aerodinâmica. A Figura 6 ilustra o tubo proposto pelo físico para analisar o comportamento do vento ao passar pelo rotor.

O coeficiente de potência mede a energia que pode ser produzida em uma turbina desprezando-se qualquer perda, em relação à energia total contida no vento que a atravessa. Para turbinas eólicas de eixo vertical, o coeficiente aerodinâmico C_P está relacionado com a potência extraída do vento pela turbina P_E com a potência contida no vento P_V , obtendo a Equação (9).

$$C_P = \frac{P_V}{P_E} \quad (9)$$

A energia cinética contida no vento não pode ser inteiramente capturada pela turbina, uma vez que o ar que passa pelo rotor da turbina tem que ser extravasado. Como consequência, o C_P é adicionado ao cálculo da potência. A Equação (10) mostra que o C_P é um parâmetro relevante para a análise do potencial elétrico de uma turbina Savonius.

$$P_E = C_P \frac{1}{2} \rho S v^3 \quad (10)$$

Onde, P_E é a potência extraída do aerogerador; ρ é a densidade do ar; S é a área do rotor perpendicular à direção do vento; v é a velocidade do vento aplicada e C_P o coeficiente de potência.

A análise das turbinas eólicas do tipo Savonius é complexa porque envolve a análise da aerodinâmica e da mecânica dos fluídos. A energia contida no vento é basicamente sua energia cinética, uma vez que não há variação de pressão nem variação de altitude, conforme a Equação (2).

Estudo de caso: viabilidade do potencial eólico de algumas cidades brasileiras

Para as análises associadas à potência eólica da turbina Savonius foram consideradas cinco cidades brasileiras: Florianópolis (SC), Goiânia (GO), Manaus (AM), Natal (RN) e Sorocaba (SP).

Nos cálculos associados à potência da turbina foram levantados os seguintes valores:

- Coeficiente de potência: (C_P) igual a 0,22 (ÔLO, 2012);
- Densidade do ar: (ρ) (kg/m^3); variável de acordo com cada cidade (Tabela 1);
- Velocidade: v (m/s) variável de acordo com cada cidade (BDMEP, 2014);
- Área do rotor: (S) igual a 0,8 (m^2).

Recorrendo à Equação (10) e com a ajuda do programa *Microsoft Office Excel* algumas constatações podem ser feitas assim como gráficos que ilustram o potencial de geração de eletricidade associado a cada cidade.

Para as cidades desse estudo considerou-se a área do rotor igual a 0,8 m^2 , visto que esta é uma área comum para as turbinas eólicas deste modelo. O principal dado a ser usado nestas análises é a velocidade média do vento. Quanto maior a velocidade do vento, maior será o potencial eólico associado.

Embora outros fatores também influenciem na velocidade tais como altitude, clima, eles não foram considerados.

A densidade do ar (ρ) varia de acordo com a localização das cidades. A Tabela 1 apresenta a densidade do ar para as cidades consideradas neste estudo (BDMEP, 2014).

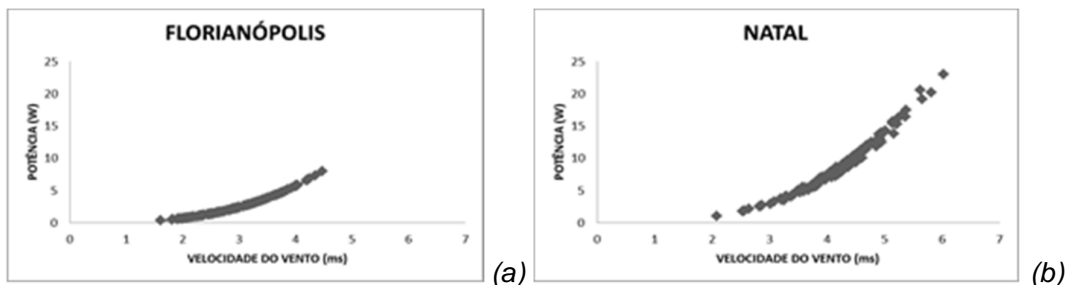
Tabela 1. Densidade do ar para as cidades do estudo.

Cidade	Densidade do ar
Florianópolis	1,013
Natal	1,264
Manaus	1,343
Sorocaba	1,047
Goiânia	1,272

Fonte: BDMEP, 2014.

A Figura 7 retrata o comportamento da potência associada a uma turbina Savonius em duas cidades litorâneas. A Figura 7(a) mostra a curva de eficiência da potência de uma cidade da região sul (Florianópolis), enquanto a Figura 7(b) apresenta o comportamento de uma cidade da região nordeste do Brasil (Natal). Para a cidade de Florianópolis é possível observar que a velocidade do vento chega a 5m/s com a potência elétrica associada de 9W. Para a cidade de Natal, pertencente à região nordeste, principal região brasileira que faz uso dos parques eólicos como opção para geração de energia, a potência elétrica chega a 20W, pois a velocidade do vento nesta cidade alcança 7m/s, como observado na Figura 7(b).

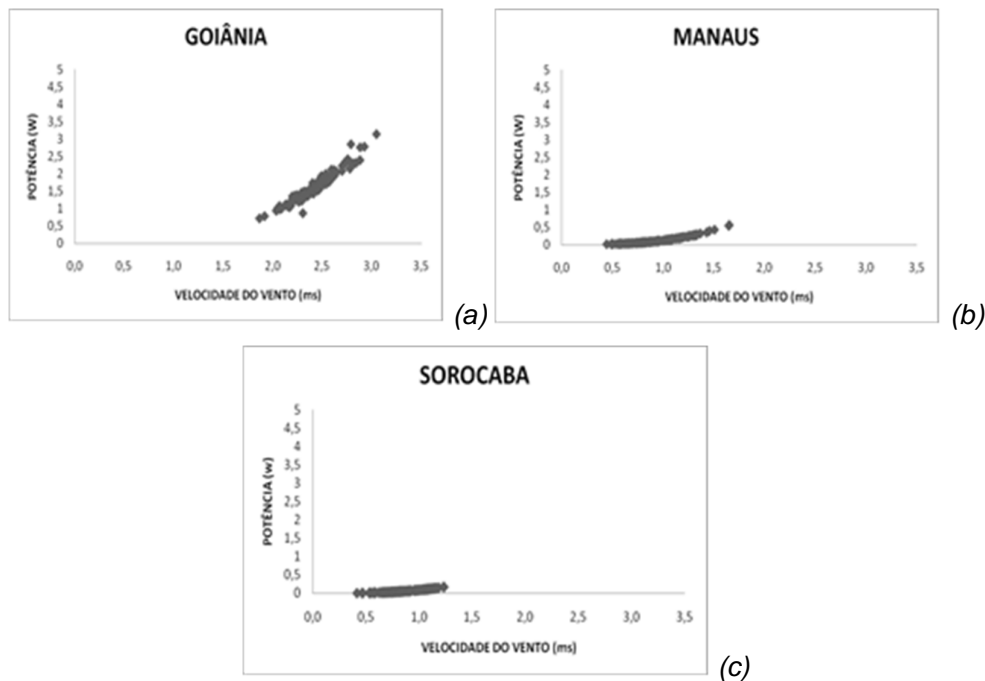
Figura 7. Curva de eficiência (ou potência) em função da velocidade do vento para as cidades de (a) Florianópolis e (b) Natal.



A Figura 8 apresenta o comportamento da potência associada a uma turbina Savonius em três cidades brasileiras: Figura 8(a) cidade de Goiânia, na

região centro-oeste brasileiro; Figura 8(b) cidade de Manaus, na região norte do Brasil e Figura 8(c) cidade de Sorocaba, região sudeste do Brasil. A cidade de Goiânia apresenta clima quente e seco ao longo do ano, com chuvas isoladas em determinados períodos. Por não sofrer muita influência das massas de ar, a velocidade média do vento não ultrapassa a escala de 3,5 m/s, com a potência elétrica associada de 3,5W (Figura 8(a)). As regiões situadas mais ao norte do Brasil são caracterizadas por serem quentes e abafadas durante o dia e com pancadas de chuvas concentradas no fim do dia. Os registros para velocidade do vento para Manaus, capital do estado do Amazonas, não são expressivos, chegando ao máximo 2m/s, com potência elétrica associada de 0,6W, como observado no gráfico da Figura 8(b). A cidade de Sorocaba, no interior do estado de São Paulo, está situada a aproximadamente 640 metros acima do nível do mar, o gráfico da Figura 8(c) mostra que a velocidade do vento nesta cidade não ultrapassa 1,5m/s, e, como consequência a potência absorvida por uma turbina Savonius nesta cidade alcança no máximo 0,2W.

Figura 8. Curva de eficiência (ou potência) em função da velocidade do vento para as cidades de (a) Goiânia; (b) Manaus e (c) Sorocaba.



A escolha das cidades foi feita de forma aleatória com a finalidade de retratar a grandiosidade e a diversidade do Brasil. As cidades consideradas neste estudo que pertencem à costa litorânea, principalmente aquelas localizadas na região nordeste do Brasil demonstram ser interessantes para a implementação da turbina Savonius, como é possível visualizar pelos resultados obtidos das potências elétricas para essas cidades na Figura 7. Contudo, as cidades que não pertencem à costa litorânea não mostram ser uma opção viável para a instalação desse modelo de turbina (Figura 8).

Considerações Finais

A energia eólica é uma fonte inesgotável, limpa e alternativa para a geração de energia elétrica. Por mais que o potencial eólico do Brasil seja favorável para a utilização desta fonte, essa temática ainda é pouco explorada. No entanto, este cenário tem sido revertido gradativamente em algumas cidades, como é possível observar na reportagem “Novo relógio reduz conta de luz” (ESTADÃO, 2010).

A maneira como a energia eólica é transformada em energia mecânica e por fim em energia elétrica depende do projeto específico de cada turbina. No presente estudo as análises foram realizadas considerando a turbina eólica do tipo Savonius, apresentando análises hipotéticas a respeito da implementação dessa turbina.

A turbina eólica Savonius é caracterizada por ser de pequeno porte, ou seja, espera-se que a potência elétrica associada à mesma seja baixa. Embora a energia elétrica gerada por uma turbina eólica de pequeno porte não forneça valores expressivos, não se deve descartar esta fonte alternativa, tendo em vista que é necessário cada vez mais pensar em formas sustentáveis de geração de energia. Entretanto, ao considerar uma turbina eólica de eixo horizontal (TEEH), o porte e a eficiência são mais interessantes e o potencial eólico das mesmas é mais expressivo. Este fato faz com que estes modelos de turbina sejam mais explorados e implantados para geração de eletricidade.

Referências

BDMEP. **Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/>>. Acesso em: 30 mar. 2014.

BRASIL. **Potencial eólico**. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito. Ministério de Minas e Energia. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/mapas_1a.pdf>. Acesso em: 02 mai. 2014.

ESTADÃO. **Relógios de luz**. 2010. Disponível em: <<http://blogs.estadao.com.br/advogado-de-defesa/novo-relogio-reduz-conta-de-luz/>>. Acesso em: 25 mai. 2014.

LEITE, A. C. G. M. **A sustentabilidade empresarial, social e as fontes de energias**. Núcleo de Estudo do Futuro. Boletim de Inovação e Sustentabilidade. Faculdade de Economia, Administração, Contabilidade e Atuariais. Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, São Paulo. 2013. Disponível em: <<http://www.pucsp.br/sites/default/files/download/posgraduacao/programas/administracao/bisus/bisus-2s-2013-v1.pdf>>. Acesso em: 02 mai. 2015.

JACOBI, P. R. **Educar na sociedade de risco: o desafio de construir alternativas**. Pesquisa em Educação Ambiental, São Carlos, v.2, n.2, p. 49-65, 2007.

MELO, M. S. M. **Energia Eólica: aspectos técnicos e econômicos**. Dissertação de Mestrado, Planejamento Energético, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012, 137 f. Disponível em: <http://www.ppe.ufrj.br/ppe/production/tesis/marcelo_melo.pdf>. Acesso em: 03 abr. 2014.

ÔLO, C. D. V. **Projeto de uma Turbina Savonius com utilização de componentes em Fim-de-Vida**, 2012, 64 f. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2012. Disponível em: <http://run.unl.pt/bitstream/10362/8876/1/Olo_2012.pdf>. Acesso em: 23 mai. 2014.

PEREIRA, M. M. **Um estudo do aerogerador de velocidade variável e sua aplicação para fornecimento de potência elétrica constante**, 2004, 85 f. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2004. Disponível em: <<http://www.ufjf.br/ppee/files/2008/12/211037.pdf>>. Acesso em: 23 abr. 2014.

REUK. **What is a Savonius Wind Turbine**, 2006. Disponível em: <<http://www.reuk.co.uk/Savonius-Wind-Turbines.html>>. Acesso em: 23 mai. 2014.

UOL. **How Stuff Works**, 2006. Disponível em: <<http://ambiente.hsw.uol.com.br/energia-eolica1.htm>>. Acesso em: 15 mai. 2014.

UWM. **Silownie Wiatrowe O Pionowej Osi Obrotu**. Disponível em: <<http://www.uwm.edu.pl/kolektory/silownie/pionowe.html>>. Acesso em: 23 mai. 2014.