

## **ANÁLISE DA VIABILIDADE DA IMPLANTAÇÃO DE UM PARQUE EÓLICO: ESTUDO DE CASO DO MUNICÍPIO DE SÃO CARLOS.**

**Renato Silva Nicoletti(1); Bruno Massimini(2); Leonardo Lucas Rosseto(3)**

<sup>(1)</sup> Graduando; Departamento de Engenharia Civil; Universidade Federal de São Carlos; São Carlos, São Paulo; bmassimini@icloud.com; <sup>(2)</sup> Graduando; Departamento de Engenharia Civil; Universidade Federal de São Carlos; São Carlos, São Paulo; leonardolrosseto@hotmail.com; <sup>(3)</sup> Graduando; Departamento de Engenharia Civil; Universidade Federal de São Carlos; São Carlos, São Paulo; renato\_nicoletti@hotmail.com.

**Eixo temático:** Gerenciamento de Recursos Hídricos e Energéticos

**RESUMO** – O desenvolvimento da produção de energia eólica deve nortear os investimentos em todas as regiões do Brasil para garantir energia limpa, de maneira a diminuir os impactos ambientais e socioeconômicos causados pela construção de usinas hidrelétricas e termoeletricas. O presente estudo objetivou a análise da viabilidade da implantação de um parque eólico, na percepção de investidores e administradores públicos e privados, na busca por alternativas sustentáveis e por soluções para dificuldades enfrentadas na produção e distribuição de energia elétrica. A carência de unidades de geração de energia eólio-elétrica na região sudeste do Brasil motivou este trabalho, que analisou a viabilidade da implantação de um parque eólico na cidade de São Carlos, localizada no interior Estado de São Paulo. Analisou-se o fator de Weibull, indicador da constância dos ventos, e realizou-se uma simulação para o local, na qual foi utilizado um anemômetro para medir a velocidade dos ventos, obtendo-se o valor de  $6,7 m/s$ . Ademais, pelas bibliografias, encontrou-se a direção sudeste como sendo a direção predominante dos ventos sobre o objeto deste estudo, bem como a velocidade média dos ventos de  $6,5 m/s$ . Apesar do custo para construção de um parque eólico se apresentar como um problema na conjuntura econômica atual do país, este se apequena ante os grandes benefícios proporcionados ao meio ambiente, além de trazer sustentabilidade ao desenvolvimento energético – algo tão almejado nos tempos atuais. Constatou-se que o investimento seria viável, embora a região não seja a mais adequada do país, dada sua extensão territorial e diferenças físicas e climáticas.

**Palavras-chave:** Ventos. Geração de Energia. Energia Eólica. Sustentabilidade.

**ABSTRACT** – The development of wind energy production should guide investments in all regions of Brazil to ensure clean energy in order to reduce the environmental, socioeconomic impacts caused by the construction of hydroelectric and thermoelectric power stations, for example. This study aimed to analyze the feasibility of the implementation of a wind park in the perception of investors, consumers and public and private administrators in order to find sustainable alternatives and solutions to problems encountered in the production and distribution of electricity. The lack of units of wind power generation in southeastern Brazil motivated this work, which studied the feasibility of the implementation of a wind park in the city of Sao Carlos, located within the state of São Paulo. The factor of Weibull was analysed and

the wind speed measurements were carried out using an anemometer, obtaining the value of 6.7 m/s. In addition, in the bibliographies were found that southeastern direction is the prevailing wind direction on the subject of this study and the average wind speed is 6.5 m/s. Despite the cost for construction of a wind park to present itself as a problem in the current economic situation in the country, this is too little before the great benefits brought to the environment, and bring sustainability to the energetic development - something much desired in the present times. It was found that the investment would be feasible, although the locus is not the most appropriate of the country, given its territorial extension and physical and climatic differences.

**Key words:** Wind. Power Generation. Sustainability. Wind Power.

### **Introdução**

Esta pesquisa teve o objetivo de avaliar a viabilidade da implantação de uma unidade geradora de energia elétrica a partir de energia eólica no município de São Carlos, localizado no interior de São Paulo – Brasil. Este estudo levou em consideração aspectos econômicos e ambientais para verificar tal viabilidade. A motivação para a realização desta pesquisa foi o fato de não haver unidades de geração de energia eólio-elétrica na região sudeste do Brasil.

Atualmente, a matriz energética brasileira, em grande escala, é dependente das hidrelétricas, sendo que aproximadamente 70% da energia produzida no Brasil são geradas através dessas usinas, cuja construção gera impacto social e ambiental, já que grandes extensões de terra são alagadas afetando a fauna e flora, além de desalojar a população habitante da área. Destaca-se também a questão econômica, pois muitos dos ribeirinhos se sustentam da pesca, e a construção de usinas hidrelétricas altera o ciclo dos peixes, de modo que a pesca na região é altamente afetada.

Fontes alternativas de energia podem ser a solução para os problemas citados, além de complementar as fontes já implantadas. Assim, torna-se interessante o investimento em parques eólicos, uma vez que geram impactos muito menores e não são poluentes, além de funcionarem com uma fonte de energia renovável: o vento.

A geração de energia eólica tem sido crescente na última década e tem ocorrido de forma acelerada, que atualmente, atinge a escala de *gigawatts*. A falta de dados relacionados à viabilidade deste tipo de investimento limita a sua expansão. Trata-se de um investimento de alto custo, então estudos técnicos e direcionados que minimizem os riscos podem contribuir para a maior adesão à construção destas usinas.

### **Material e Métodos**

A energia eólica se origina principalmente na energia solar. Trata-se de uma espécie de energia cinética oriunda do gradiente de aquecimento que ocorre nas camadas de ar, acarretando em variações de massa específica e de pressão.

- **Fundamentos da Geração Eólica**

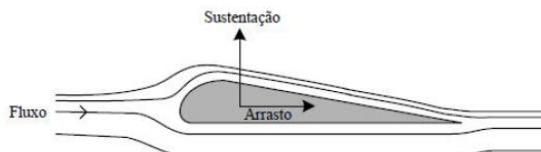
O componente destinado a converter a energia cinética contida no vento em energia elétrica é denominado de aerogerador e este dispositivo é o principal

componente da máquina eólica. Visando entender a estrutura e os conceitos por trás dessa importante energia sustentável, além do cálculo de potência efetiva gerada por um aerogerador, é essencial compreender a dinâmica do vento e das pás.

### ○ Aerodinâmica

A Figura 01 expõe o corte transversal de uma pá eólica. Admita que a pá esteja perpendicular ao plano da folha, com as duas forças principais que atuam sobre o perfil absorto num fluido em movimento: a força de arrasto e de sustentação.

**Figura 01:** Força de sustentação e arrasto num perfil de pá eólica.



Fonte: SCHUTZER (2012).

No momento em que o fluido percorre tal superfície, ocorre sobre o perfil a força de arrasto e de sustentação. Na superfície superior da pá, o ar detém uma velocidade maior que na inferior e, esta diferença ocasiona um gradiente de pressão, fazendo a mesma ser menor na parte superior, o que gera a força de sustentação. Deste modo, quando a pá está em movimento, sua translação se junta com o movimento do ar, apontando a direção do vento relativo, que é perpendicular à força de sustentação.

### ○ Potência

A formulação da potência contida no vento, dada pela equação (1), advém de uma derivação da energia cinética. Nota-se que a potência é proporcional ao cubo da velocidade do vento. Assim, a geração de energia eólica é sensível à variação do vento.

$$P_v = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times V_v^3 \quad (1)$$

$P_v$  : Potência do vento [W]

$A$  : Área de varredura do rotor [ $m^2$ ]

$\rho$  : Densidade do ar [ $kg/m^3$ ]

$V_v$  : Potência do vento [m/s]

Por sua vez, a potência de saída da turbina eólica é dada pela equação 02:

$$P_{rot} = \frac{1}{2} \times C_p(\lambda) \times \rho \times A \times V_v^3 \quad (2)$$

$P_{rot}$  : Potência do rotor [W]

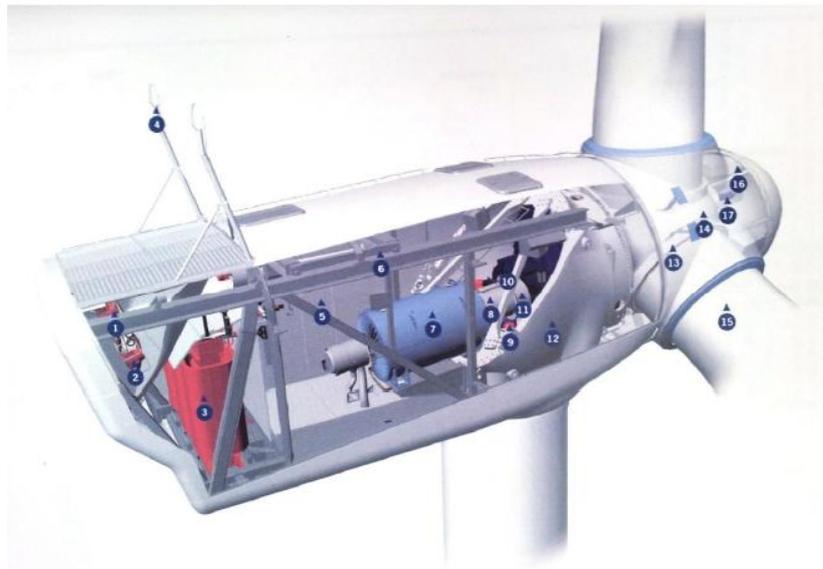
$C_p(\lambda)$ : Coeficiente de Potência de Betz

Nesta equação, o coeficiente de potência  $C_p$  é adquirido através do Teorema de Betz, que associa o volume de ar na entrada do aerogerador com o volume de ar na saída do mesmo. Deste modo, se a conversão da potência do vento na potência do rotor fosse total, ter-se-ia a velocidade do vento nula após a passagem das pás, estagnando o escoamento de ar. Fazendo uma relação com a distribuição da velocidade e da pressão do vento no caminho percorrido, pode-se encontrar o valor

para o qual a potência é máxima,  $C_{p_{max}} = 0,593$ , que acontece no momento em que a velocidade do vento na saída do gerador corresponde à 1/3 da velocidade do vento na entrada. No entanto, o coeficiente real máximo que as turbinas eólicas conseguem alcançar atualmente é de 0,45 apenas (MACCARINI, 2009).

o **Componentes do Aerogerador**

A Figura 02 esquematiza os componentes de uma nacela e seus adjacentes e a Tabela 01 explicita a função dos principais componentes.



**Figura 02:** Nacela da Vestas V90.

Fonte: SCHUTZER (2012).

- |                               |                                 |                          |
|-------------------------------|---------------------------------|--------------------------|
| 1. Resfriador do óleo         | 6. Guindaste de auxílio         | 11. Sistema de freios    |
| 2. Resfriador do gerador      | 7. Gerador                      | 12. Plataforma da nacela |
| 3. Transformador              | 8. Acoplamento de disco         | 13. Rolamento das pás    |
| 4. Sensor de direção e vento  | 9. Motores de posição da nacela | 14. Cubo                 |
| 5. Controladores e inversores | 10. Caixa de engrenagens        | 15. Pás                  |

**Tabela 01:** Principais componentes de um aerogerador e suas respectivas funções.

Componente	Função
Nacela	Base onde são abrigados os componentes.
Torre	Além de sustentar o rotor e a nacela, erguem todo o conjunto a uma altura onde as pás possam girar com segurança e distante do solo.
Pás do Rotor	Capturar energia eólica e converter a mesma em energia rotacional no eixo.
Eixo	Transferir a energia de rotação para o gerador.
Caixa de Engrenagens	Aumentar a velocidade de rotação do eixo entre o gerador e o cubo do rotor.
Cubo	Acopla o eixo principal e as pás. Transmite as forças aerodinâmicas geradas na pá em torque no eixo principal, que transmite o torque do rotor para a caixa de engrenagens.
Sistema de freios	Em caso de falha no sistema ou sobrecarga de energia, detêm a rotação do eixo.

Fonte: Aneel (2007).

- **Local Selecionado para a Análise**

Com uma altitude média de 856 m e uma área de 1141 km<sup>2</sup>, o município de São Carlos se localiza no interior do estado de São Paulo. O local selecionado para análise, em São Carlos, está localizado fora da área urbana, próximo à fábrica da *Volkswagen* (vide Figura 03). O mesmo possui altitude de 820 m e se encontra nas coordenadas 22° 4'30.58"S e 47°53'38.36"O.



**Figura 03:** Local escolhido.

**Fonte:** Google Maps.

O fator de forma de Weibull da localidade estudada, indicado pela letra “*k*”, representa a constância dos ventos, sendo que quanto maior o valor do fator de Weibull, maior a constância dos ventos em determinada região. Os valores anuais do fator no Brasil tipicamente variam entre 2 e 3. Observando a Figura 04, obtém-se que o fator de forma de Weibull da cidade de São Carlos é de aproximadamente 2,5.



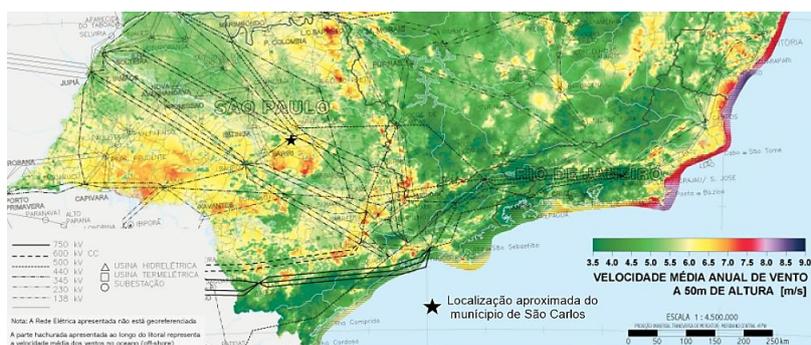
**Figura 04:** Mapeamento do Fator de Forma de Weibull do Estado de São Paulo.

**Fonte:** AMARANTE et al. (2001).

Quanto à direção dos ventos, através do Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (AMARANTE et al., 2001) tem-se por uma análise média anual a direção sudeste como sendo direção predominante dos ventos sobre o interior do estado de São Paulo.



Por fim, para determinar a velocidade média anual dos ventos na região objeto de estudo, foram realizadas medições ao longo do ano por meio de um anemômetro digital da marca *Incoterm* e encontrou-se uma velocidade média igual a  $6,7 \text{ m/s}$ . Buscando o valor desta mesma variável no Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, encontrou-se o mesmo como sendo aproximadamente  $6,5 \text{ m/s}$  (vide Figura 05).



**Figura 05:** Velocidade Média Anual de Vento destacando o município de São Carlos.

**Fonte:** AMARANTE et al. (2001).

Importante acontecimento relacionado com o desenvolvimento da produção de energia eólica no Brasil foi a criação do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica – PROINFA, programa criado através do Decreto nº 5.025 de 2004, com a finalidade de intensificar participação de fontes eólicas, biomassa e pequenas centrais hidrelétricas (PCH) na produção de energia eólica. Em pouco mais de 3 anos, o Brasil passou a ter 392 MW a mais de energia eólica instalada, totalizando 414 MW. O programa prevê 60% de nacionalização dos empreendimentos, de modo a aquecer a indústria brasileira no setor de produção de peças utilizadas para as instalações das usinas. Além disso, há um financiamento de até 70% do valor do investimento, com recursos do Banco Nacional do Desenvolvimento – BNDES, com valor mínimo de financiamento de 20 milhões de reais e pode ser solicitado por sociedades com sede e administração no Brasil e pessoas jurídicas de direito público, segundo o próprio banco.

### Resultados e Discussão

Para efeitos de simulação, trabalhou-se com um aerogerador fabricado pela empresa dinamarquesa *Neg Micon*, modelo NM64/1500 com área de varredura de  $3127 \text{ m}^2$  (vide Figura 06). Quanto à densidade do ar, tomou-se  $\rho = 1,25 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  e, por fim, adotou-se a velocidade do vento teórica para a cidade de São Carlos, pois esta possui um embasamento maior e fornecerá valores mais seguros, visto que a mesma é menor que a velocidade verificada experimentalmente. Portanto  $V_v = 6,5 \text{ m/s}$ . Ademais, adotou-se  $C_p = 0,45$ , que é o valor máximo que se pode obter atualmente. Sendo assim, pela equação (02), tem-se que:

$$P_{rot} = \frac{1}{2} \times 0,45 \times 1,25 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 3127 \text{m}^2 \times \left(6,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^3 = 241,52 \text{kW}$$

Tal potência resultaria em uma geração de 173894,4 kWh por mês. Logo, considerando um parque eólico com 50 turbinas semelhantes a esta, teríamos a geração de  $8,7 \times 10^6$  kWh por mês.

Utilizando-se da informação de que, no Brasil, o consumo médio de energia elétrica por residência é de 147 kWh por mês, tal potência seria capaz de suprir a demanda energética de aproximadamente 60 mil residências.



**Figura 06:** Aerogerador *Neg Micon*, modelo NM64/1500.

**Fonte:** The Wind Power - Wind Energy Market Intelligence<sup>1</sup>.

### Conclusões

De forma similar ao notório desenvolvimento da geração de eletricidade ao longo dos anos, fontes renováveis de geração de energia estão fortemente ganhando cenário e investimento, inserindo-se de forma competitiva no mercado de energia, e torna-se cada vez mais imprescindível quanto se observa do âmbito ambiental.

Ademais, faz-se importante mencionar que a simulação foi realizada utilizando-se dados superficiais das fontes consultadas e assumindo algumas hipóteses. Todavia, para o efeito de estudo deste trabalho, admitiu-se tais aproximações como toleráveis e convenientes para a análise e conclusão dos objetivos propostos.

Enfim, analisando de maneira simples as estimativas feitas para a construção do parque eólico na cidade de São Carlos, bem como possíveis resultados que seriam obtidos com essa suposição, constatou-se a viabilidade do projeto, apesar de o local estudado não ser o melhor para tal finalidade. Com a pesquisa, foi possível concluir que cerca de 60 mil residências seriam atendidas, sendo assim capaz de suprir grande parte da demanda necessária dos mais de 240 mil habitantes. Atualmente, o dólar – moeda utilizada para transações internacionais – está mais valorizado que o real, isso o torna um problema para a maioria dos fabricantes deste setor que são do exterior.

Além disso, faz-se importante ressaltar que o presente trabalho, em uma segunda etapa, será discutido com especialistas e após uma reformulação técnica e embasada deste artigo, almeja-se apresentá-lo para os responsáveis pela área na prefeitura do município de São Carlos. Em suma, concluiu-se que o projeto foi benéfico para julgar a implementação de uma grande fonte renovável de energia, visto que estas progredem para alcançar espaço gigante no mercado de energia mundial e, também, no que diz respeito a investimentos. Além do que, a energia

<sup>1</sup> Disponível em: < [http://www.thewindpower.net/turbine\\_en\\_183\\_neg-micon\\_1500.php](http://www.thewindpower.net/turbine_en_183_neg-micon_1500.php) > Acesso em 11 de abril de 2016.

eólica e as outras fontes renováveis tornam-se de vital importância ao longo do tempo, uma vez que a demanda por energia cresce em proporção com a necessidade de preservação ambiental.

### Referências

ANEEL. Informações Técnicas, 22 dez. 2016. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/informacoes-tecnicas>>. Acesso em 25 jul. 2016.

AMARANTE, O. A. C.; ZACK, J.; SÁ, A. L. Atlas do Potencial Eólico Brasileiro. Brasília: MME. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2001.

BNDES. Energia – Geração de vapor e energia renovável. Disponível em: <[http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/bndes/bndes\\_pt/Institucional/Apoio\\_Financeiro/Produtos/FINEM/energia\\_geracao\\_vapor\\_renovavel.html](http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/bndes/bndes_pt/Institucional/Apoio_Financeiro/Produtos/FINEM/energia_geracao_vapor_renovavel.html)>. Acesso em 28/02/2016.

BRASIL. Decreto n.º 5.025, de 30 de março de 2004. Regulamenta o inciso I e os §§ 1º, 2º, 3º, 4º e 5º do art. 3º da Lei no 10.438, de 26 de abril de 2002, no que dispõem sobre o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica - PROINFA, primeira etapa, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 14 mar. 2004. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2004-2006/2004/decreto/d5025.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/decreto/d5025.htm)>. Acesso em: 25 jul. 2016.

Google Maps. Disponível em: <<https://maps.google.com.br/>>. Acesso em 22 mar. 2016.

Ministério de Minas e Energia. O Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica, 2016. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/programas/proinfa/>>. Acesso em 25 jul. 2016.

MACCARINI, M. C. Inversor Monofásico Sincronizado para a Conexão de um Gerador Eólico à Rede Elétrica: Estudo, Projeto e Implementação. 2009. 153p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Catarina.

Prefeitura Municipal de São Carlos. Dados da Cidade. Disponível em: <<http://www.saocarlos.sp.gov.br/index.php/conheca-sao-carlos/115442-dados-da-cidade-geografico-e-demografico.html>>. Acesso em 28 fev. 2016.

SCHUTZER, H. Estudo de Energia Eólica e Pequena Central Hidrelétrica e Simulação em Conjunto na Região do Ribeirão do Lobo. 2012. 81 f. Tese (Graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Energia e Automação) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 27 nov. 2012.

The Wind Power. Turbine NM64/1500, jun. 2016. Disponível em: <[http://www.thewindpower.net/turbine\\_en\\_183\\_neg-micon\\_1500.php](http://www.thewindpower.net/turbine_en_183_neg-micon_1500.php)>. Acesso em 25 jul. 2016.