

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

PMC 581 – Projeto Mecânico II

**Aspectos da Utilização de Energia
Eólica e um Estudo de Caso**

Aluno: Marcelo Roberto Louzada Tavares
Professor Orientador: Jurandir Itizo Yanagihara

NUSP: 1533500



Índice

1. Introdução.....	3
1.1 Objetivos deste Relatório	3
1.2 A Energia Eólica e suas características e singularidades	4
1.3 Considerações Matemáticas.....	5
2. Turbinas Eólicas	10
2.1 Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal	10
2.2 Turbinas Eólicas de Eixo Vertical	12
3. Aerodinâmica das Turbinas Eólicas - Forças Aerodinâmicas	14
4. O Funcionamento das Turbinas	16
4.1 As Forças Atuantes sobre as Pás.....	16
4.2 A Potência das Turbinas	20
5. Discussões para a implementação.....	22
5.1 A escolha do local	22
5.2 A Escolha da Turbina	28
5.3 Uma estimativa da geração elétrica	28
6. Discussões sobre Custos	29
7. Estudo de Caso	31
8. Discussões e Considerações Finais.....	37
9. Bibliografia.....	38

1. Introdução

O movimento natural do ar atmosférico nos fornece uma excelente fonte de energia disponível em quantidades substanciais. Esta energia pode ser convertida em energia elétrica, sem os típicos inconvenientes dos geradores elétricos convencionais, através da utilização de uma turbina adequada.

Turbinas eólicas tem sido utilizadas há centenas de anos para bombear água, moer grãos e, ainda, outras aplicações mecânicas. Porém, apesar de atualmente existirem mais de um milhão de “moinhos de vento” em utilização ao redor do mundo, o interesse maior nos dias de hoje está voltado para as potencialidades e singularidades da conversão de energia eólica em energia elétrica em grandes escalas.

1.1 Objetivos deste Relatório

Os objetivos do presente relatório são apresentar e discutir o atual estado da arte do desenvolvimento tecnológico no aproveitamento da energia eólica, principalmente com vistas à geração de energia elétrica, apresentando as principais categorias e tipos de turbinas eólicas, com os seus respectivos detalhes de funcionamento e parâmetros importantes. A seguir, serão apresentados os critérios fundamentais a respeito da escolha e adequação de uma turbina a determinadas condições, bem como sobre a seleção do local próprio para abrigar um sítio eólico. Como parte final, será realizado um estudo de caso para uma região do nordeste brasileiro, com as devidas discussões técnicas e econômicas, onde se apresentará um modelo para a obtenção do custo da energia elétrica.

1.2 A Energia Eólica e suas características e singularidades

Um fator decisivo que tem impulsionado o crescente interesse é a progressiva redução nos custos da energia de fonte eólica, de forma que pode-se prever que em breve esta será bastante competitiva com as demais fontes supridoras.

Além do custo, a energia de fonte eólica oferece outros atrativos que, no longo prazo, fazem-na bastante interessante:

- Diversificação das fontes supridoras e maior independência dos combustíveis fósseis;
- Redução drástica nos impactos ambientais;
- Rendimentos para os proprietários das terras onde são instaladas as turbinas eólicas.

Alguns dos inconvenientes gerados pela utilização da energia eólica são os problemas das colisões com pássaros, o que pode por em risco espécies em extinção, e a baixa relação potência / área requerida.

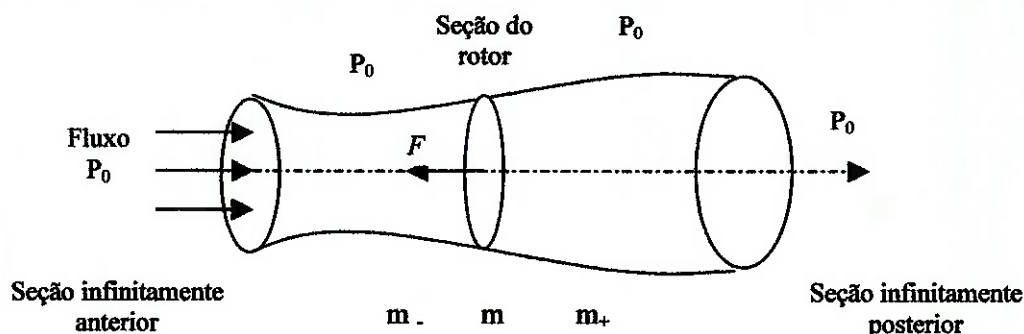
Um ponto importante a ser destacado é que a seleção da localidade é o fator principal para a implantação de sistemas eólicos, pois, conforme será visto a seguir, a potência disponível é uma função direta do cubo da velocidade do vento. Também é relevante dizer que, em geral, ventos acima de 5 m/s são necessários para viabilizar economicamente a implantação de pequenas turbinas eólicas, enquanto que no caso de parques eólicos, com um grande número de turbinas eólicas, são necessárias velocidades de vento superiores a 6 m/s.

Para os casos de parques eólicos em que, geralmente, se deseja transformar o trabalho mecânico em uma tensão elétrica alternada de ciclo constante, a turbina eólica deve operar a uma velocidade angular constante, a despeito das variações da velocidade dos ventos. Além disso, um sistema de armazenamento de energia com baterias (ou algum outro sistema) é necessário para fornecer energia quando

os ventos cessem e, também, um sistema de parada para quando os ventos ultrapassassem valores que possam prejudicar a integridade dos equipamentos.

A energia eólica total que circula ao redor de todo o globo terrestre tem sido estimada. Este valor porém não é relevante, o que interessa é que o valor médio para a velocidade do vento a uma altura de 20-30 m acima do nível do solo pode ser grande o suficiente de forma que o fluxo de energia que atravessaria o rotor pode atingir uma média anual de 500 W/m^2 . Isto equivale a dizer que uma turbina, nesta situação, poderia extrair talvez 150W destes 500W disponíveis. A nível de comparação, é interessante notar que a média anual de potência solar que pode ser interceptada numa região favorável é de cerca de 250 W / m^2 , e desta não mais do que 25 ou 30 W pode ser extraído.

1.3 Considerações Matemáticas



Se o fluido é incompressível, então temos:

$$v.S = \text{constante} \quad (1)$$

onde v é a velocidade do fluido e S é a área da seção do tubo de fluxo.

A energia cinética do vento por unidade de tempo (potência do vento) é:

$$W_t = \frac{1}{2} (\rho v S) v^2 \quad \text{ou, ainda,} \quad W_t = \frac{1}{2} (\rho S) v^3 \quad (2)$$

onde ρ é a densidade do ar. A equação (2) mostra que a potência disponível do vento é (i) proporcional ao cubo da velocidade e (ii) proporcional ao quadrado do raio do rotor.

A seguir, demonstraremos que a eficiência máxima de uma turbina eólica é:

$$\eta_{\text{máx}} = 16/27$$

Na figura mostrada anteriormente, as notações m_- , m , m_+ e p_0 indicam as seções imediatamente antes, a própria seção e depois do rotor e a pressão atmosférica, respectivamente.

O fluxo mássico do ar é dado por:

$$Q = \rho S_1 v_1 = \rho S_m v_m = \rho S_2 v_2 \quad (3),$$

onde os subscritos 1, m, 2 indicam as variáveis a uma posição infinitamente anterior, sobre e posterior à seção do rotor, respectivamente. As condições do vento externamente ao tubo de fluxo são uniformes, enquanto que internamente as velocidades e pressões variam. O rotor, por sua vez, impõe uma força F ao tubo de fluxo cuja magnitude é:

$$F = Q (v_1 - v_2)$$

$$F = S_m (p_{m-} - p_{m+}) \quad (4)$$

Das equações (3) e (4) , temos

$$p_{m-} - p_{m+} = \rho v_m (v_1 - v_2) \quad (5)$$

Do teorema de Bernoulli, temos

$$p_0 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = p_{m-} + \frac{1}{2}\rho v_m^2,$$

$$p_0 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 = p_{m+} + \frac{1}{2}\rho v_m^2, \quad (6)$$

Destas equações, temos

$$p_{m-} - p_{m+} = \frac{1}{2}\rho (v_1^2 - v_2^2) \quad (7)$$

Das equações (5) e (7), pode-se afirmar

$$v_m = \frac{1}{2} (v_1 + v_2) \quad (8)$$

A potência utilizada para mover o rotor é dada por

$$W = (p_{m-} - p_{m+}) v_m S_m$$

$$W = \rho v_m^2 (v_1 - v_2) S_m \quad (9)$$

Se a velocidade do vento é reduzida em uma quantidade a ao passar pelo rotor, temos

$$v_m = (1 - a) v_1 \quad (10)$$

E, da equação (8):

$$v_2 = (1 - 2a) v_1 \quad (11)$$

Esta relação significa que a velocidade em uma localização infinitamente posterior é reduzida numa taxa duas vezes maior do que aquela a que é reduzida imediatamente após o plano do rotor.

Substituindo as equações (10) e (11) na equação (9), temos

$$W = 2\rho a(1 - a)^2 v_1^3 S_m. \quad (12)$$

Esta é a fórmula fundamental que regula a performance das turbinas eólicas. A máxima potência que pode ser retirada é obtida desta equação pelo seguinte procedimento:

A condição de máxima potência é:

$$dW/da = K_{const.} (1-3a) (1-a)$$

$$dW/da = 0$$

onde a não deve ser 1, pois assim o vento desapareceria após o rotor, e, portanto, o valor de a para termos a maior eficiência é

$$a = 1/3$$

Substituindo este valor na equação (12), teremos

coeficiente de performance: $C_p = W / W_t$

$$C_p = 4a(1-a)^2 = 16/27$$

Esta é a chamada Lei de Betz, que mostra que a eficiência de uma turbina eólica não pode exceder o valor de $16/27 = 0,593$.

Esta é, porém, a eficiência ideal e, como sabemos, nenhuma máquina real poderia extrair potência desta forma. A melhor taxa de extração de potência para uma máquina real é de cerca de 50%, e, isto, somente é conseguido com a turbina operando com o vento na velocidade para o qual a máquina foi projetada. Porém, é obvio que esta característica não é uma constante e, além disso, é preferível uma otimização dos custos ao invés de construir-se uma máquina para a melhor eficiência, já que isto implicaria em equipamentos e perfis de pás que elevariam em muito os custos totais.

Além destas reduções na eficiência, há também que se considerar as perdas na transformação da energia mecânica em energia elétrica, tipicamente de 75 a 95%. Deste modo, e considerando os fatores anteriormente citados, com a turbina operando com o vento na intensidade para o qual foi projetada obteríamos uma eficiência de cerca de 30-40% da potência total que atravessa a seção do rotor.

Considerando-se as variações na amplitude dos ventos, bem como suas mudanças de direção e aquelas situações que exigiriam a parada no funcionamento do rotor, pode-se estimar a melhor eficiência alcançável de cerca de 15 a 30%, ou menos ainda dependendo da localidade de operação e das características da máquina.

2. Turbinas Eólicas

Uma grande variedade de máquinas têm sido inventadas e propostas com a finalidade de aproveitar a energia dos ventos. Dentro deste vasto leque e desprezando-se alguns poucos projetos menos convencionais, podemos classificar as modernas turbinas eólicas em duas configurações básicas: turbinas de eixo horizontal e turbinas de eixo vertical.

A maior parte das turbinas eólicas modernas são mecanismos geradores de eletricidade. Dentro desta característica, existem atualmente desde pequenas turbinas que geram poucas centenas ou dezenas de watts de potência até grandes turbinas que produzem 1MW ou mais. Existem, ainda, turbinas maiores (multi-megawatt wind turbines) sendo construídas, entretanto, estas, encontram-se quase a maioria em fase de testes e protótipos.

2.1 Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal (HAWT's – Horizontal Axis Wind Turbines)

Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal têm, geralmente, duas, três, ou um maior número de pás. Aquelas com um grande número de pás têm a aparência de um disco sólido e são conhecidas como *“high-solidity devices”*. Estas incluem as turbinas com múltiplas pás, comumente utilizadas para bombear água em fazendas.



Por outro lado, aquelas em que a área varrida pelas pás apresenta grandes vazios e somente uma pequena fração desta parece ser sólida são conhecidas como *“low solidity devices”*.

As modernas turbinas “low solidity” de eixo horizontal evoluíram dos tradicionais moinhos-de-vento e são, atualmente, as mais fabricadas. Isto deve-se ao seu funcionamento e aparência “limpos”, o que contribui em muito para a sua popularidade, aliados ao seu atual estágio de conhecimento aerodinâmico, já que os desenvolvimentos em perfis de asas aeronáuticas são facilmente correlacionáveis. Seus rotores têm, geralmente, duas ou três pás e, estes, são quase que universalmente utilizados na geração de eletricidade.

Estas turbinas são fabricadas comercialmente com potências máximas em torno de 1MW e são produzidas principalmente na Dinamarca, EUA, Inglaterra, Holanda, Alemanha, Itália, Espanha, Bélgica, Japão, Áustria e China. Estima-se que existam cerca de 20.000 HAWT's de médio porte e um número ainda maior de pequeno porte em operação em todo o mundo.

São também fabricadas HAWT's de uma única pá, principalmente na Alemanha e Itália, e, embora estas apresentem uma estranha aparência, alguns acreditam que elas apresentem certas características que, além de baratear os custos, minimizam as tensões no rotor.

Uma subclassificação das HAWT's inclui as UpwindHAWT's e as DownwindHAWT's:

- (a) Upwind HAWT's são turbinas em que o rotor é posicionado frontalmente na torre que o suporta. Estas turbinas necessitam de um leme ou motor que mantenha o eixo do rotor alinhado com a direção do vento, a este mecanismo costuma-se chamar “yaw drive”.
- (b) Downwind HAWT's são turbinas nas quais o rotor é montado na parte posterior da torre. Nestas, a força do vento nas pás mantém o rotor corretamente orientado.

2.2 Turbinas Eólicas de Eixo Vertical (VAWT's – Vertical Axis Wind Turbines)

Turbinas Eólicas de Eixo Vertical apresentam, conforme explicita o seu nome, o eixo de rotação na posição vertical e, ao contrário da maioria de seus similares de eixo horizontal, podem aproveitar ventos de qualquer direção sem necessitar de reposicionamento quando há uma mudança deste.

As VAWT's possuem duas configurações básicas: aquelas baseadas na força de arraste e as baseadas na força de sustentação (estas forças atuantes serão mais detalhadas posteriormente).

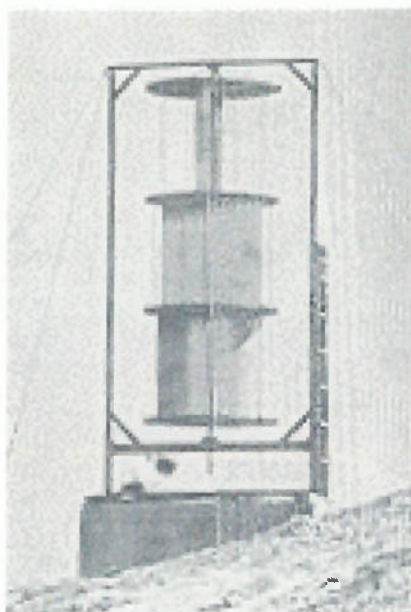


O anemômetro de três copos, mostrado à esquerda, é um tipo de turbina eólica de eixo vertical baseada na força de arraste. Verdade é que este é mais utilizado para medições da velocidade do vento.

É bastante óbvio afirmar que as turbinas impulsionadas pela força de arraste não podem ter suas pás a uma velocidade superior à velocidade do vento. Para quantificar este fato, utiliza-se um fator, dado pela razão entre a velocidade da extremidade da pá pela velocidade do vento, conhecido como TSR (Tip Speed Ratio). Conforme comentado anteriormente, nos mecanismos baseados na força de arraste este coeficiente não pode ser maior do que 1. Portanto, uma boa maneira de determinar se o equipamento baseia-se na força de arraste ou na força de sustentação é a verificação do fator TSR. Se o fator for maior do que 1, significa que forças de sustentação são bastante significativas na movimentação das pás.

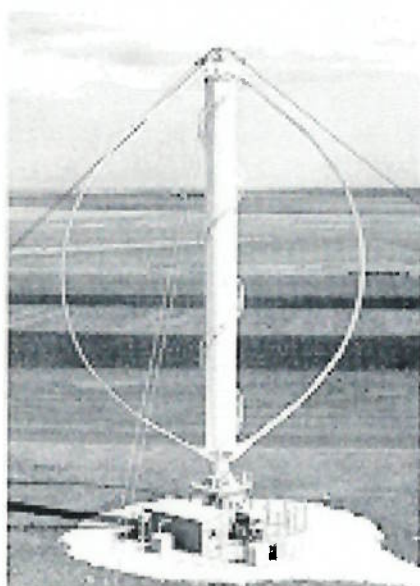
Em geral, as configurações baseadas na força de sustentação são mais eficientes e geram maior potência.

Discutiremos, agora, alguns tipos usuais de VAWT's:



Savonius: VAWT baseada na força de arraste. Este modelo pode apresentar aspectos bastante diferentes, entretanto o seu rotor deve apresentar um perfil em S (quando visto de cima). Suas principais características são baixa velocidade de rotação, alto torque e a capacidade de trabalhar com ventos a baixas velocidades

Sua baixa velocidade de rotação característica é um empecilho à geração de eletricidade, já que velocidades acima de 1000 rpm são melhores para este fim e o Savonius opera em torno de 100 rpm.



Darrieus: VAWT baseado na força de sustentação. Este tipo de turbina desenvolveu-se a partir das idéias do engenheiro francês Georges Darrieus e seu nome é utilizado para descrever uma das turbinas de eixo vertical que ele inventou em 1925. Este mecanismo, que assemelha-se a um grande batedor de ovos, tem pás curvadas presas ao topo e à base do seu eixo vertical. O Darrieus VAWT é o mais avançado dentre os modernos DAWT's.

Estes modelos são particularmente difíceis de serem montados em altas torres, pois estão inevitavelmente sujeitos a vibrações, onde capturariam ventos de maior velocidade. Por isso funcionam a baixas alturas com ventos mais fracos e mais turbulentos.



Outras configurações baseadas na força de arrasto:

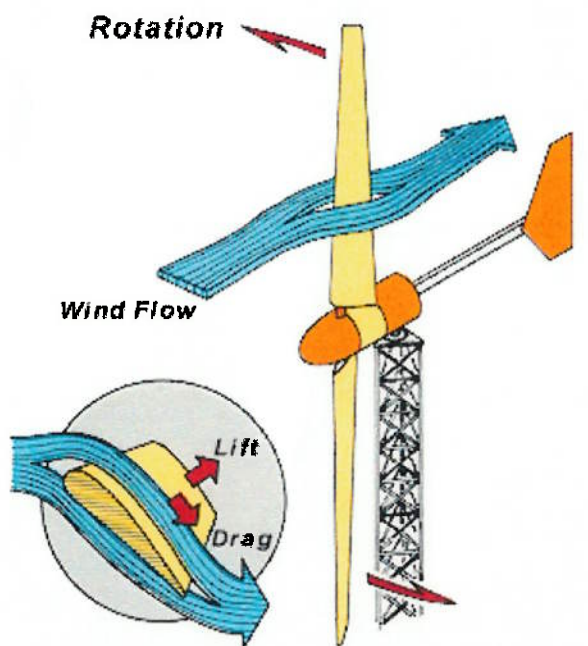


A patente Darrieus de 1927 também cobre as máquinas, como as da extremidade esquerda, com pás retas e chamadas Giromills.

Uma variante das Giromills, chamadas de Cicloturbinas, como esta acima à direita, utilizam um mecanismo de leme para orientar mecanicamente as pás.

É oportuno agora dizer que, até o presente, as VAWT's não são economicamente competitivas com as HAWT's.

3. Aerodinâmica das Turbinas Eólicas - Forças Aerodinâmicas



Principles of Wind Turbine Aerodynamic Lift

Para se entender como as modernas turbinas eólicas funcionam, dois termos da aerodinâmica precisam ser entendidos. São eles o arrasta e a sustentação.

Um objeto em meio a uma corrente de ar fica sujeito a forças que são o resultado das interações entre o ar e o objeto. Podemos considerar esta força como equivalente a duas forças componentes, atuando em direções perpendiculares,

conhecidas como força de arrasto e força de sustentação. A magnitude destas forças depende da forma do objeto, da orientação e direção do fluxo de ar e da velocidade do fluxo.

Força de Arrasto é a força, que atua sobre um objeto, na mesma direção do fluxo de ar. Uma chapa plana em meio a um fluxo de ar, por exemplo, está sujeita a máxima força de arrasto quando o fluxo é perpendicular à chapa. Por outro lado, esta força é mínima quando o fluxo está alinhado com a chapa.

Um grande número de mecanismos se utiliza da força de arrasto para o seu funcionamento. Um exemplo básico é o pára-quedas, que conta com a força de arrasto para reduzir a velocidade de queda do pára-quedista.

Objetos com formas adequadas para minimizar as forças de arrasto são chamados aerodinâmicos e isto ocorre devido ao fato de as linhas de fluxo ao redor do corpo serem suaves.

Forças de Sustentação são as forças a que está sujeito um corpo em meio a um fluxo de ar atuantes na direção perpendicular à direção do fluxo. Estas são conhecidas como forças de sustentação porque são as forças que possibilitam que um avião decole e voe. Forças de sustentação agindo sobre uma placa plana têm sua menor magnitude quando a direção do fluxo está a um ângulo nulo com a superfície da chapa. Quando se impõem pequenos ângulos, relativos à direção do fluxo, uma região de baixa pressão é criada no lado “escondido” da chapa como resultado do aumento da velocidade neste lado, de acordo com a equação de Benoulli. Assim, uma força, a força de sustentação, atua “empurrando” ou “succionando” o corpo numa direção perpendicular à direção do fluxo.

As forças de sustentação são utilizadas para propulsar os modernos veleiros e para sustentar e movimentar os helicópteros. São também as principais forças utilizadas na operação das modernas turbinas eólicas.

4. O Funcionamento das Turbinas

4.1 As Forças Atuantes sobre as Pás

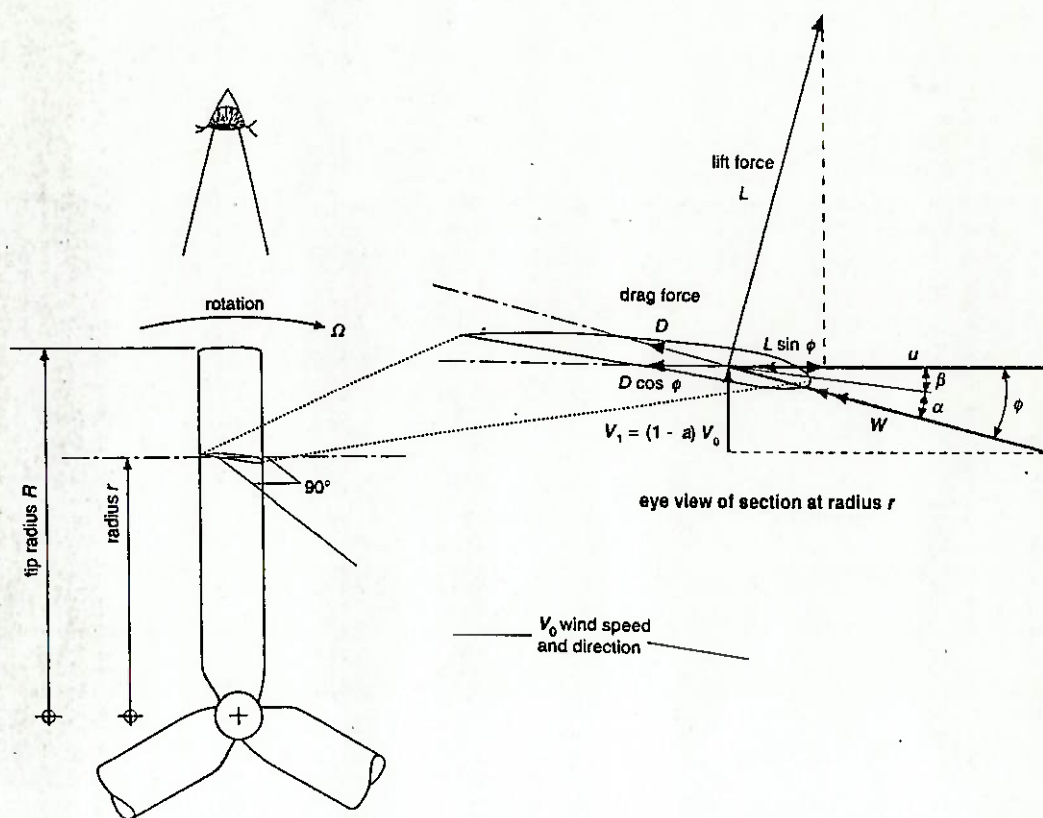
Tanto as turbinas de eixo horizontal quanto as de eixo vertical utilizam-se das forças aerodinâmicas geradas sobre as pás para extrair potência dos ventos, entretanto cada uma aproveita-se destas forças de uma maneira diferente.

4.1.1 Turbina Eólica de Eixo Horizontal

Numa HAWT, desconsiderando-se as rotações de ajuste das pás e admitindo-se que o eixo de rotação do rotor esteja alinhado com a direção do vento, para uma dada velocidade do vento e uma constante velocidade de rotação do rotor, o ângulo de ataque numa dada posição da pá permanece constante.

A performance das HAWT's é dependente do número e da forma das pás, além do comprimento destas, do ângulo relativo de incidência do vento e do ângulo de rotação das pás em torno de seu próprio eixo (*blade pitch angle*) ao longo do comprimento.

A figura abaixo ilustra uma seção de uma pá de um rotor e nela o diagrama vetorial das forças atuantes num determinado ponto do seu comprimento em um instante de tempo.



Devido ao movimento da pá, a direção na qual esta recebe a velocidade relativa do vento, W , é a resultante da sua velocidade tangencial, u , e a velocidade do vento no rotor, V_1 .

A velocidade do vento no rotor, V_1 , é a velocidade do vento numa posição anterior afastada e não perturbada reduzida de um fator que leva em conta a diminuição da velocidade do vento como resultado da extração de potência. Este fator é conhecido como *fator de interferência axial* e é comumente designado por a . Numa situação de máxima extração teórica de potência, este fator deve ser igual a $1/3$.

O ângulo de incidência relativo do vento, ϕ , é o ângulo que a velocidade relativa do vento faz com a pá, medindo-se este em relação ao plano de rotação. O ângulo de ataque, α , é o ângulo da velocidade relativa em relação à linha de comprimento do perfil aerodinâmico. O ângulo de rotação da pá (blade pitch angle), β , é, portanto, a diferença entre ϕ e α .

Como o rotor é constantemente alinhado de modo a que o plano de rotação seja perpendicular à velocidade do vento, a componente da força que gera potência é a componente da força de sustentação no plano de rotação, $L\sin\phi$, diminuída da componente da força de arrasto no mesmo plano, $D\cos\phi$. O torque em um ponto da pá em relação ao centro é o produto entre a força anteriormente discutida e a sua distância ao centro do rotor. O torque total equivale à soma dos torques agindo em cada ponto vezes o número de pás do rotor.

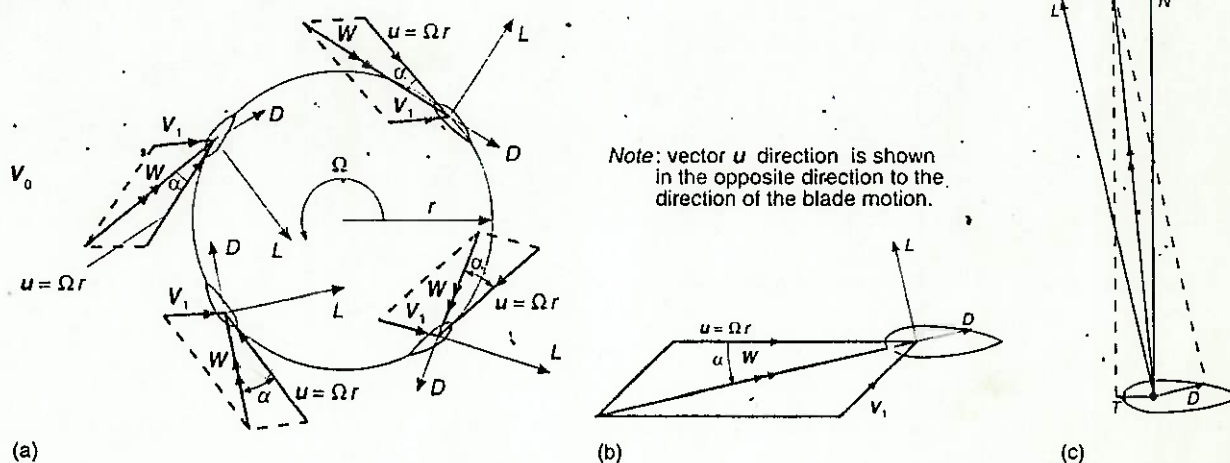
4.1.2 Turbina Eólica de Eixo Vertical

Numa VAWT, o ângulo de ataque numa dada posição da pá varia constantemente durante o ciclo de rotação, alternando-se de positivo para negativo e voltando a ser positivo a cada revolução. Isto significa que o lado em que age a força de sustentação muda a cada rotação, então, para garantir que potência seja extraída independentemente do ângulo de ataque ser positivo ou negativo, deve-se empregar um aerofólio simétrico.

Diferentemente das HAWT's, cujas pás movimentam-se num plano, as pás dos rotores das VAWT's interceptam um volume tridimensional. Conforme já mencionado, as VAWT's funcionarão com o vento soprando de qualquer direção, entretanto, a fim de entender o seu funcionamento, consideremos o vento numa particular direção e, também, que a pá esteja posta tangencialmente ao círculo que percorre. Obviamente, a cada rotação, o ângulo da pá com a direção do vento varia de 0 até 360°. Intuitivamente, pode parecer que o ângulo de ataque varie da mesma forma e que, portanto, seria impossível a operação das VAWT's.

Entretanto, levando-se em conta o movimento do rotor, o ângulo relativo do vento na pá é a resultante da velocidade do vento V_1 no rotor e a velocidade da pá u . Considerando-se que o rotor está se movimentando bastante rapidamente em relação à velocidade do vento, o ângulo de ataque que a pá faz com a velocidade relativa do vento W variará apenas de uma pequena amplitude durante o ciclo.

V_1 = wind velocity at rotor blade



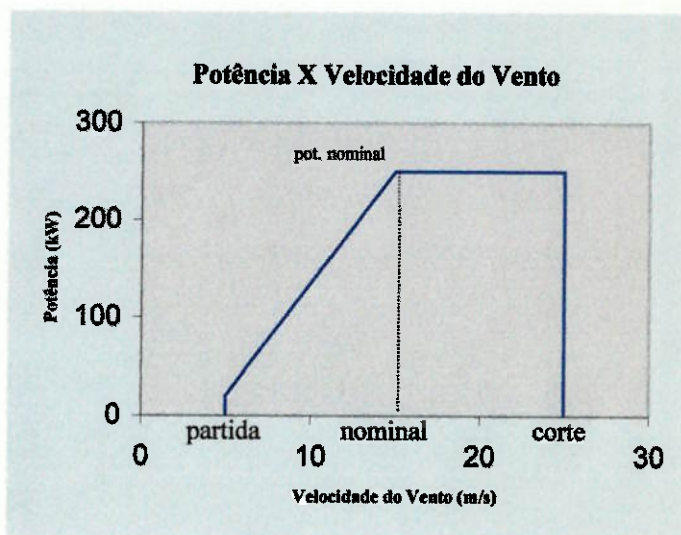
As forças de sustentação e de arrasto podem ser decompostas em duas outras componentes: normal N (isto é, alinhada com o raio) e tangencial T (isto é, tangencial à circunferência de rotação). A magnitude destas duas componentes varia com a variação do ângulo de ataque durante o ciclo de rotação e, como resultado, também varia o torque imposto ao rotor. A figura acima ilustra o que é descrito a seguir:

- (a) Forças atuantes e velocidades relativas para uma VAWT, mostrando ângulos de ataque para diferentes posições;
- (b) Detalhe das forças aerodinâmicas numa seção da pá;
- (c) Componentes tangencial e normal da força na pá.

4.2 A Potência das Turbinas

A potência obtida em uma turbina eólica depende das características da velocidade do vento local e da curva velocidade do vento - potência. Um exemplo deste tipo de curva é o mostrado logo abaixo.

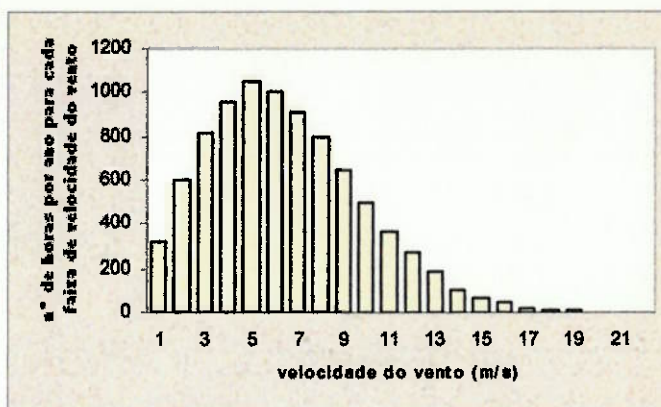
A máxima potência que pode ser extraída de uma turbina eólica é chamada de **potência nominal** (no exemplo, cerca de 250 kW) e a velocidade na qual é alcançada esta potência denomina-se **velocidade nominal** (no exemplo, em torno de 15 m/s). Acima



desta, há uma velocidade máxima, conhecida como **velocidade de corte**, na qual a turbina é desativada para evitar que ela seja danificada devido a fortes ventos. A velocidade mais baixa na qual a turbina irá ainda operar denomina-se **velocidade de partida**.

Para velocidades do vento entre a velocidade nominal e a velocidade de corte a potência da turbina permanece constante, entretanto abaixo da velocidade nominal esta potência varia de forma decrescente com a velocidade do vento. Cada turbina de um particular projeto tem uma relação específica entre a potência produzida e a velocidade do vento e é esta relação que define a potência gerada para cada determinada velocidade do vento, daí a importância da curva velocidade do vento – potência. Esta curva é mais comumente chamada apenas de **curva de potência**.

A características da velocidade do vento em um local são bem descritas através da chamada *distribuição das frequências das velocidades do vento*. Um exemplo destas curvas é mostrado ao lado e é, basicamente, um gráfico



mostrando o número de horas anuais de ocorrência de cada faixa de velocidade do vento.

Para cada velocidade do vento dentro da faixa de operação da turbina, isto é, para velocidades entre a velocidade de partida e a de corte, a energia produzida anualmente pode ser obtida multiplicando-se o número de horas de sua duração pela correspondente potência gerada nesta velocidade, dada pela específica curva de potência. Daí, a energia total produzida em um ano será a soma destas energias produzidas para cada velocidade do vento dentro da faixa de operação da turbina.

5. Discussões para a implementação

5.1 A escolha do local

Conforme discutido no início deste relatório, a potência que pode ser extraída por uma turbina eólica é proporcional ao cubo da velocidade, daí é óbvia a conclusão de que a escolha do lugar em que será instalado o sistema eólico é fundamental para que se obtenha os melhores desempenhos e se justifique a viabilidade da implementação.

5.1.1 Estimativas das Velocidades do Vento num Local

É claro que o ideal quando se pretende estudar a viabilidade de um determinado lugar para a instalação de turbinas eólicas é que se disponha da *curva de distribuição de frequências das velocidades dos ventos*. Entretanto, estas medições são bastante caras e o que se costuma fazer quando se está ainda em fase de estudos preliminares são estimativas das condições de ventos locais. As técnicas usuais de estimativas são as seguintes:

- **Uso de medições feitas em localidades próximas**

Com o uso de dados disponíveis para um ou mais locais próximos, pode-se, através de interpolações ou extrapolações e do conhecimento de algumas diferenças relevantes entre os sítios, estimar as características dos ventos no lugar em análise.

- **Uso de Mapas e Atlas Eólicos**

Ainda precários e inexistentes para muitas localidades, os mapas e atlas podem fornecer os aspectos eólicos das macro-regiões e, através destes dados, pode-se obter correlações que forneçam o perfil de velocidades e distribuições das velocidades do vento locais.

- **Uso de Simulações e Modelos Computacionais**

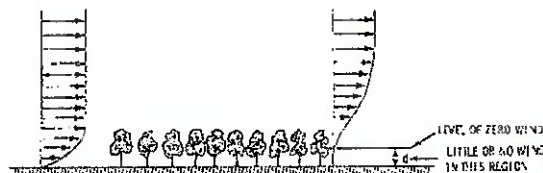
Com dados de localidades próximas e informações topográficas sobre o terreno em estudo, pode-se, através de inúmeros modelos computacionais recentemente desenvolvidos, obter uma aproximação para as características locais dos ventos.

Inúmeras outras técnicas têm sido utilizadas, como, por exemplo, a utilização em conjunto das técnicas anteriormente citadas. Pode-se, também, realizar medições por apenas um curto período de tempo e, daí, com os dados, de locais próximos e topográficos, obter-se uma boa estimativa.

5.1.2. Relevância das Características Topográficas

Um fator que interfere nas velocidades dos ventos e deve ser analisado é a condição topográfica do terreno em estudo para a instalação de turbinas. A seguir serão discutidas algumas características do terreno que afetam as condições dos ventos.

Superfície Acidentada – Acidentes na superfície interferem na suavidade do fluxo de ar e diminuem as velocidades do vento próximo ao solo. Quanto maior a “rugosidade” da superfície, maior a perturbação causada e, portanto, maior a altura em que ainda será sentida esta influência. A influência deste efeito diminui com o aumento da altura.



O perfil vertical da velocidade do vento mudará com a mudança da rugosidade do terreno. Em terrenos “rugosos” como florestas e cidades, uma maior altura será necessária para que se alcance as mesmas condições de vento, tanto em velocidade como em turbulência, no caso se o terreno fosse de superfície suave. A figura mostrada ilustra a mudança no perfil vertical da velocidade do vento quando este vai de uma superfície suave para uma superfície “rugosa”.

Obstáculos – Barreiras isoladas como árvores e prédios podem criar considerável turbulência no vento em todas as direções. Entretanto, os maiores efeitos se dão após as barreiras.

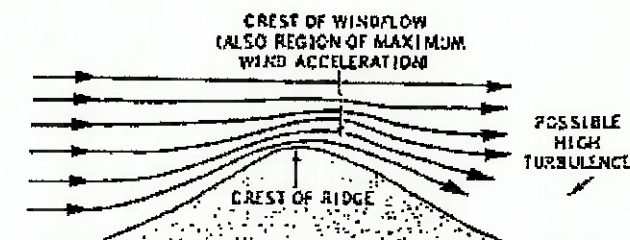
Algumas regras devem ser seguidas para se instalar turbinas eólicas próximo a barreiras isoladas:

- selecionar o local que recebe a mínima influência e perturbações no vento;
- adotar uma distância maior do que 2 vezes a altura da barreira quando da instalação antes desta;
- quando a instalação for feita após a barreira, a turbina deve ser posicionada de modo a estar afastada no mínimo 10 vezes a altura da barreira;
- quando a instalação é feita imediatamente após, a turbina deve ser posicionada no mínimo a 2 vezes a altura da barreira.

Quando houver uma grande distribuição de barreiras, as perturbações no fluxo de ar serão maiores ainda e a recomendação é de que a turbina seja posicionada a uma altura 3 vezes maior do que a maior das barreiras.

Terrenos Elevados – Desde que a potência aumenta com o aumento da velocidade e esta aumenta com a altura em relação ao solo, é substancialmente vantajoso instalar-se turbinas em terrenos elevados como colinas e montanhas. Entretanto, o fluxo de ar é complicado pela forma e pela turbulência ao redor destas.

Além do efeito da altitude, a velocidade do vento também aumenta substancialmente devido à concentração das linhas de fluxo sobre as elevações de terreno. A figura abaixo mostra como o ar é acelerado ao passar sobre um terreno elevado.



A recomendação é que a instalação das turbinas seja feita no topo ou na porção da parte anterior que receba tangencialmente os ventos de maior intensidade.

Penhascos – Estas elevações são definidas como aquelas que têm o seu comprimento superior 10 vezes maior do que sua altura, o que é o suficiente para que o fluxo siga preferencialmente por cima do que ao redor da elevação. Turbulências ocorrem na base e imediatamente após a borda do penhasco. É importante, quando da instalação em penhascos, que a região de perturbações seja bem determinada para evitar que a turbina opere em meio à turbulências.

A recomendação para estes casos é que se escolha penhascos onde os ventos sejam perpendiculares, ou aproximadamente, à face e que as turbinas sejam situadas posteriormente a cerca de 0,25 vezes a altura da elevação.

Vales – A adequação de um vale depende da sua orientação em relação às correntes de ar predominantes, dos declives do vale e das dimensões das montanhas ao seu redor.

Os vales mais adequados terão as seguintes características:

- orientado dentro de 35 graus em relação aos ventos predominantes;
- superfície em declive;
- cercado por montanhas e outras elevações bastante altas;
- deve ser estreito para concentrar os ventos.

Foram apresentados, aqui, brevemente, os principais acidentes em terrenos e suas implicações na instalação de turbinas eólicas. Outras características do terreno podem ser amplamente discutidas, entretanto isto fugiria ao escopo deste trabalho. Mais detalhes sobre este assunto podem ser obtidos no site da Swinburne University of Technology (Austrália): <http://www.swin.edu.au/tafe/indsci/wakeup/wind>.

5.1.3. Correlação da Velocidade do Vento com a Altura

Já foi dito e insistido no fato de que a velocidade dos ventos aumenta, até certo ponto, com o aumento da altura em relação ao solo. Uma avaliação desta característica pode ser feita pela seguinte expressão matemática:

$$V_h / V_{10} = H^n / 10^n$$

onde V_h = velocidade do vento numa dada altura h ;

V_{10} = velocidade do vento numa altura de 10 m acima do solo (altura típica das medições dos ventos);

H^n = altura na qual se deseja obter a velocidade V_h ;

n = expoente que relaciona os perfis de velocidade (uma tabela será apresentada a seguir).

Tabela - Expoente n para diferentes terrenos

Tipo de Terreno	Rugosidade (cm)	Expoente n
------------------------	------------------------	-------------------

Superfícies Suaves

Gelo	0,001	0,08
Lama; lodo	0,04	0,11
Neve	0,1	0,11
Mar	2,0	0,12

Rugosidades Moderadas

Gramma baixa	0,1	0,13
Gramma	3 - 7	0,14
Seara	20	0,16

Terrenos Rugosos

Rural	100	0,2
Rural / árvores	150	0,23

Muito Rugosos

Urbano 1	100	0,25
Urbano 2	400	0,4

5.2 A Escolha da Turbina

A turbina eólica ideal para um determinado local com velocidade média V_m deve ter as seguintes características:

- Velocidade de partida- $V_p = 0,6 V_m$ (m/s)
- Velocidade nominal- $V_n = 2,0 V_m$ (m/s)
- Velocidade de corte- $V_c = 5,0 V_m$ (m/s)
- Diâmetro do rotor- $D = (0,153 \times \text{Energia Anual Produzida}) / (C_o \times V_m)$
- Potência Nominal- $P_n = 0,605 \times C_o \times \text{Área} \times V_n^3$ (Watts)

Obs: Típicos C_o 's para eficientes turbinas – 0,25 a 0,35.

5.3 Uma estimativa da geração elétrica

Uma estimativa inicial que pode ser feita da produção de eletricidade, em kWh por ano, para um certo número de turbinas pode ser dada pela seguinte expressão:

$$\text{Produção Anual de Eletricidade} = K V_m^3 A T$$

onde $K = 2,5$ e é um fator baseado nas características típicas de performance das turbinas, com uma disponibilidade média de 90%, perdas mecânicas de 5% e uma relação aproximada e comum entre a velocidade média dos ventos e sua distribuição em frequência;

A = área varrida pelas pás do rotor;

T = número de turbinas.

6. Discussões sobre Custos

Uma avaliação econômica da energia eólica envolve alguns fatores específicos, que são descritos abaixo:

- A produção anual de energia produzida pelas instalações eólicas;
- O custo de capital da instalação;
- Uma taxa de desconto sobre o capital aplicado, que pode ser uma taxa de oportunidade ou a taxa paga no financiamento;
- A duração do contrato de venda da energia produzida;
- O tempo no qual o capital investido no projeto deve ser completamente pago;
- Os custos de manutenção e operação, incluídos aí a manutenção das turbinas eólicas, seguros, aluguel do terreno, etc.

O custo da energia de fonte eólica é relativamente fácil de ser determinado, já que esta não se utiliza de combustíveis, ao contrário de usinas geradoras que se utilizam de algum tipo de combustível onde o custo futuro deste deve ser estimado. Preços altos ou crescentes de combustível tendem a favorecer a utilização da energia eólica, enquanto preços constantes ou decrescentes são menos favoráveis.

Turbinas eólicas são de instalação bastante rápida, de tal modo que já podem estar gerando energia num curto espaço de tempo, o que favorece financeiramente sua implantação com o investimento dando retorno rapidamente.

O custo de capital das turbinas eólicas varia numa faixa de aproximadamente US\$375 a US\$625 por kW gerado, ou US\$175 a US\$260 por metro quadrado de área varrida pelo rotor. Este custo de capital é uma soma de custos aproximadamente da seguinte forma: 67% na aquisição da turbina, 25% em aluguel de terreno, 0,5% em custos operacionais e 7,5% em outros custos gerais.

O custo da energia elétrica de fonte eólica é muito dependente do modo como o capital é financiado e isto afetará fortemente o valor final da eletricidade produzida.

7. Estudo de Caso

Será agora realizado um estudo sobre o aproveitamento de energia de fonte eólica numa região do nordeste brasileiro. Para a escolha do lugar, dispõe-se de um mapeamento anemométrico realizado pelo Cepel. Uma região favorável, em primeira instância, será escolhida e o objetivo final do estudo será a obtenção do provável custo da energia elétrica de fonte eólica para aquela região.

O estudo será desenvolvido de modo que o sistema seja capaz de gerar a potência de 1MW e algumas hipóteses e possibilidades serão testadas e comparadas.

A escolha do local:

O local escolhido é a região próxima ao Morro do Chapéu no interior da Bahia, já que os dados desta região são bastante completos. Dispõe-se de duas medições diferentes:

- Medição da Rede INMET (a 10 metros do solo)

Período de Observação (ano)	Velocidade Média (m/s)	Velocidade Máxima (m/s)	Direção Predominante
1	3,96	12,00	SE

- Medição da Rede Coelba (a 20 metros do solo)

Período de Observação (ano)	Velocidade Média (m/s)	Velocidade Máxima (m/s)	Direção Predominante
1	5,70	-	-

Para a seleção da turbina adequada ao local escolhido, os seguintes parâmetros devem ser calculados (para uma turbina instalada a 20 metros do solo):

$$V_m = 5,70 \text{ m/s}$$

- Velocidade de partida- $V_p = 0,6 V_m \text{ (m/s)} = 3,42 \text{ m/s}$
- Velocidade nominal- $V_n = 2,0 V_m \text{ (m/s)} = 11,4 \text{ m/s}$
- Velocidade de corte- $V_c = 5,0 V_m \text{ (m/s)} = 28,5 \text{ m/s}$

A seguir serão apresentadas planilhas do Excel onde são calculados os custos aproximados da energia elétrica.

Modelo Escolhido: Bay Winds Modelo 23-10 (HAWT - 3 pás)

Especificações

Velocidade de Partida = 3,57 m/s

Velocidade Nominal = 11,17 m/s

Velocidade de Corte = 54 m/s

Área varrida pelo rotor = 38,6 m²

Potência Nominal = 20 kW

Número de turbinas = Capacidade Total / Potência Nominal = 1000 / 20 = 50 turbinas

Produção Anual de Eletricidade por Turbina = $2,5 V_m^3 A T$ (conforme modelo médio adotado)

$$= 893.556 \text{ kWh}$$

Ano	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Custos de Capital (US\$)									
Custos das Turbinas Eólicas	745.000,00								
Custos de Componentes, Torre, etc.	258.000,00								
Locação da Terra	4.000,00	4.000,00	4.000,00	4.000,00	4.000,00	4.000,00	4.000,00	4.000,00	4.000,00
Fundação									
Instalação e mão-de-obra									
Conexões	4.500,00								
Outros Custos	450,00								
Custos Operacionais e de Manutenção	150.000,00	150.000,00	150.000,00	150.000,00	150.000,00	150.000,00	150.000,00	150.000,00	150.000,00
Totais									
Custo Anual Total	1.161.950,00	154.000,00	154.000,00	154.000,00	154.000,00	154.000,00	154.000,00	154.000,00	154.000,00
Valor Presente dos Custos Totais	1.056.318,18	127.272,73	115.702,48	105.184,07	95.621,88	86.928,99	79.026,35	71.842,14	65.311,03
Energia Anual Produzida			893.556,0	893.556,0	893.556,0	893.556,0	893.556,0	893.556,0	893.556,0
Valor Presente da Energia Produzida	0,0	0,0	671.341,8	610.310,8	554.828,0	504.389,1	458.535,5	416.850,5	378.955,0
Cálculo de Custos									
Taxa de desconto	10%								
Custos									
Valor Presente Total dos Custos	2.227.406,99								
Valor Presente Total da Energia Produzida	6.056.546,3								
Custo da Eletricidade (US\$/kWh)	0,37								

10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
4.000,00	4.000,00	4.000,00	4.000,00	4.000,00	4.000,00	4.000,00	4.000,00	4.000,00	4.000,00	4.000,00
150.000,00	150.000,00	150.000,00	150.000,00	150.000,00	150.000,00	150.000,00	150.000,00	150.000,00	150.000,00	150.000,00
154.000,00	154.000,00	154.000,00	154.000,00	154.000,00	154.000,00	154.000,00	154.000,00	154.000,00	154.000,00	154.000,00
59.373,67	53.976,06	49.069,15	44.608,31	40.553,01	36.866,38	33.514,89	30.468,08	27.698,25	25.180,23	22.891,12
893.556,0	893.556,0	893.556,0	893.556,0	893.556,0	893.556,0	893.556,0	893.556,0	893.556,0	893.556,0	893.556,0
344.504,5	313.185,9	284.714,5	258.831,3	235.301,2	213.910,2	194.463,8	176.785,3	160.713,9	146.103,5	132.821,4

Modelo Escolhido: Nedwind31/3/250 (HAWT - 3 pás)

Especificações

Velocidade de Partida = 4 m/s

Velocidade Nominal = 13 m/s

Velocidade de Corte = 25 m/s

Área varrida pelo rotor = 755 m²

Potência Nominal = 250 kW

Número de turbinas = Capacidade Total / Potência Nominal = 1000 / 250 = 4 turbinas

Produção Anual de Eletricidade por Turbina = $2,5 V_m^3 A T$ (conforme modelo médio adotado)

$$= 1.398.207 \text{ kWh}$$

Ano	1	2	3	4	5	6	7	8
Custos de Capital (US\$)								
Custos das Turbinas Eólicas	1.540.000,00							
Custos de Componentes, Torre, etc.								
Locação da Terra	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00
Fundação								
Instalação e mão-de-obra								
Conexões								
Outros Custos								
Custos Operacionais e de Manutenção	50.000,00	50.000,00	50.000,00	50.000,00	50.000,00	50.000,00	50.000,00	50.000,00
Totais								
Custo Anual Total	1.590.500,00	50.500,00	50.500,00	50.500,00	50.500,00	50.500,00	50.500,00	50.500,00
Valor Presente dos Custos Totais	1.445.909,09	41.735,54	37.941,40	34.492,18	31.356,53	28.505,93	25.914,48	23.558,62
Energia Anual Produzida		1.398.207,0	1.398.207,0	1.398.207,0	1.398.207,0	1.398.207,0	1.398.207,0	1.398.207,0
Valor Presente da Energia Produzida	0,0	0,0	1.050.493,6	954.994,2	868.176,5	789.251,4	717.501,3	652.273,9
Cálculo de Custos								
Taxa de desconto	10%							
Custos								
Valor Presente Total dos Custos	1.829.934,97							
Valor Presente Total da Energia Produzida	9.477.084,1							
Custo da Eletricidade (US\$/kWh)	0,19							

9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00
50.000,00	50.000,00	50.000,00	50.000,00	50.000,00	50.000,00	50.000,00	50.000,00	50.000,00	50.000,00	50.000,00	50.000,00
50.500,00	50.500,00	50.500,00	50.500,00	50.500,00	50.500,00	50.500,00	50.500,00	50.500,00	50.500,00	50.500,00	50.500,00
21.416,93	19.469,94	17.699,94	16.090,86	14.628,05	13.298,23	12.089,30	10.990,27	9.991,16	9.082,87	8.257,15	7.506,50
1.398.207,0	1.398.207,0	1.398.207,0	1.398.207,0	1.398.207,0	1.398.207,0	1.398.207,0	1.398.207,0	1.398.207,0	1.398.207,0	1.398.207,0	1.398.207,0
592.976,3	539.069,3	490.063,0	445.511,8	405.010,8	368.191,6	334.719,6	304.290,6	276.627,8	251.479,8	228.618,0	207.834,6

8. Discussões e Considerações Finais

Os aspectos levantados comprovam a viabilidade atual, em termos operacionais e econômicos, da utilização da energia elétrica de fonte eólica, principalmente como fonte alternativa, aumentando a independência dos combustíveis convencionais, e em lugares onde a utilização de outras fontes encontre problemas de ordem operacional, construtiva, ambiental ou logística.

Deve-se destacar o fato, que em muito favorece esta fonte de energia, de ser esta uma fonte limpa (não produz poluentes diretos) e renovável. Além disso, os recentes progressos tecnológicos, e os que ainda estão por vir, vislumbram um futuro promissor e uma redução ainda maior dos custos da energia gerada, que já alcança valores na faixa de US\$ 0,05 por kWh, de modo que esta deverá ser, num curto espaço de tempo, uma fonte quantitativamente relevante no cenário energético mundial.

Os estudos de caso apresentados contêm, na verdade, um sentido ilustrativo e um modelo para um cálculo mais realístico. Entretanto, certas conclusões bastante úteis podem ser tiradas:

- A comprovação da grande importância da escolha da localidade, visto que a velocidade do vento é fator fundamental na quantidade de energia que será extraída;
- Deve-se efetuar uma análise detalhada sobre as diversas opções disponíveis, principalmente na escolha entre um número maior de turbinas menores ou um número menor de turbinas maiores, já que, conforme os dois casos analisados, isto resulta em grandes diferenças de custos.
- Um fator que influi de modo fundamental nos custos da energia gerada é a taxa de desconto utilizada, de modo que financiamentos com um alto custo inviabilizam completamente a empreitada..

9. Bibliografia

1. Kahn, Edward – The Compatibility of Wind and Solar Technology with Conventional Energy Systems, *Annual Review of Energy* – 1979;
2. Smith, D. R. - The Wind Farms of The Altamont Pass Area – *Annual Review of Energy* – 1987;
3. Merriam, Marshal F. - Wind, waves and tides, *Annual Review of Energy* – 1978;
4. Giguère, P; Selig, M. S. – Desirable Airfoil Characteristics for Large Variable-Speed Horizontal Axis Wind Turbines – *Journal of Solar Energy* – August, 1997
5. OECD/IEA– Guidelines for the Economic Analysis of Renewable Energy Technology Applications; International Energy Agency, 1991
6. Boyle, Godfrey; Edited by – Renewable Energy Power for a Sustainable Future – Oxford University Press in Association with The Open University, 1996
7. Endereços na Internet:

<http://www.igc.org/awea/>

Site da “American Wind Energy Association”.

<http://www.cepel.br>

Site do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – Empresa de Sistema Eletrobrás.

<http://www.swin.edu.au/tafe/indsci/wakeup/wind>

Site da Swinborne University of Technology (Austrália).

<http://www.vestas.dk>

Site da Vestas Wind Systems A/S – uma das maiores fabricantes mundiais de turbinas eólicas.

<http://www.windpower.dk>

Associação dos Fabricantes de Turbinas Eólicas da Dinamarca.