2. Fundamentos da Energia Eólica

2.1 Origem

O vento – atmosfera em movimento – tem sua origem na associação entre a energia solar e a rotação planetária. Todos os planetas envoltos por gases em nosso sistema solar demonstram a existência de distintas formas de circulação atmosférica e apresentam ventos em suas superfícies. Trata-se de um mecanismo solar-planetário permanente; sua duração é mensurável na escala de bilhões de anos. O vento é considerado *fonte renovável de energia*.

2.2 Histórico

Os primeiros aproveitamentos da força dos ventos pelo homem têm data bastante imprecisa, mas, certamente, ocorreram há milhares de anos, no Oriente. Eram provavelmente máquinas que utilizavam a força aerodinâmica de arrasto, sobre placas ou velas, para produzir trabalho.

Estima-se que a partir da Idade Média o homem passou a utilizar em maior escala as forças aerodinâmicas de sustentação, permitindo as grandes navegações e também maior eficiência às máquinas eólicas. Possivelmente, máquinas eólicas movidas por forças de sustentação foram introduzidas na Europa pelas Cruzadas, por volta do século XI [8]. O certo é que no século XIV, na Holanda, essas máquinas já apresentavam grande evolução técnica e de capacidade em potência e ampla aplicação como fonte de energia, principalmente em moagem de grãos, serrarias e bombeamento d'água. À época da descoberta do Brasil, em 1500, havia muitos milhares de moinhos de vento em toda a Europa, da Península Ibérica aos países nórdicos. Durante os séculos seguintes, as máquinas eólicas tiveram grandemente expandida a sua aplicação na Europa: em fabricação de papel para atender à demanda após a invenção da imprensa, em produção de óleos vegetais e até em grandes projetos de drenagem [8]. Com a expansão do uso de máquinas a vapor, no século XIX, os moinhos de vento europeus entraram gradualmente em desuso.

Outro surto de aplicação em larga escala de máquinas eólicas deu-se nos Estados Unidos, no século XIX. Após a abolição da escravatura naquele país, em 1863, inicia-se a disseminação da utilização do catavento multipá para bombeamento d'água. Cataventos multipás chegaram a ser produzidos industrialmente em escalas de centenas de milhares de unidades/ano, por diversos fabricantes, o que possibilitou preços acessíveis a grande parte da população. Ao mesmo tempo em que constituiu um importante fator da economia, muitos historiadores atribuem parcela do sucesso e da rapidez da expansão colonizadora do Oeste à disponibilidade de cataventos multipás de baixo custo – que facilitaram o acesso à água e a fixação de apoios em grandes áreas áridas ou semiáridas. A tabela 2.1 transcreve o U.S. Statistical Abstract de 1919 [9], que reporta a evolução da indústria de cataventos multipás nos EUA ao longo de 40 anos. Estima-se que mais de 6 milhões de cataventos multipás já foram produzidos no mundo [8].

ANO	EMPREGADOS	FATURAMENTO (US$)
1879	596	1.011.000
1889	1110	2.475.000
1899	2045	4.354.000
1909	2337	6.677.000
1919	1932	9.933.000

Tabela 2.1 – Indústria de cataventos multipás nos EUA [13]

O uso do catavento multipás estadunidense expandiu-se pelos diversos continentes, inclusive no Brasil. Na década de 1880 encontrava-se quase uma dezena de fabricantes, em todo o país.

Para a geração de energia elétrica, também nos Estados Unidos, a partir da década de 1930, iniciou-se uma ampla utilização de pequenos aerogeradores para carregamento de baterias, o que favoreceu o acesso à energia elétrica aos habitantes do meio rural. Entre 1930 e 1960, dezenas de milhares desses aerogeradores foram produzidos e instalados nos Estados Unidos, bem como exportados para diversos países. A produção dessas máquinas foi desativada gradualmente nas décadas de 1950 e 1960, à medida que as redes de eletrificação passaram a dominar o atendimento rural.

A geração de eletricidade em grande escala, para alimentar de forma suplementar o sistema elétrico com o uso de turbinas eólicas de grande porte, é tecnologia que existe há diversas décadas. Desde a fase experimental, ressaltam-se os primeiros aproveitamentos eólio-elétricos realizados durante as décadas de 1940 e 1950 nos Estados Unidos (Smith-Putnam) e Dinamarca (Gedser). Pode-se dizer que o precursor das atuais turbinas eólicas surgiu na Alemanha (Hütter, 1955), já com pás fabricadas em materiais compostos, controle de passo e torre tubular esbelta.

Na década de 1970 e até meados da década de 1980, após a primeira grande crise de preços do petróleo, diversos países – inclusive o Brasil – dispenderam esforços em pesquisa sobre utilização da energia eólica para a geração elétrica. Data dessa época a turbina DEBRA 100kW, desenvolvida em conjunto entre os institutos de pesquisa aeroespacial do Brasil e da Alemanha (DEBRA = DEutsche BRAsileira).

Entretanto, foi a partir de experiências de estímulo ao mercado, realizadas na Califórnia (década de 1980), Dinamarca e Alemanha (década de 1990), que o aproveitamento eólio-elétrico atingiu escala de contribuição mais significativa ao sistema elétrico, em termos de geração e economicidade. O desenvolvimento tecnológico passou a ser conduzido pelas nascentes indústrias do setor, em regime de competição, alimentadas por mecanismos institucionais de incentivo – especialmente via remuneração pela energia produzida. Características também marcantes desse processo foram: (a) devido à modularidade, o investimento em geração elétrica passou a ser acessível a uma nova e ampla gama de investidores; (b) devido à produção em escalas industriais crescentes, o aumento de capacidade unitária das turbinas e novas técnicas construtivas, possibilitaram-se reduções graduais e significativas no custo por kilowatt instalado e, conseqüentemente, no custo de geração. O principal problema ambiental inicial – impactos das pás em pássaros – praticamente desapareceu com as turbinas de grande porte e menores velocidades angulares dos rotores. Por se mostrar uma forma de geração praticamente inofensiva ao meio ambiente, sua instalação passou a simplificar os minuciosos – e demorados – estudos ambientais requeridos pelas fontes tradicionais de geração elétrica, bastando, em muitos casos, aos poderes concedentes a delimitação das áreas autorizadas para sua instalação. Esse último fato, aliado às escalas industriais de produção de turbinas, tornaram a geração eólio-elétrica uma das tecnologias de maior crescimento na expansão da capacidade geradora. A figura 2.1 apresenta a evolução cumulativa da capacidade eólio-elétrica instalada no mundo, até 31/12/2000 [10, 11].

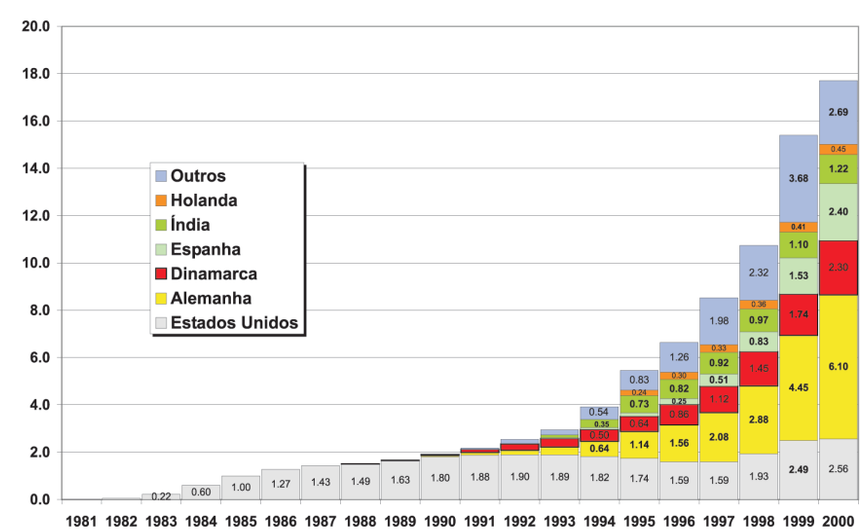

Figura 2.1 – Evolução mundial da capacidade eólico-elétrica instalada, em GW [9, 10]

Como exemplo, apenas na Alemanha – densamente povoada – foram adicionados 1.665 MW eólio-elétricos no ano 2000, totalizando 6.094,8 MW instalados naquele país até 31/12/2000 [10]. Em 2000, o incremento da capacidade eólica também foi notável na Espanha, Índia e China.

2.3 Princípios e Tecnologia

Uma turbina eólica capta uma parte da energia cinética do vento que passa através da área varrida pelo rotor e a transforma em energia elétrica. A potência elétrica é função do cubo da velocidade de vento **v**:

$$P(Watts) = \frac{1}{2}\rho A_r v^3 C_p \eta$$

ρ = densidade do ar em kg/m^3
$\mathbf{A}_r = \pi.\mathbf{D}^2/4$, em que **D** é o diâmetro do rotor
$\mathbf{C}_p$ = coeficiente aerodinâmico de potência do rotor
η = eficiência do conjunto gerador/transmissão

A absorção de energia cinética reduz a velocidade do vento a jusante do disco do rotor; gradualmente, essa velocidade recupera-se ao misturar-se com as massas de ar predominantes do escoamento livre. Das forças de sustentação aerodinâmica nas pás do rotor resulta uma esteira helicoidal de vórtices, a qual também gradualmente dissipa-se. Após alguma distância a jusante da turbina, o escoamento praticamente recupera as condições de velocidade originais e turbinas adicionais podem ser instaladas, minimizando as perdas de desempenho causadas pela interferência da turbina anterior. Na prática, essa distância varia com a velocidade do vento, as condições de operação da turbina, a rugosidade de terreno e a condição de estabilidade térmica vertical da atmosfera. De modo geral, uma distância considerada segura para a instalação de novas turbinas é da ordem de 10 vezes o diâmetro **D**, se instalada a jusante, e 5 vezes **D**, se instalada ao lado, em relação ao vento predominante (figura 2.2).

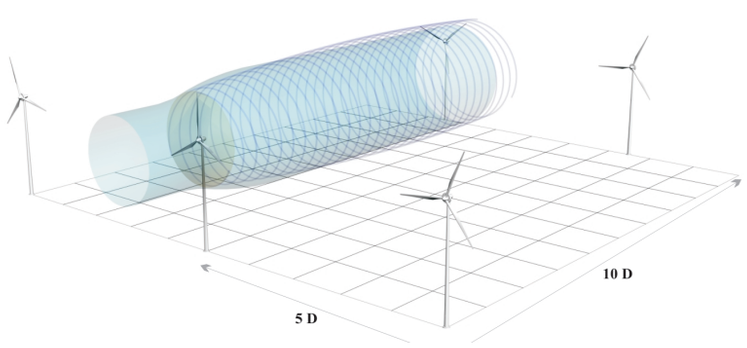

Figura 2.2 – Esteira aerodinâmica e afastamento entre turbinas eólicas

A velocidade angular do rotor é inversamente proporcional ao diâmetro **D**. Usualmente, a rotação é otimizada no projeto, para minimizar a emissão de ruído aerodinâmico pelas pás. Uma fórmula prática para a avaliação da rotação nominal de operação de uma turbina eólica é:

rpm = 1150/**D**

À medida que a tecnologia propicia dimensões maiores para as turbinas, a rotação reduz-se: os diâmetros de rotores no mercado atual variam entre 40m e 80m, o que resulta em rotações da ordem de 30rpm a 15rpm, respectivamente. As baixas rotações atuais tornam as pás visíveis e evitáveis por pássaros em vôo. Quanto aos níveis de ruído, turbinas eólicas satisfazem os requisitos ambientais mesmo quando instaladas a distâncias da ordem de 300m de áreas residenciais. Esses aspectos contribuem para que a tecnologia eólio-elétrica apresente o mínimo impacto ambiental, entre as fontes de geração na ordem de gigawatts.

Figura 2.3 – Usina eólico-elétrica da Prainha, Ceará

Uma usina eólica é um conjunto de turbinas eólicas dispostas adequadamente em uma mesma área (figuras 2.2 e 2.3). Essa proximidade geográfica tem a vantagem econômica da diluição de custos: arrendamento de área, fundações, aluguel de guindastes e montagem, equipes de operação, manutenção e estoques de reposição. Usinas eólicas com turbinas de projeto consolidado e equipes de manutenção adequadamente capacitadas apresentam fatores de disponibilidade típicos da ordem de 0,98.

A figura 2.4 mostra a forma típica de curva de potência de turbinas eólicas, e a figura 2.5, diferentes fases de sua fabricação. Usualmente, a geração elétrica inicia-se com velocidades de vento da ordem de 2,5 - 3,0m/s; abaixo desses valores, o conteúdo energético do vento não justifica aproveitamento. Velocidades superiores a aproximadamente de 12,0m/s a 15,0m/s ativam o sistema automático de limitação de potência da máquina, que pode ser por controle de ângulo de passo das pás ou por estol aerodinâmico, dependendo do modelo de turbina. Em ventos muito fortes (v > 25m/s no exemplo), atua o sistema automático de proteção. Ventos muito fortes têm ocorrência rara e negligenciável em termos de aproveitamento e a turbulência associada é indesejável para a estrutura da máquina; nesse caso, a rotação das pás é reduzida (passo ou estol) e o sistema elétrico do gerador é desconectado da rede elétrica.

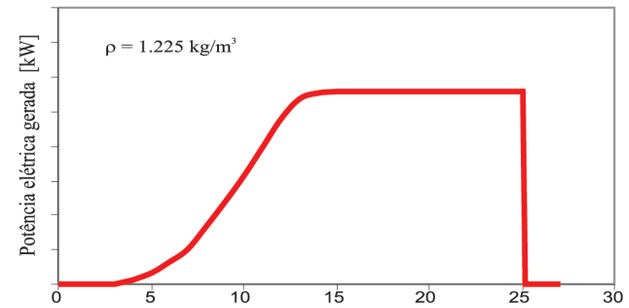

Figura 2.4 – Curva típica de potência de turbinas eólicas

Turbinas eólicas de grande porte têm controle inteiramente automático, por meio de atuadores rápidos, software e microprocessadores alimentados por sensores duplos em todos os parâmetros relevantes. Usualmente, utiliza-se telemetria de dados para monitoramento de operação e auxílio a diagnósticos/manutenção.

As curvas de potência fornecidas por fabricantes de turbinas, geralmente medidas por órgãos credenciados e independentes, usualmente referem-se a velocidades de vento quase instantâneas (médias de 10 minutos) e densidade r = 1,225kg/m^3 (ISA, 15°C ao nível do mar). No caso das temperaturas de grande parte do território brasileiro, correções para a densidade do ar local são necessárias.

O cálculo da energia gerada – anual ou mensal – é realizado pela multiplicação dos valores de potência gerada pelo tempo de duração de ocorrência associado a intervalos de velocidades de vento. A duração de ocorrência de uma velocidade **v** é aproximada por equações estatísticas (usualmente Rayleigh ou Weibull). A distribuição mais geral de Weibull é discutida no próximo capítulo.

Figura 2.5 – Vista geral da fabricação das pás e montagem da nacele (cortesia Wobben-ENERCON E TECSIS)