

TURBINAS E GERAÇÃO EÓLICA

1.1 INTRODUÇÃO

A energia eólica é a energia contida nos ventos, independentemente da sua aplicação.

Suas principais características, como custo zero do insumo e disponibilidade infundável, tornam seu uso atrativo para diversas aplicações, como a movimentação de barcos a vela, bombeamento de água, moinhos e geração de eletricidade. Esta última, objeto deste trabalho, ainda se destaca das fontes concorrentes por sua operação não produzir gases de efeito estufa, pelo não comprometimento total do terreno e pelo baixo custo de geração.

Características básicas da geração de energia elétrica a partir de fonte eólica, são apresentadas neste capítulo, incluindo a evolução da instalação da geração eólica no mundo, a modelagem do vento, bem como aspectos da evolução tecnológica e dos tipos de turbinas eólicas.

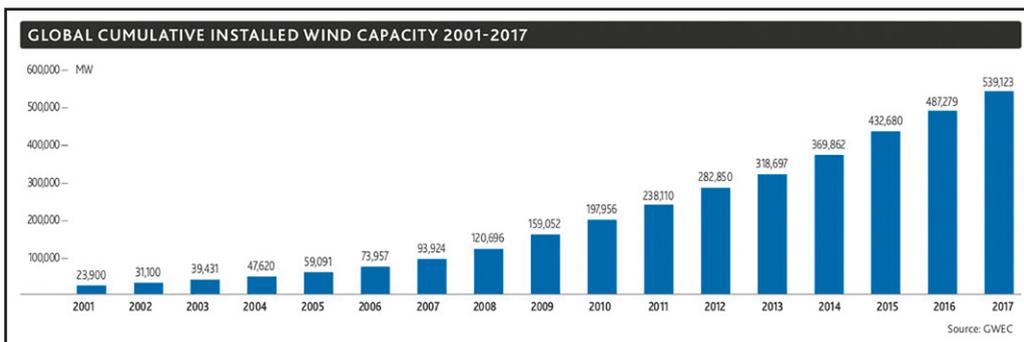
A geração de energia elétrica a partir de fonte eólica é expressa neste texto como “geração de energia eólica” ou simplesmente “geração eólica”, subentendendo-se que se refere à produção de energia elétrica.

1.2 A ENERGIA EÓLICA NO BRASIL E NO MUNDO

A história da geração de energia eólica se inicia na Escócia em 1887 com a construção do primeiro aerogerador, capaz de abastecer um sistema de baterias para atendimento da iluminação de uma residência (Price, 2005). Os registros de sincronização à rede, entretanto, datam apenas de 1931, em Balaklava, na URSS, já com rotor de dimensão de 30 metros e potência de 100 kW (Hau, 2006). A evolução nos anos seguintes foi ambiciosa e em 1941 era inaugurada em Vermont, EUA, uma turbina de 1,25 MW, a primeira acima de um megawatt. Todavia, a ousadia durou apenas 1100 horas de operação, quando ocorreu um defeito em uma das pás e o período de guerra não permitiu sua manutenção (Renewable Energy Vermont, 2019). Nenhuma outra tentativa deste porte foi realizada por quase quatro décadas, quando entre as décadas de 70 e 80, foram desenvolvidas e implementadas diferentes iniciativas, especialmente nos EUA e na Dinamarca, com significativa participação tecnológica da Alemanha. Os dois últimos continuaram como os precursores da tecnologia na Europa, sendo os principais responsáveis por tornar a Europa o maior mercado de geração eólica ainda no final dos anos 90.

Em termos globais, a evolução da capacidade instalada no início deste século (Figura 1.1) apresentou significativo crescimento, partindo de pouco menos de 24 GW em 2001 para 539 GW em 2017. Esses anos foram marcados por uma revolução tecnológica que fez com que novas empresas de diversos países entrassem na corrida para o desenvolvimento de turbinas eólicas mais eficientes e de potência nominal mais elevada. Atualmente a China se tornou o maior mercado mundial com 35 % de participação, seguida pelos EUA com 17 % e pela Alemanha com 10 %.

Figura 1.1 Capacidade instalada acumulada no mundo



A geração de energia eólica no Brasil não seguiu a tendência mundial de perto. Apesar do marco inicial datar de 1992 com a instalação da primeira turbina no sistema isolado de Fernando de Noronha, a fonte só teve a devida atenção após a realização do PROINFA (Programa de Incentivo às Fontes Alternativas) em 2002. O programa teve preços elevados e prazos de instalação diversas vezes postergados, porém é considerado um sucesso por ter viabilizado a entrada da tecnologia no país, desenvolvendo fornecedores, fabricantes e instaladores, entre outros.

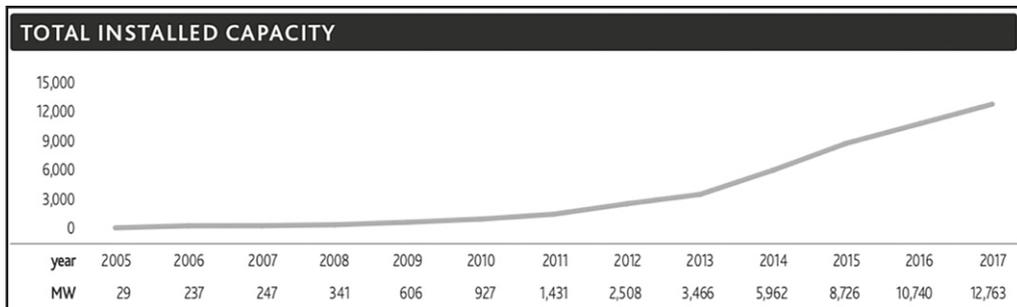
Com o segundo leilão de energia de reserva realizado em 2009, o primeiro voltado exclusivamente à fonte eólica, o desenvolvimento do setor no Brasil finalmente engrenou com a contratação de 1,8 GW de capacidade (Associação Brasileira de Energia Eólica, 2018).

Nessa época, poucos fabricantes e integradores estavam presentes no Brasil e nem todos ofereciam contratos que incluíam a operação e manutenção dos parques, essenciais para reduzir os riscos do investidor, uma vez que a disponibilidade de profissionais especializados era restrita. Inclusive alguns fabricantes ofertavam suas turbinas com entrega do tipo CIF, onde o investidor assumia toda a responsabilidade desde a retirada no porto, passando por transporte e instalação, até a performance e operação da usina.

Desde então, com a realização de outros leilões, a entrada de novos fornecedores e a redução dos preços dos equipamentos e da instalação, a fonte se tornou altamente competitiva no mercado nacional, não dependendo mais de compras incentivadas e ultrapassando, em preço, as tradicionais hidrelétricas.

Ao final de 2017, 15 anos após o início do PROINFA e 8 anos após o primeiro leilão, o Brasil atingiu a capacidade instalada de 12.763 MW, colocando-o na oitava posição dos maiores mercados de energia eólica do mundo. Nesse ano a produção de energia das eólicas representou 7,4 % do total da energia gerada no país. A evolução da capacidade instalada desse período é ilustrada na Figura 1.2 (GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL, 2018).

Figura 1.2 Capacidade instalada acumulada no Brasil
(GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL, 2018)



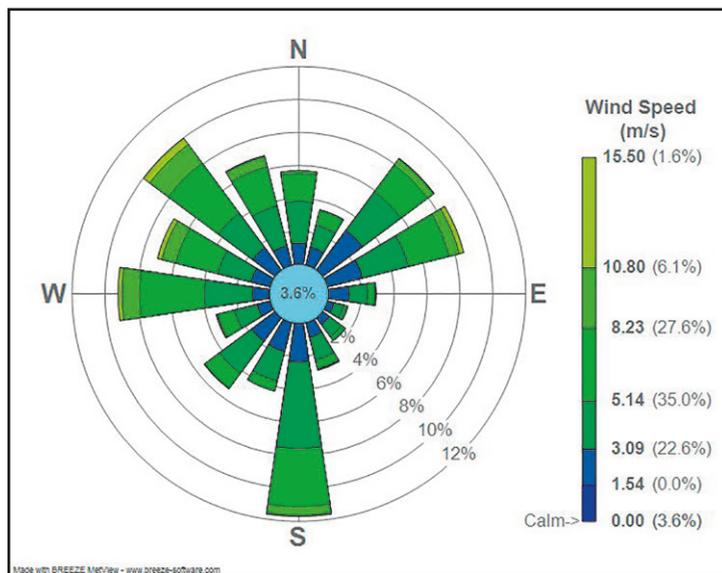
1.3 CARACTERÍSTICAS DO VENTO

O insumo energético das turbinas eólicas é o vento, que não gera emissões de gases de efeito estufa e não tem custo. Porém, este recurso não é controlável e não pode ser armazenado, diferentemente da vazão de água em represas de usinas hidrelétricas.

Além da impossibilidade de controle, o vento apresenta características aleatórias de velocidade e de direção. Adicionalmente, estas características são dependentes da geografia do local, do clima e da altura em relação ao solo.

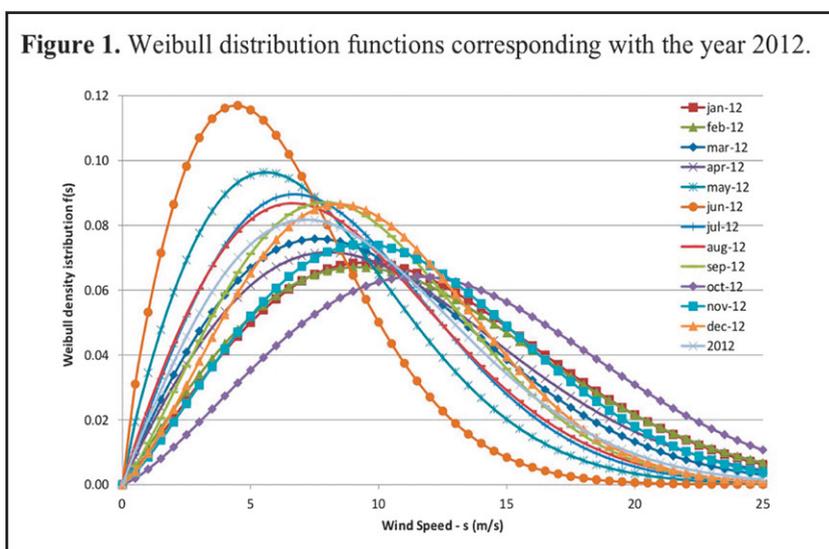
Um exemplo das variações da velocidade e da direção do vento pode ser observado na rosa dos ventos da Figura 1.3. O tamanho de cada fatia indica a frequência de ocorrência de vento em determinada direção, demonstrando a(s) sua(s) direção(ões) predominante(s), porém ainda sem confirmação da direção de maior disponibilidade de energia, pois esta depende prioritariamente da velocidade do vento. Em outras palavras, a ocorrência de ventos fracos em determinada direção, por exemplo em 90 % do tempo pode fornecer energia inferior a outra direção que apresente ventos fortes em apenas 10 % do tempo, nesse exemplo. Para esta avaliação complementar, pode-se observar que o comprimento das fatias é subdividido em partes de diferentes cores, que representam a velocidade (pela cor) e sua ocorrência (pelo tamanho).

Figura 1.3 Rosa dos ventos para uma cidade do Nordeste



A análise pormenorizada das ocorrências e intensidades da velocidade do vento em qualquer direção, permite em geral, a conclusão que sua variação tem o comportamento típico de uma distribuição de probabilidades de Weibull, ilustrada na Figura 1.4.

Figura 1.4 Distribuição de Weibull



Na figura anterior também se pode observar a diferença da distribuição para meses distintos. Isto ocorre pois o vento é dependente do clima do local e, apesar de manter a característica da distribuição, tem forma e escala distintas para cada período.

Sendo assim, para a avaliação da viabilidade de um projeto de usina eólica, o correto levantamento da rosa dos ventos e da distribuição da velocidade do vento é fundamental. Este levantamento é realizado tendo por referência normas técnicas e através de instrumentos de medição certificados, como o anemômetro (velocidade) e a biruta (direção), entre outras grandezas (temperatura, umidade, direção do vento em 3D etc.)¹.

As medições, em geral, são realizadas em alturas padrão, posteriormente corrigidas para a de instalação da turbina. A variação da velocidade do vento em relação à altura do solo é dada pela lei de potência da equação seguinte (Wagner, Courtney, Gottschall, & Lindelöw-Marsden, 2011):

$$v = v_0 \left(\frac{h}{h_0} \right)^\alpha \quad (1)$$

Onde h_0 é a altura da medição, h é a altura onde se quer estimar a velocidade, v_0 é a velocidade medida na altura h_0 , α é o coeficiente da lei de potência e v é a velocidade estimada para a altura h .

Do ponto de vista da geração, alturas maiores são mais desejadas por apresentarem melhor estabilidade da velocidade do vento e menor turbulência, entrando em conflito com as necessidades construtivas da torre, que deve suportar maior peso e maiores esforços mecânicos.

1.4 EVOLUÇÃO DAS TURBINAS EÓLICAS

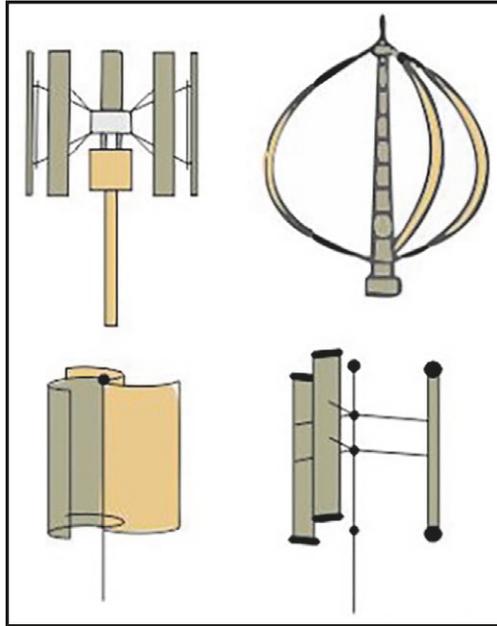
Desde o início do desenvolvimento das turbinas eólicas, diversas configurações foram propostas e construídas: turbinas com eixos vertical e horizontal; com uma, duas ou três pás; com ou sem caixa de engrenagens; com ou sem rotação das pás para controle de potência; e operação com velocidade fixa ou variável. Essas características, entre outras relacionadas aos projetos de aerogeradores, são apresentadas a seguir.

¹ A regulamentação brasileira atualmente exige medições com duração mínima de três anos para a avaliação da capacidade de geração de um empreendimento participante dos leilões do mercado regulado.

1.4.1 Turbinas de Eixo Vertical

Alguns dos projetos de turbinas de eixo vertical podem ser vistos na Figura 1.5. Este tipo de projeto chamou a atenção dos projetistas pois permite que todos os equipamentos fossem montados ao nível do solo, ao passo que nas turbinas de eixo horizontal, os equipamentos são alocados na nacelle, situada na parte superior da torre.

Figura 1.5 Turbinas eólicas de eixo vertical



Além disso, como as turbinas de eixo vertical apresentam as mesmas propriedades em todas as direções (omnidirecionais), a direção da velocidade do vento não importa, portanto, nenhum sistema de controle específico para rastrear a direção do vento é necessário. Duas desvantagens inviabilizaram este conceito de turbina: baixo coeficiente de potência, ou seja, para a mesma velocidade de vento, gera menos do que uma turbina de eixo horizontal e também a necessidade de tirantes para fixação da parte superior da turbina, o que torna difícil a construção de turbinas de grande porte (European Wind Energy Association and Others, 2012).

Aplicação prática

As experiências do mercado apontaram, como opção típica, o uso de eixo horizontal, sempre com três pás e o recurso de rotação destas para limitação da potência gerada, utilizando velocidade de rotação variável para maximização da geração de energia.

Em paralelo, nas aplicações de pequeno porte as turbinas de eixo vertical ganharam mercado, principalmente por possuir menores dimensões e maior facilidade de aplicação, não apresentando, tecnologicamente, grandes vantagens em relação às horizontais.

1.4.2 Turbinas com Uma e Duas Pás

A maioria das turbinas eólicas modernas possui o rotor aerodinâmico composto por três pás. Porém, rotores com uma e duas pás também foram considerados no passado. O aumento do número de pás em um rotor aerodinâmico afeta propriedades como eficiência da turbina, solicitações mecânicas da torre, além de poluição sonora e visual.

O projeto com apenas uma pá no rotor aerodinâmico apresenta como vantagem a estratégia de parada da fazenda eólica em casos de tempestades e rajadas de vento. Porém a necessidade de um contrapeso, para contrabalancear, a única pá no rotor causa uma diminuição em sua eficiência. Além disso, esse tipo de projeto não atende os atuais padrões de poluição sonora existentes, devido as altas velocidades de rotação que apresentam.

O projeto com duas pás aumenta a eficiência da turbina, porém as altas velocidades do rotor continuam transgredindo os níveis de poluição sonora, em desacordo com os limites admitidos.

1.4.3 Limitação de Potência Nominal da Turbina

Conforme a velocidade do vento aumenta, a potência gerada pelo gerador eólico aumenta com uma relação quadrática. Porém, quando o gerador atinge a sua potência nominal, a captura de energia do vento deve ser limitada para evitar danos ao gerador com o aumento da velocidade do vento. Os dois principais mecanismos para a limitação de potência são o estol (*stall*, do inglês) e o controle de ângulo das pás (*pitch control*).

Até a metade dos anos 90, as turbinas com limitação da potência nominal por estol (o projeto dinamarquês) dominavam o mercado pelo projeto de rotor aerodinâmico simplificado e com menores custos (Earnest & Wizelius, 2011). A regulação de potência por estol é um método passivo e exige uma conexão a uma

rede elétrica forte (com elevada potência de curto-circuito) e a manutenção da velocidade da turbina eólica constante. A regulação de potência por estol consiste no projeto de um rotor aerodinâmico que perca boa parte de sua eficiência em velocidades acima da velocidade nominal da turbina. As pás se deformam plasticamente quando a potência nominal da turbina eólica é ultrapassada e retorna a sua forma original quando essa potência volta para um ponto de operação abaixo no nominal. Normalmente, este conceito de limitação de potência é utilizado em conjunto com geradores de indução de rotor em gaiola de esquilo por terem como característica principal a operação em velocidade fixa.

No começo dos anos 90, a técnica de controle do ângulo das pás começou a ser mais utilizada. O chamado *pitch control* consiste no uso de um sistema de controle capaz de girar as pás em seus respectivos eixos transversais fazendo com que o ângulo das pás em relação ao vento seja modificado. A rotação pode ser feita para aumentar ou diminuir a captura de energia. Esta técnica não exige a manutenção de uma velocidade constante da turbina, permitindo que seja combinada com geradores de indução duplamente alimentados, por exemplo, que operam em velocidade variável para maximizar a geração. As turbinas eólicas com *pitch control* permitem maior nível de controle, que é uma característica desejável para operação de redes elétricas com grandes turbinas.

1.4.4 Operação em Velocidade Fixa e Variável

Inicialmente, a maioria das turbinas eólicas apresentava velocidade fixa, de modo que a entrada em operação era feita de forma a acelerar o gerador ainda desconectado da rede elétrica com uma fonte de energia auxiliar até atingir a velocidade adequada, quando era conectado à rede elétrica, de modo que a tensão e frequência da rede elétrica mantinham a velocidade da turbina constante.

Subsequentemente, a operação com velocidade variável foi possível graças aos avanços na eletrônica de potência. Este tipo de operação permite que a velocidade do gerador seja escolhida de forma a maximizar a conversão da energia em função da velocidade do vento. Para velocidades do vento abaixo da nominal (velocidade na qual a potência gerada se iguala à potência nominal) a turbinas com operação em velocidade variável geram mais energia do que aquelas que só operam em velocidade fixa.

Quando a velocidade nominal do gerador é atingida, alguma das estratégias discutidas anteriormente, estol ou giro das pás, deve ser empregada para limitar a velocidade do gerador e, por consequência, a sua potência. A aplicação da

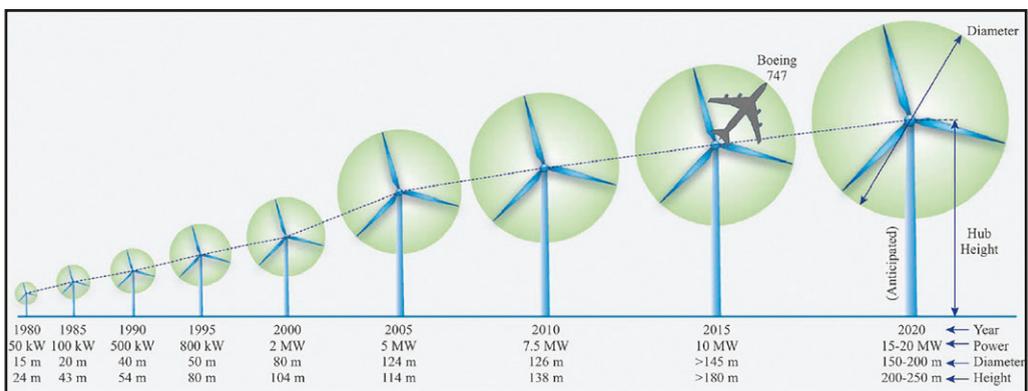
limitação por estol em turbinas com velocidade variável não tem sido adequada, de modo que as turbinas modernas utilizam operação com velocidade variável com controle de ângulo das pás.

1.5 TURBINAS EÓLICAS MODERNAS

Os fabricantes de turbinas eólicas venceram desafios importantes de engenharia desenvolvendo projetos economicamente viáveis e competitivos (European Wind Energy Association and Others, 2012), mesmo em relação as outras fontes de geração. Após décadas de pesquisa com avanços e conflitos, o projeto da turbina eólica moderna vem se consolidando, havendo consenso, atualmente na tecnologia fundamentada em turbinas de três pás, eixo horizontal, velocidade variável e controle de ângulo de pás para a limitação da potência nominal do gerador.

Esta convergência é função de pesquisa e desenvolvimento, mas também do aprendizado acumulado e adquirido com erros e acertos dos fabricantes realizados ao longo de vários anos, que resultou no aumento do tamanho das turbinas eólicas de 25 kW para 9.500 kW nos últimos 30 anos. A evolução do tamanho das turbinas eólicas comerciais pode ser vista na Figura 1.6.

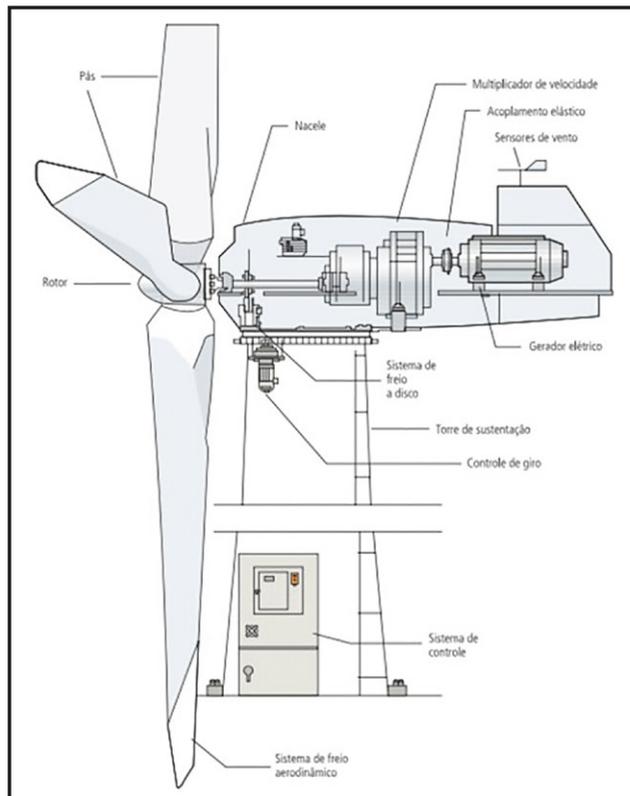
Figura 1.6 Evolução do tamanho da turbina eólica comercial, título: High-Power Wind Energy Conversion Systems: State-of-the-Art and Emerging Technologies, autores: Venkata Yaramasu, Bin Wu, Paresh C. Sen, Samir Kouro, Mehdi Narimani, publicação: Proceedings of the IEEE | Vol. 103, No. 5, May 2015



A turbina eólica moderna e seus principais componentes são mostrados na Figura 1.7, onde se observam seus três principais componentes: a torre, o rotor e a nacelle.

A torre é a responsável por fornecer a sustentação mecânica à turbina. O rotor é composto pelo cubo (*hub*, em inglês) e pelas pás. A nacele está montada sobre o sistema de guinada (*yawing*) da turbina, que é responsável por seguir a direção do vento, fazendo com que a turbina esteja, idealmente, sempre perpendicular ao vento incidente. A nacele abriga a caixa de engrenagens (quando existente) e o gerador elétrico. Normalmente, para a minimização das perdas, o transformador também se encontra instalado no interior da nacele.

Figura 1.7 Turbina eólica moderna e seus equipamentos



Os sistemas de controle de uma turbina eólica moderna são compostos pelo controle de guinada, o controle de ângulo das pás e o controle da busca do ponto de máxima potência (MPPT, do inglês *Maximum Power Point Tracking*). Em relação ao tipo de gerador utilizado nota-se que ainda não há consenso sobre a melhor solução, sendo adotados geradores síncronos e assíncronos.

1.6 TURBINAS EÓLICAS DE PEQUENO PORTE

A definição de turbinas de pequeno porte foi revista com a evolução da tecnologia, principalmente pelo surgimento das grandes turbinas para aplicação no mar (chamadas de *off_shore*). Atualmente, o padrão IEC, por exemplo, estabelece que são turbinas eólicas de pequeno porte aquelas inferiores a 100 kW.

As turbinas eólicas de pequeno porte são utilizadas, principalmente, em duas aplicações: geração de energia em sistemas elétricos isolados e na geração distribuída. A aplicação em sistemas isolados, como pequenos navios, eletrificação de fazendas e eletrificação de vilarejos é uma alternativa aos tradicionais sistemas de geração a diesel. A Figura 1.8 apresenta algumas aplicações de turbinas eólicas de pequeno porte.

Figura 1.8 Aplicações de turbinas eólicas de pequeno porte

Rated power/system	Wind-diesel								Wind mini-farm								
	Wind hybrid				Single wind turbine				Build integrated								
	Wind home system																
P < 1kW	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X					
1kW < P < 7kW	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	
7kW < P < 50kW					X	X	X	X	X			X	X	X	X	X	
50 kW < P < 100kW								X	X					X	X	X	
Small wind systems applications	Sailboats	Signalling	Street lamp	Remote houses/dwellings	Farms	Water pumping	Seawater desalination	Village power	Mini-grid	Street lamp	Buildings rooftop	Dwellings	Public centres	Car parking	Industrial	Industrial	Farms
	Offgrid applications									On-grid applications							

Além de serem sistemas que geram emissões de gases estufa, os sistemas de geração a diesel possuem um elevado custo de combustível que pode ser ainda maior dependendo do transporte envolvido para que o combustível chegue às comunidades isoladas. Um sistema de fornecimento de energia confiável e amigável ao meio ambiente pode ser projetado combinando turbinas eólicas e sistemas de armazenamento de energia com os sistemas a diesel.

As aplicações de turbinas eólicas de pequeno porte para geração distribuída são menos usuais atualmente devido aos altos custos das turbinas. As turbinas eólicas de pequeno porte custam em média cerca de 10.000 US\$/kW instalado

(Orrell, et al., 2018). Para efeito de comparação, uma turbina eólica de grande porte, instalada em 2017, custou cerca de 1.600 US\$/kW (Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, 2018).

Por conta de seu custo elevado, a aplicação de turbinas eólicas na geração distribuída depende dos preços da energia elétrica praticados no mercado e dos programas de incentivo. Programas como as *Feed-in Tariffs* ou o *net-metering* podem incentivar o crescimento deste mercado.

Diferentemente da turbina eólica moderna de grande porte, ainda não há consenso sobre um tipo comum que tenha um projeto economicamente viável. Portanto, é comum encontrar diferentes modelos no mercado com todas as características descritas na seção 1.3, embora haja tendência do mercado para turbinas de eixo horizontal baseadas em geradores de ímãs permanentes.

1.7 NOVOS DESAFIOS

Os desafios da última década do setor de geração de energia eólica que foram, de certa forma, superados e estão relacionados com a consolidação do mercado mundial e com:

- operação mais eficiente e confiável dos parques;
- redução intensa de custos de fabricação e de produção de energia;
- aumento da potência nominal por turbina eólica;
- aumento da eficiência aerodinâmica;
- aumento da confiabilidade dos componentes;
- integração do sistema de controle das turbinas eólicas com o sistema de aquisição de dados da fazenda eólica.

Os novos desafios estão relacionados com uma operação mais eficiente do sistema:

- integrar maior quantidade de energia eólica combinada com energia solar;
- integrar o despacho local e o centralizado; aprimorando as técnicas de previsão da geração eólica;

- implementar controle de frequência com participação das fazendas eólicas;
- criar mercados para serviços ancilares providos por turbinas eólicas;
- implementar sistemas híbridos com geração solar;
- operar de forma inteligente e integradamente com sistemas de armazenamento de energia.

As soluções para estes desafios são importantes para aumentar os níveis de penetração de fazendas eólicas nos sistemas elétricos, possibilitando, inclusive, diminuição na quantidade de emissão de gases que contribuem para o efeito estufa.