

EVOLUÇÃO TECNOLÓGICA DOS SISTEMAS DE CONVERSÃO DE ENERGIA EÓLICA PARA LIGAÇÃO À REDE

FERNANDA DE OLIVEIRA RESENDE

Universidade Lusófona do Porto

foresende@sapo.pt

Resumo: Desde muito cedo, na história da humanidade, que a energia eólica é aproveitada pelo homem, primeiro sob a forma de energia mecânica e mais recentemente sob a forma de energia elétrica. O crescimento rápido do consumo de eletricidade, no final do século XIX, motivou a aplicação do princípio de funcionamento dos tradicionais moinhos de vento à conversão da energia eólica em energia elétrica. No entanto, foi após os choques petrolíferos da década de 1970 que as atividades de Investigação e Desenvolvimento (I&D) se intensificaram de forma significativa conduzindo à instalação das primeiras turbinas eólicas comerciais no início da década de 1980 na Europa e nos EUA. Desde então, as tecnologias de conversão da energia eólica têm registado um desenvolvimento considerável que se estende desde as técnicas de construção cada vez mais robustas até à utilização de sistemas de conversão com possibilidade de serem explorados em velocidade variável, com consequências refletidas ao nível do aumento progressivo da potência unitária instalada e da diminuição do custo do kWh gerado.

Abstract: The wind energy has been used since the early of the humanity history to provide mechanical power and only very recently to provide electrical power. The application of the traditional wind mill working principle to generate electricity was motivated by the fast electricity demand growth at the end of the XIX century. However, the interest of wind power re-emerged with the oil price shocks during the 1970s through the intensification of the research and development activities. As a result, the technology was improved step by step and the first commercially available wind turbines were installed in the beginning of 1980s on Europe and USA. During the last three decades the wind energy technologies have been a matter of considerable developments, from the building techniques to the use of variable speed wind energy conversion systems, allowing a gradual increase of the unitary ratings and therefore the reduction of the generation costs.

Palavras-chave: Energia eólica, tecnologias de conversão, conversores eletrónicos de potência, sistemas de velocidade constante e sistemas de velocidade variável.

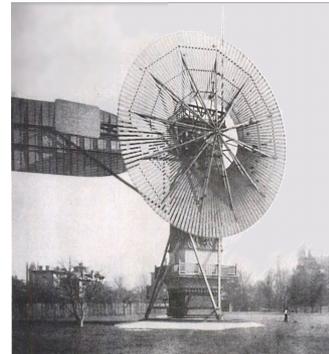
Keywords: Wind power, conversion systems, power electronics, fixed speed wind turbines and variable speed wind turbines.

Evolução histórica

O aproveitamento da energia eólica pelo Homem remonta à antiguidade. A conversão desta forma de energia primária em energia mecânica através da utilização dos moinhos de vento foi realizada desde muito cedo, na história da humanidade, para substituir a força humana ou animal na indústria da forjaria e na realização de atividade agrícolas, tais como a moagem de cereais e a bombagem de água para irrigação e drenagem dos terrenos.

Mais recentemente, já no final do século XIX, o rápido crescimento do consumo de eletricidade motivou a aplicação dos princípios básicos de funcionamento dos moinhos de vento ao aproveitamento da energia eólica para a produção de energia elétrica. A primeira turbina eólica, colocada em funcionamento por Charles F. Bush no Inverno de 1887-1888, possuía um rotor com 17m de diâmetro constituído por 144 pás de madeira montado numa torre de 18m de altura e sustentado por um tubo metálico central que possibilitava o movimento de rotação de modo a acompanhar o vento predominante. Apesar das dimensões consideráveis, a baixa velocidade de rotação limitava a potência nominal a 12 kW.

Um dos primeiros passos no desenvolvimento de turbinas eólicas de grandes dimensões, para produção de energia elétrica, foi dado na Rússia em 1931 com a ligação à rede elétrica do aerogerador Balaclava de 100 kW. Anos mais tarde, fruto das atividades de I&D motivadas pela economia dos combustíveis fósseis no decurso da 2ª Guerra Mundial, surgiram novos modelos de aerogeradores. Em 1941 entrou em funcionamento o Smith-Putnam, com um rotor de duas pás de 53,3m de diâmetro e 16 toneladas de peso, equipado com um gerador síncrono de 1250 kW de potência diretamente ligado à rede local em Grandpa's Knob, EUA.



Turbina Charles F. Bush (1887/1888)



Turbina Balaclava (1931)



Turbina Smith-Putnam (1941)



Turbina F. L. Smith (1942)

Na Europa, a Dinamarca destacou-se com um crescimento significativo do aproveitamento da energia eólica, fruto dos avanços tecnológicos conduzidos pelos cientistas dinamarqueses, primeiro Poul la Cour e, posteriormente, Johannes Juul. A companhia F. L. Smidth foi pioneira no desenvolvimento de pequenos aerogeradores com potências que rondavam os 45 kW, como as turbinas F. L. Smidth instaladas na ilha de Bogø.



Turbina Gedser (1957)

Na Europa, a Dinamarca destacou-se com um crescimento significativo do aproveitamento da energia eólica, fruto dos avanços tecnológicos conduzidos pelos cientistas dinamarqueses, primeiro Poul la Cour e, posteriormente, Johannes Juul. A companhia F. L. Smidth foi pioneira no desenvolvimento de pequenos aerogeradores com potências que rondavam os 45 kW, como as turbinas F. L. Smidth instaladas na ilha de Bogø.

Com base no sucesso da operação destes pequenos aerogeradores, Johannes Jull projetou um aerogerador de 200 kW com um rotor de eixo horizontal constituído por 3 pás de 24m de diâmetro, o qual foi instalado em 1957 na ilha de Gedser.

O aerogerador Gedser constituiu um marco importante na evolução das gerações seguintes de aerogeradores. No entanto, a tecnologia moderna das turbinas eólicas de grandes dimensões surgiu na Alemanha na década de 1950 com a construção do aerogerador com o maior número de inovações da época, as quais persistem ainda hoje na conceção dos modelos atuais. Tratava-se de um aerogerador de 100 kW de potência equipado com um rotor leve de 34m de diâmetro fabricado com materiais compostos, sistema de controlo de passo e torre de forma tubular e esbelta.

Após o choque petrolífero de 1973 as atividade de I&D no aproveitamento da energia eólica como fonte alternativa de energia elétrica intensificaram-se de forma significativa, nomeadamente na Europa e nos EUA, conduzindo à formação dos primeiros consórcios entre empresas Americanas e Europeias em programas de I&D de turbinas eólicas de grande potência no início da década de 1980. No entanto, a indústria da energia eólica registou os primeiros desenvolvimentos a partir dos aerogeradores de potências reduzidas. As primeiras turbinas eólicas comerciais instaladas na Europa e nos EUA no início da década de 1980 tinham potências nominais situadas na gama de 50 a 100 kW e diâmetros de 10 a 20m.

A experiência positiva na operação dos pequenos aerogeradores em conjunto com os resultados dos programas de I&D potenciou o crescimento continuado das turbinas eólicas

comerciais. O enorme desenvolvimento tecnológico, que passou a ser liderado pela indústria do setor estimulada por mecanismos institucionais de incentivo, juntamente com o crescimento da produção em massa tornou possível o desenvolvimento de técnicas de construção de aerogeradores cada vez mais robustas, permitindo o aumento da sua potência nominal unitária. É de realçar que no final da década de 1980 a capacidade dos aerogeradores era da ordem dos 300 kW e atualmente já existem modelos de 7,5 MW. A tecnologia da energia eólica é hoje uma tecnologia madura e amplamente disseminada. Consequentemente, o aproveitamento da energia eólica apresenta uma escala significativa em termos de geração, eficiência e competitividade sustentável ao nível do setor elétrico e da indústria. A Figura 1 ilustra a tendência crescente do aumento da potência instalada unitária e relaciona o diâmetro típico do rotor com a potência nominal.

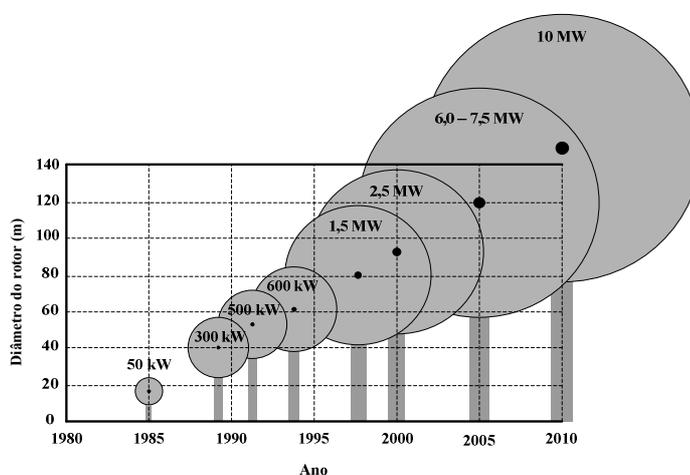


Figura 1: Relação entre o diâmetro típico do rotor e a potência nominal da turbina (Fonte: DEWI, 2009)

O aumento da potência nominal dos aerogeradores é traduzido num melhor aproveitamento das infra-estruturas elétricas e de construção civil com reduções graduais e significativas no custo do kW instalado e consequentemente no custo do kWh gerado. Por outro lado, a redução do número de rotores em movimento diminui o impacto visual.

Componentes gerais

Turbinas eólicas ou aerogeradores são as formas mais comuns de designar os sistemas de conversão de energia eólica em energia elétrica. O princípio de funcionamento é baseado na conversão da energia cinética associada ao deslocamento de massas de ar (vento) em energia mecânica de rotação, pela incidência do vento nas pás do rotor, seguindo-se a conversão da energia mecânica em energia elétrica pelo gerador elétrico.

O desenvolvimento tecnológico das grandes turbinas eólicas convergiu para uma certa uniformização da oferta comercial que, na sua grande maioria, apresenta turbinas de eixo horizontal com rotores de três pás colocados a montante da torre (*upwind*). Contudo, as opções tecnológicas adotadas pelos vários fabricantes são muito divergentes. Para além dos materiais utilizados no fabrico das pás e das torres, estas opções envolvem os seguintes aspectos principais:

- Sistema de controlo da potência mecânica, nomeadamente a regulação do ângulo de passo (controlo de *pitch*) e a entrada em perda aerodinâmica (*stall*);
- Existência ou não de caixa de velocidades;
- Sistema de conversão da energia mecânica em energia elétrica.

Relativamente ao sistema de conversão de energia mecânica em energia elétrica, as opções adotadas pelos fabricantes incluem a utilização do gerador assíncrono ligado à rede de forma direta ou através de um conversor eletrónico de potência (AC/DC/AC) e a utilização do gerador síncrono ligado à rede através de um conversor AC/DC/AC. Dependendo da opção adotada, o aerogerador pode ser explorado em regime de velocidade constante ou em regime de velocidade variável.

De uma forma geral, um aerogerador é constituído por três partes fundamentais:

- A torre que apresenta uma forma tubular e suporta a cabina de modo a elevar o rotor da turbina a uma altitude em que o vento apresenta as características adequadas, sendo o elemento responsável por grande parte dos custos iniciais de investimento.
- A cabina, onde estão alojados os sistemas de controlo, de medição e de transmissão mecânica, o gerador elétrico e o mecanismo de orientação direcional (*Yaw*). O controlo hidráulico do sistema de travões aerodinâmicos está montado no eixo do rotor, de baixa rotação, que transfere o binário primário para a caixa de velocidades responsável pela adaptação da frequência do rotor da turbina à frequência do gerador, ou diretamente para o gerador elétrico no caso de não existir caixa de velocidades. Nas Figura 2 e 3 podem observar-se as cabinas dos aerogeradores de dois fabricantes, um deles utilizando caixa de velocidades e o outro um gerador de baixa velocidade com um elevado número pólos. O mecanismo de orientação direcional, constituído basicamente por um motor, permite rodar a cabina, com base na informação proveniente do sensor de direção de vento, de modo a alinhar o rotor com a direção do vento para extrair a máxima potência possível.

- O rotor que fixa as pás da turbina ao cubo que é uma estrutura metálica fabricada em aço ou liga de alta resistência situada à frente do aerogerador e acoplada ao eixo que aciona o gerador elétrico. Nas turbinas eólicas com controlo de passo, o cubo, além de conter os rolamentos para a fixação das pás, acomoda também os motores para ajuste do ângulo de ataque. É de realçar que, por se tratar de uma peça de alta resistência, o cubo se apresenta como uma peça única.

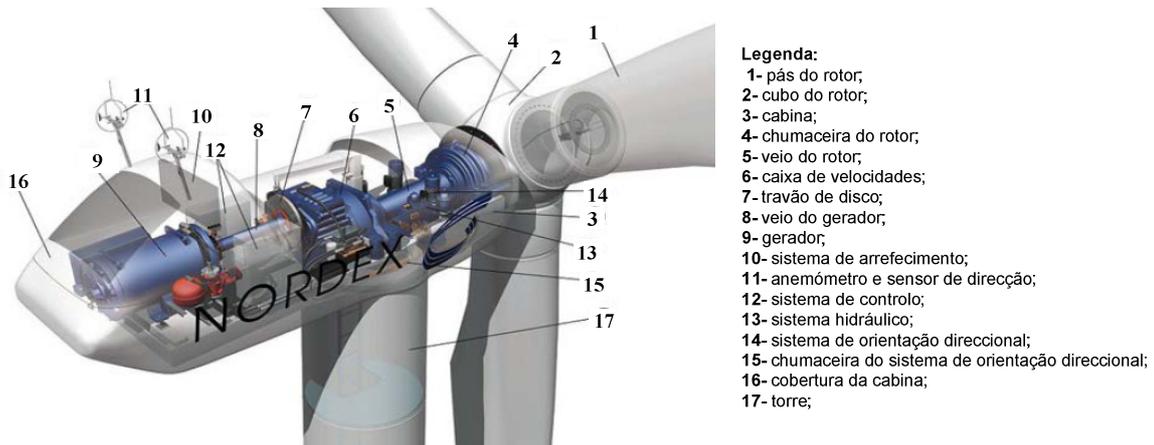


Figura 2: Interior da cabine de uma turbina eólica com caixa de velocidades (Fonte: NORDEX, 2010)

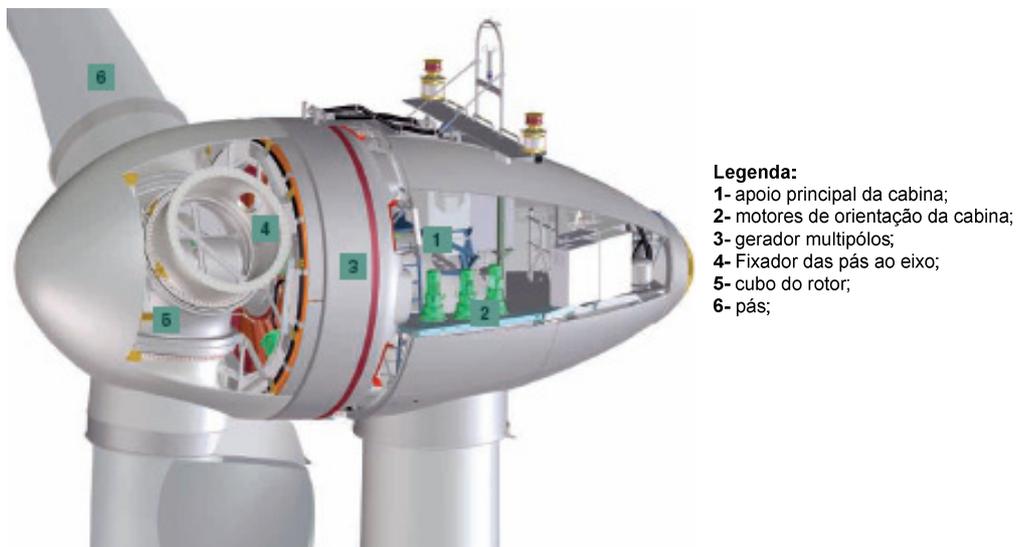


Figura 3: Interior da cabine de uma turbina eólica sem caixa de velocidades (Fonte: ENERCON, 2010)

O projeto das pás, no qual a forma da pá e o ângulo de ataque em relação à direção de vento têm uma influência determinante, beneficiou do conhecimento da tecnologia das asas dos aviões. Relativamente à seleção dos materiais utilizados na construção das pás, trata-se de uma operação delicada, em que critérios como o peso, robustez e resistência à

fadiga são fatores determinantes. A escolha recai principalmente sobre os materiais compostos sintéticos, nomeadamente plásticos reforçados com fibra de vidro, por serem relativamente baratos e facilmente moldáveis.

Potência gerada

Para uma determinada velocidade de vento, v (m/s), a potência elétrica extraída é dada pela expressão:

$$P_e = \frac{1}{2} \eta C_p \rho \pi R^2 v^3 = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho \pi R^2 v^3 \quad [\text{Watt}] \quad (1)$$

em que η representa o rendimento do sistema de conversão considerando as perdas no conjunto das transmissões mecânicas e no gerador elétrico, C_p representa o coeficiente de potência mecânica cujo valor máximo é de 59,3%, conhecido por limite de Betz, ρ é a massa específica do ar que, em condições normais (15 °C ao nível do mar), apresenta o valor de $1,225 \text{ kg/m}^3$, R representa o raio do rotor da turbina em metros. No entanto, os fabricantes dos aerogeradores incluem, geralmente, o rendimento global do sistema de conversão no valor do coeficiente de potência, $C_p(\lambda)$, em que λ é a relação entre a velocidade linear da extremidade da pá da turbina em rpm, ω_r , de raio R , e a velocidade do vento, designada por razão de velocidades da pá (tip speed ratio) e dada pela expressão:

$$\lambda = \frac{\omega_r R}{v} \quad (2)$$

As turbinas eólicas são projetadas para gerarem a potência máxima (potência nominal) a uma determinada velocidade de vento designada por velocidade nominal. Para velocidades de vento situadas abaixo de um determinado valor (*cut-in wind speed*) não é interessante extrair potência. Por outro lado, para valores superiores à velocidade de vento nominal, não é economicamente viável aumentar a extração de potência, pelo que a turbina é controlada através da diminuição artificial do rendimento de conversão para produzir uma potência constante. Para velocidades de vento demasiado elevadas (*cut-out wind speeds*) a turbina é desligada por razões de segurança. Dependendo do tipo de tecnologia, as turbinas eólicas começam a produzir energia elétrica para velocidades de vento a partir dos 3-4 m/s, atingem o valor nominal acima dos 13-14 m/s e são desligadas quando o vento regista velocidades superiores a 25 m/s, tal como se pode observar na curva de potência fornecida pelo fabricante de uma turbina eólica moderna de 7500 kW (E126) apresentada na Figura 4.

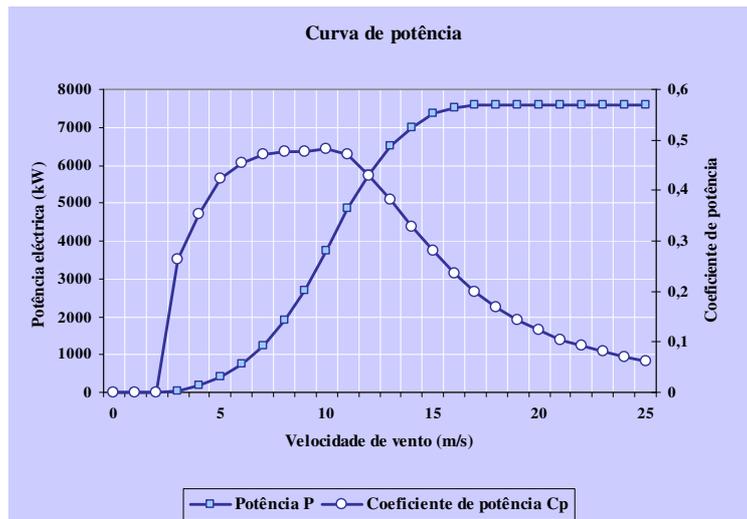


Figura 4: Curva de potência para uma turbina eólica (Fonte: ENERCON, 2010)

O valor máximo do coeficiente de potência é geralmente conseguido quando a velocidade linear da extremidade das pás da turbina é cerca de 8 a 9 vezes superior à velocidade do vento. Assim, de modo a obter a eficiência máxima da conversão, ou seja um coeficiente de potência máximo para cada velocidade de vento, é necessário que a velocidade do rotor acompanhe as variações da velocidade de vento na gama situada entre a velocidade de *cut-in* e a velocidade nominal, como se pode observar na Figura 4. Esta compatibilidade só é garantida no caso da utilização de sistemas de conversão de velocidade variável. Para velocidades de vento superiores à velocidade nominal torna-se necessário limitar a potência mecânica na turbina, tal como referido anteriormente, utilizando procedimentos de regulação baseados em perda aerodinâmica.

Sistemas de velocidade fixa e de velocidade variável

Os sistemas de conversão de velocidade fixa são geralmente equipados com um gerador de indução com rotor em gaiola de esquilo diretamente ligado à rede, pelo que a velocidade de rotação do gerador (superior à velocidade de sincronismo) é imposta pela frequência fixa da rede tendo em conta o número de pólos e o limite de variação do deslizamento (1 a 2%). Sendo a frequência do rotor quase constante, existe um único ponto de operação em torno do qual o rendimento de conversão é máximo. De modo a aumentar a eficiência, alguns fabricantes adotaram soluções que suportam a operação do sistema a duas velocidades, através da utilização de dois geradores com um número diferente de pólos ou de um gerador com comutação do número de pólos. No entanto, o ajuste de

velocidades não é efetuado de forma contínua implicando uma elevada carga mecânica no sistema. Pela simplicidade, robustez e baixo custo do gerador, este conceito foi amplamente utilizado pelos fabricantes dinamarqueses nas décadas de 1980 e 1990.

Com o objetivo de diminuir a carga mecânica e aumentar eficiência do sistema, o fabricante dinamarquês Vestas desenvolveu, em meados da década de 1990, o conceito de sistema de velocidade variável limitada, no qual a turbina eólica é equipada com um gerador de indução de rotor bobinado ligado a uma resistência variável controlada através de um conversor eletrónico de potência de modo a controlar a resistência total do rotor. Desta forma é possível controlar a potência extraída do rotor e, por conseguinte, a variação da velocidade do gerador numa gama limitada pelo do valor da resistência adicional. No entanto, a potência extraída do rotor é dissipada, sob a forma de calor, na resistência variável.

Nos sistemas de velocidade variável, o gerador é ligado à rede através de um conversor AC/DC/AC, também designado por conversor de frequência, que efetua o desacoplamento entre a frequência da rede e a frequência do gerador, possibilitando o controlo da velocidade de rotação do gerador numa gama de variação mais alargada de modo a aumentar a eficiência do sistema. Uma outra vantagem prende-se com o facto das variações na velocidade de vento serem convertidas em variações da frequência do gerador com efeito ao nível da redução da carga mecânica do sistema e da melhoria da qualidade da energia produzida.

O conceito de gerador de indução duplamente alimentado é baseado na utilização da máquina de indução de rotor bobinado em que o estator é diretamente ligado à rede e o rotor é ligado à rede através de um conversor AC/DC/AC. Este conversor controla a frequência do rotor e, por conseguinte, a velocidade do gerador numa gama limitada pela sua potência nominal. A potência extraída do rotor é injetada na rede através do conversor. Pelo facto do estator ser diretamente ligado à rede, este conceito é também designado por sistema de velocidade variável com conversão parcial.

Os sistemas de velocidade variável com conversão integral podem ser equipados com geradores de indução ou com geradores síncronos, os quais são ligados à rede através de conversores AC/DC/AC projetados para a potência nominal do gerador. Este conversor assegura o desacoplamento total entre as frequências da rede e do gerador, permitindo, assim, alargar a gama de variação da velocidade de operação do sistema a velocidades de vento reduzidas, tal como se pode observar na Figura 4.

Limitação da potência máxima

Para velocidades de vento superiores à velocidade nominal torna-se necessário limitar a potência mecânica na turbina, tal como referido anteriormente, utilizando procedimentos de regulação baseados em perda aerodinâmica de forma passiva ou ativa.

A regulação de forma passiva, também designada por controlo stall, tira partido do desenho do perfil das pás da turbina, o qual foi concebido para entrar em perda aerodinâmica para velocidades de vento superiores à velocidade nominal. Assim, para os sistemas de velocidade constante, o ângulo de ataque aumenta com o aumento da velocidade de vento e apresenta o valor máximo quando a velocidade de vento atinge o valor nominal.

A forma ativa de limitar a potência mecânica, conhecida como controlo de pitch, consiste na rotação das pás da turbina em torno do seu eixo longitudinal fazendo variar o ângulo de passo, β , de modo a diminuir o ângulo de ataque. Neste caso, o tip speed ratio é também função do ângulo de passo, pelo que o coeficiente de potência pode ser controlado através do controlo de pitch. No entanto, devido às elevadas constantes de tempo de atuação, este controlo só se encontra ativo quando a turbina entra na zona de potência constante, atuando de modo a que a velocidade de rotação da turbina corresponda à velocidade nominal da máquina, isto é, provocando de forma artificial uma diminuição de binário. Na zona de velocidades de vento inferiores à velocidade nominal o ângulo de passo é mantido no valor zero.

Quando comparado com o sistema de regulação do tipo stall, que constitui uma solução simples e barata, o controlo de pitch permite um melhor controlo da potência e contribui para a redução dos esforços mecânicos e dos efeitos de fadiga na turbina. Além disso, a variação do ângulo de passo funciona como um sistema auxiliar nos processos de arranque e paragem da turbina eólica, permitindo o embalamento do rotor enquanto a velocidade do vento é baixa e a colocação das pás na posição de embandeiramento para velocidades de vento elevadas dispensando assim o travão aerodinâmico. No entanto, este sistema de regulação acarreta um acréscimo de complexidade e o aumento do custo do sistema de conversão.

O conceito de perda aerodinâmica ativa, também designado por stall ativo, pretende combinar as vantagens do controlo de pitch com a robustez da regulação passiva através de um sistema que permite rodar as pás da turbina no sentido de aumentar o ângulo de ataque de modo a induzir o efeito de perda aerodinâmica.

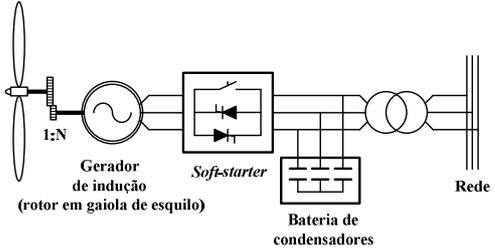
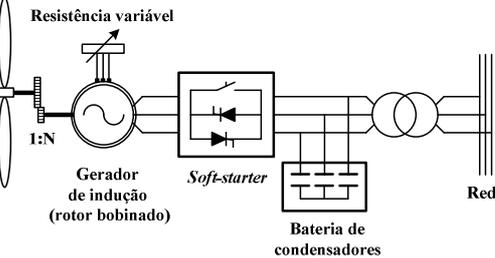
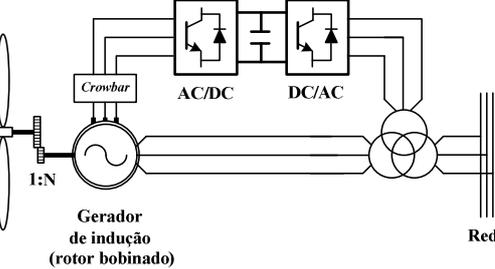
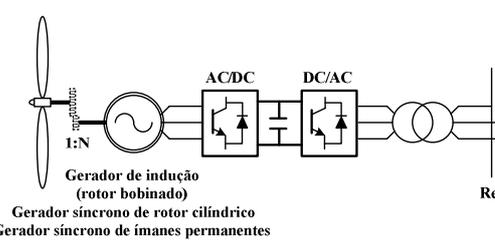
Configurações típicas dos sistemas de conversão de energia eólica

Da combinação dos sistemas de controlo da potência máxima com os modos de exploração do gerador elétrico (velocidade fixa ou velocidade variável) resultam quatro configurações principais que caracterizam a oferta comercial de turbinas eólicas predominante desde a década de 1980, as quais são tipicamente designadas por Tipo A, Tipo B, Tipo C e Tipo D, de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1: Configurações típicas dos sistemas de conversão de energia eólica

Controlo de velocidade	Controlo de potência		
	Regulação <i>stall</i>	Controlo de <i>pitch</i>	<i>Stall</i> ativo
Velocidade constante	Tipo A (A0)	Tipo A (A1)	Tipo A (A2)
Velocidade variável limitada		Tipo B (B1)	
Velocidade variável		Tipo C (C1)	
		Tipo D (D1)	

Tal como ilustrado na Tabela 1, o conceito de velocidade variável é utilizado pelas três últimas configurações, Tipo B, Tipo C e Tipo D. Relativamente ao controlo da potência máxima, estes sistemas utilizam apenas um mecanismo de controlo rápido do ângulo de passo de modo a evitar a saída de serviço do sistema da sequência da ocorrência de uma rajada de vento, por exemplo, durante a operação á potência máxima. A seguir é apresentada uma caracterização sumária das quatro configurações típicas e as soluções tecnológicas adotadas pelos nove fabricantes com maior potência instalada em 2009 em alguns dos seus modelos de aerogeradores.

Configuração do sistema	Características principais
<p>Tipo A: Sistema de velocidade constante</p>  <p>Fabricantes: Suzlon, Micon (adquirida pela Vestas), Nordex, Siemens (Bonus), Ecotécnica e Made.</p> <p>Serviços de sistema: Fornecimento de energia reativa.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Conceito dinamarquês: Turbina com regulação <i>stall</i> equipada com gerador de indução com rotor em gaiola de esquilo ligado à rede através de um transformador; • Funcionamento a uma ou duas velocidades; • Baterias de condensadores para compensação do fator de potência da máquina; • Sistema de arranque suave (<i>soft-starter</i>) para limitar a corrente de arranque; <p>Apesar do sistema de regulação <i>stall</i> ser mais comum (Tipo A0) o controle de <i>pitch</i> (Tipo A1) e controle <i>stall</i> ativo (Tipo A2) também tem sido adotados nesta configuração.</p> <p>Vantagens: Simplicidade, robustez e baixo custo;</p> <p>Desvantagens: Funcionamento a velocidade constante; Carga mecânica elevada para a maioria dos regimes de vento; A qualidade da energia produzida reflete os efeitos da variabilidade do recurso.</p>
<p>Tipo B: Sistema de velocidade variável limitada</p>  <p>Fabricantes: Suzlon, Gamesa, Vestas.</p> <p>Serviços de sistema: Fornecimento de potência reativa</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Conceito OptiSlip[®]: Turbina com controle de <i>pitch</i> e equipada com gerador de indução de rotor bobinado em que o estator é ligado à rede através de um transformador e o rotor é ligado em série com uma resistência variável controlada por um conversor eletrônico; • Funcionamento a velocidade variável numa gama limitada (+10% da velocidade de sincronismo) pelo valor da resistência variável; • Baterias de condensadores para compensação do fator de potência da máquina; • Sistema de arranque suave (<i>soft-starter</i>) para limitar a corrente de arranque; <p>Vantagens: Melhoria da eficiência do sistema através do aumento da gama de variação de velocidade.</p> <p>Desvantagens: Gama de variação da velocidade reduzida; Dissipação da potência extraída do rotor na resistência variável; Conversão das variações de vento em variações de potência injetada.</p>
<p>Tipo C: Sistema de velocidade variável (conversor parcial)</p>  <p>Fabricantes: Vestas, Gamesa, Repower, Nordex, GE, Ecotécnica, Ingetur (filial da Acciona), Suzlon.</p> <p>Serviços de sistema: Fornecimento de potência reativa e capacidade de sobrevivência a cavas de tensão.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Conceito máquina de indução duplamente alimentada - MIDA: Turbina com controle de <i>pitch</i> e equipada com gerador de indução de rotor bobinado. O estator é diretamente ligado à rede e o rotor é ligado à rede através de um conversor eletrônico de potência; • Funcionamento a velocidade variável numa gama típica de velocidades de $\pm 30\%$ em torno da velocidade de sincronismo; • Potência do conversor limitada a 25-30% da potência nominal do gerador; • A potência extraída do rotor é injetada na rede através do conversor; • Injeção de potência reativa na rede independentemente do regime de funcionamento do gerador; <p>Vantagens: Sistema atrativo do ponto de vista económico; Aumento da eficiência; Melhoria na qualidade da energia produzida; Controle da potência ativa e reativa.</p> <p>Desvantagens: Sistema de proteção do conversor (<i>crowbar</i>) contra correntes de defeito elevadas no rotor; Utilização de anéis coletores para transferir a potência do rotor para o conversor.</p>
<p>Tipo D: Sistema de velocidade variável (conversor integral)</p>  <p>Fabricantes: Enercon, GE, Siemens, Made, Leitner, Mtorres, Jeumont.</p> <p>Serviços de sistema: Fonte local de potência reativa e capacidade de sobrevivência a cavas de tensão.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Turbina com controle de <i>pitch</i> e equipada com gerador ligado à rede através de um conversor eletrônico de potência projetada para a potência nominal da máquina; • A turbina eólica é equipada com um dos seguintes tipos de geradores: <ul style="list-style-type: none"> • Gerador de indução de rotor bobinado; • Gerador síncrono de rotor bobinado; • Gerador síncrono de ímanes permanentes; • A gama de variação da velocidade é alargada; • Aumento da capacidade de injeção de potência reativa; • A utilização de um gerador com um elevado número de pólos e baixa velocidade de rotação dispensa a caixa de velocidades; • As variações da velocidade de vento são convertidas em variações de velocidade do rotor e não na potência injetada; <p>Vantagens: Aumento da eficiência; Melhoria na qualidade da energia produzida, Melhor controlo de potência ativa e reativa; Possível ausência de caixa de velocidades; Ausência de anéis coletores.</p> <p>Desvantagens: Elevado custo e perdas no conversor.</p>

Fabricante	Modelo	Controlo de potência	Características
Vestas (Dinamarca)	V90-3 MW	Controlo de <i>pitch</i>	Gerador de indução duplamente alimentado Tensão do gerador: 1000 V
	Tipo C	Velocidade variável	Velocidade nominal do gerador: 1680 rpm Gama de velocidades do rotor: 8,6 – 18,4 rpm
35000 MW	V90-2 MW	Controlo de <i>pitch</i>	Gerador de indução duplamente alimentado Tensão do gerador: 690 V
	Tipo C	Velocidade variável	Velocidade nominal do gerador: 1680 rpm Gama de velocidades do rotor: 9 – 14,9 rpm
Enercon (Alemanha)	V80-1,8 MW	Controlo de <i>pitch</i>	Gerador de indução de rotor bobinado (Conceito OptiSlip®)
	Tipo B	Velocidade variável limitada	Tensão do gerador: 690 V Gama de velocidades do gerador: 1800 - 1980 rpm Gama de velocidades do rotor: 15,3 – 16,8 rpm
19000 MW	E126-7,5 MW	Controlo de <i>pitch</i>	Gerador síncrono de rotor cilíndrico (multipólos)
	Tipo D	Velocidade variável	Tensão do gerador: Gama de velocidades do gerador: 5-11,7 rpm Gama de velocidades do rotor: 5 - 11,7 rpm
Gamesa (Espanha)	E101-3 MW	Controlo do <i>pitch</i>	Gerador síncrono de rotor cilíndrico (multipólos)
	Tipo D	Velocidade variável	Tensão do gerador: 400 V Gama de velocidade do gerador: 4-14,5 rpm Gama de velocidades do rotor: 4 - 14,5 rpm
16000 MW	G87 – 2MW	Controlo de <i>pitch</i>	Gerador de indução duplamente alimentado Tensão do gerador: 690 V
	Tipo C	Velocidade variável	Gama de velocidades do gerador: 900-1900 rpm Gama de velocidades do rotor: 9 – 19 rpm
GE Energy (Alemanha/EUA)	G80 – 1,8 MW	Controlo de <i>pitch</i>	Gerador de indução de rotor bobinado (Conceito OptiSlip®)
	Tipo B	Velocidade variável limitada	Tensão do gerador: 690 V Gama de velocidades do gerador: 1818-1944 rpm Gama de velocidades do rotor: 15,1 – 16,1 rpm
15000 MW	GE 104 – 3,2 MW	Controlo de <i>pitch</i>	Gerador de indução duplamente alimentado Tensão do gerador: 690 V
	Tipo C	Velocidade variável	Gama de velocidades do gerador: 1000-1800 rpm Gama de velocidades do rotor: 7,5 – 13,5 rpm
Siemens (Dinamarca/Alemanha)	GE 1.5xle – 1,5 MW	Controlo de <i>pitch</i>	Gerador de indução duplamente alimentado Tensão do gerador: 690 V
	Tipo C	Velocidade variável	Gama de velocidades do gerador: 1500-1800 rpm Velocidade nominal do rotor: 16.8 rpm
8800 MW	SWT-2.3-101 – 2,3 W	Controlo de <i>pitch</i>	Gerador de indução duplamente alimentado Tensão do gerador: 690 V
	Tipo C	Velocidade variável	Gama de velocidades do gerador: 600-1600 rpm Gama de velocidades do rotor: 6 - 16 rpm
Suzlon (Índia)	Bónus 82 – 2,3 MW	<i>Stall</i> ativo	Gerador de indução com rotor em gaiola de esquilo Tensão do gerador: 690 V
	Tipo A (A2)	Velocidade constante	Gerador de duas velocidades: 1000 e 1500 rpm Velocidades do rotor: 11 rpm e 17 rpm
6000 MW	S82 – 1,5 MW	Controlo de <i>pitch</i>	Gerador de indução de rotor bobinado Tensão do gerador: 690 V
	Tipo B	Velocidade constante	Velocidade nominal do gerador: 1511 rpm Velocidades do rotor: 15.6 rpm e 18.4 rpm
Nordex (Alemanha)	N90/2500 LS – 2,5 MW	Controlo de <i>pitch</i>	Gerador de indução duplamente alimentado Tensão do gerador: 660 V
	Tipo C	Velocidade variável	Gama de velocidades do gerador: 740-1300 rpm Gama de velocidades do rotor: 9,6 – 16,8 rpm
5400 MW	N80/2500 – 2,5 MW	Controlo de <i>pitch</i>	Gerador de indução duplamente alimentado Tensão do gerador: 660 V
	Tipo C	Velocidade variável	Gama de velocidades do gerador: 740-1300 rpm Gama de velocidades do rotor: 10.8 – 18.9 rpm
ACCIONA (Espanha)	Acciona AW 3000 – 3MW	Controlo de <i>pitch</i>	Gerador de indução duplamente alimentado Tensão do gerador: 12000 V
	Tipo C	Velocidade variável	Gama de velocidades do gerador: 770-1320 rpm Velocidades do rotor: 14.2 rpm
3000 MW	Repower 5M – 5 MW	Controlo de <i>pitch</i>	Gerador de indução duplamente alimentado Tensão do gerador: 650/950 V
	Tipo C	Velocidade variável	Gama de velocidades do gerador: 750-1170 rpm Velocidade nominal do rotor: 12,1 rpm
3000 MW	Repower MM82–2,05 MW	Controlo de <i>pitch</i>	Gerador de indução duplamente alimentado Tensão do gerador: 690 V
	Tipo C	Velocidade variável	Gama de velocidades do gerador: 900-1800 rpm Gama de velocidades do rotor: 8,5 – 17.1 rpm

Conclusões

As turbinas eólicas para ligação à rede apresentaram uma considerável evolução tecnológica nos últimos 30 anos, desde os simples e robustos aerogeradores de velocidade constante, que dominaram o mercado até ao final da década de 1990, até aos sistemas de velocidade variável em toda a gama de operação, com consequências que se refletiram no aumento progressivo da capacidade instalada nos sistemas de conversão, na qualidade da energia produzida, na capacidade de controlo da potência gerada e no aumento da integração de energia eólica nas redes elétricas.

Na primeira categoria a velocidade de rotação da turbina é ditada pela frequência da rede, impedindo assim o ajuste da velocidade do gerador à velocidade do vento e, conseqüentemente, a operação do sistema na eficiência máxima para a maioria dos regimes de vento. Contudo, a robustez e o baixo custo dos sistemas de velocidade constante, têm mantido este conceito na oferta comercial de alguns fabricantes.

Na categoria dos sistemas de velocidade variável, a utilização dos conversores eletrónicos de potência permite efetuar o desacoplamento entre a frequência da rede e a frequência imposta ao gerador, pela velocidade de vento local em conjunto com o controlo aerodinâmico da turbina, tornando possível a operação do sistema numa gama alargada de velocidades. Assim, a operação do sistema a velocidade variável conduz ao aumento da eficiência de conversão para os vários regimes de vento, reduz a carga mecânica do sistema, torna possível o controlo da potência ativa, permite a geração local de potência reativa independentemente do regime de carga do gerador e contribui para o fornecimento de serviços de sistema e conseqüentemente para a melhoria da sua estabilidade. Além disso, os efeitos resultantes da variabilidade do recurso são convertidos em variações da velocidade do gerador e não se refletem na potência injetada na rede. O conceito de velocidade variável tem sido progressivamente adotado pelos fabricantes e atualmente integra a maioria da oferta comercial.

Bibliografia

ACKERMAN, Thomas (2005). "Wind Power in Power Systems". Sweden: John Wiley&Sons.

CASTRO, Rui (2008). "Introdução à Energia Eólica". Lisboa: Instituto Superior Técnico.

<URL: <http://www.dewi.de>>

<URL: <http://www.vestas.com>>

<URL: <http://www.enercon.com>>

<URL: <http://www.gamesacorp.com>>

<URL: <http://www.suzlon.com>>

<URL: <http://www.nordex-online.com>>

<URL: <http://www.acciona.com>>

<URL: <http://www.repower.de>>