



e-Learning tools for Electrical Engineering

Temática – Energias Renováveis

Capítulo – Energia Eólica

Secção –

AS DIFERENTES TECNOLOGIAS

INTRODUÇÃO

Nesta secção apresentam-se as diferentes tecnologias usadas nos sistemas eólicos, nomeadamente, na exploração de aerogeradores de velocidade constante e de velocidade variável. Para finalizar, refere-se a ligação dos aerogeradores à rede de distribuição eléctrica.

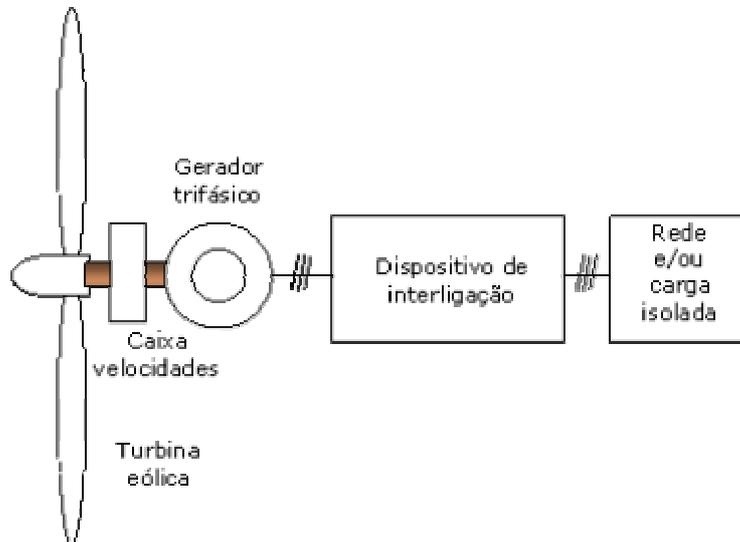
- pré-requisito: disciplina de máquinas eléctricas (máquinas síncrona e assíncrona) e disciplina de electrónica de potência (conversores de potência)
- nível: Área de especialização
- duração estimada: 1h
- autores: Diane Brizon, Nathalie Schild, Aymeric Anselm, Mehdi Nasser
- realização : Diane Brizon, Nathalie Schild
- versão portuguesa : [Maria José Resende](#)



Este projecto é financiado pela União Europeia no âmbito de uma acção Sócrates-Minerva. As informações nele contidas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores. A União Europeia declina toda a responsabilidade relativamente ao seu uso.

1. PRÉ-REQUISITOS

Os elementos da cadeia de conversão de energia podem ser combinados de diversas formas. Os elementos que estão, imperativamente, presentes são: uma turbina eólica, um gerador trifásico e um dispositivo de interligação à rede de distribuição eléctrica ou a uma carga isolada.



Estrutura genérica de um sistema de conversão de energia eólica

A título indicativo, as máquinas mais utilizadas nas eólicas são do tipo assíncrono com rotor em gaiola (cerca de 90% em 1997 e 60% em 2001). No entanto, a sua proporção tende a diminuir.

Os geradores assíncronos de rotor bobinado tiveram um considerável desenvolvimento nos últimos anos (de 3% das máquinas usadas em 1997, passa-se a cerca de 30% em 2001).

As máquinas síncronas de rotor bobinado também viram a sua proporção a aumentar; representam um pouco mais de 5% em 2001.

2. AEROGERADORES DE VELOCIDADE CONSTANTE

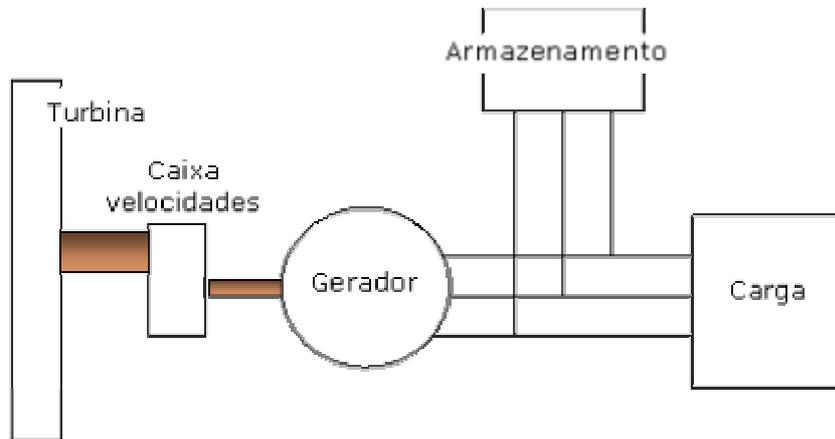
Nas máquinas síncronas clássicas e assíncronas de rotor em gaiola, a velocidade de rotação depende linearmente da frequência das correntes que circulam nos enrolamentos do estator. A máquina assíncrona apresenta um número de par de pólos fixo, funcionando, assim, numa gama de velocidades muito limitada; o escorregamento apresenta valores muito reduzidos. A máquina síncrona funciona a velocidade constante, imperativamente.

Funcionamento autónomo

As eólicas que não estão ligadas à rede de energia eléctrica, funcionam em modo autónomo, alimentado cargas isoladas e tendo, eventualmente, um ou mais grupos geradores de apoio. Para este tipo de funcionamento, o recurso a um sistema de armazenamento de energia eléctrica, apresenta um interesse acrescido quando o vento é fraco e no caso de não existirem grupos geradores de apoio.

As baterias são uma boa solução para o armazenamento de energia eléctrica a médio prazo desde que seja garantida a sua reciclagem. Uma outra solução é o armazenamento de energia cinética em volantes de inércia.

O gerador pode ser tanto uma máquina síncrona de ímanes permanentes, quanto uma máquina assíncrona de rotor em gaiola, munida dos condensadores indispensáveis à sua excitação.



Representação esquemática de uma eólica de velocidade constante em funcionamento autónomo

Funcionamento ligado à rede

Estando a eólica ligada à rede de energia eléctrica, a velocidade de rotação da máquina permanece praticamente constante e próxima da velocidade de sincronismo de forma a funcionar dentro da zona de estabilidade (escorregamento reduzido). É a frequência da rede que impõe a velocidade da máquina. Uma eólica a velocidade constante, directamente ligada à rede tem, forçosamente, de estar equipada de uma caixa de velocidades (multiplicador de velocidade). A turbina roda a uma dada velocidade, para uma gama restrita de velocidades do vento; a sua utilização é limitada.

- Exemplo de uma montagem com caixa de velocidades e uma [MAS de rotor em gaiola directamente ligada à rede](#).

Caixa de velocidades + máquina assíncrona de rotor em gaiola directamente ligada à rede

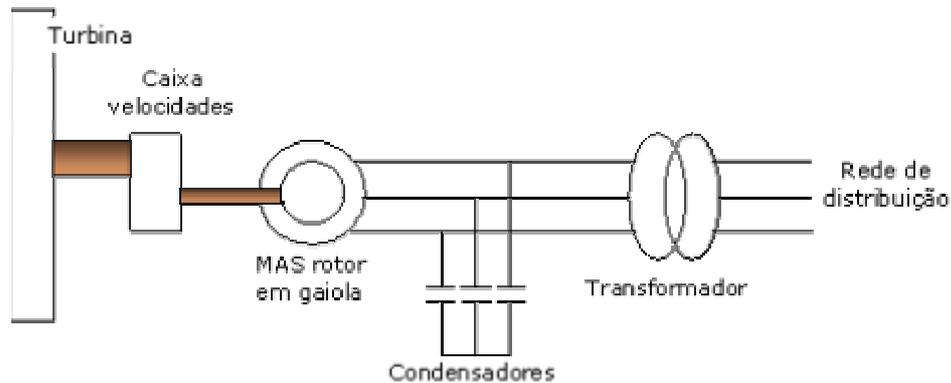
Ex : eólicas dinamarquesas

Para ligar este tipo de configuração à rede, procede-se em duas fases:

A primeira fase consiste na ligação dos enrolamentos do estator à rede, através de resistências de forma a limitar as correntes transitórias do estator. Durante esta fase, as pás da turbina são orientadas de forma a que o binário produzido seja nulo.

Após alguns segundos as resistências são eliminadas (são colocadas em curto-circuito) e o sistema de regulação orienta as pás de forma a aumentar a potência.

A corrente de magnetização do sistema é limitada pelas resistências. As resistências podem ser substituídas por um limitador de corrente.



Esquema da ligação directa à rede de uma eólica com um gerador assíncrono de rotor em gaiola

- Exemplo de uma montagem com uma [MAS de rotor bobinado](#).
- **máquina assíncrona de duplo estator (MADS)**

Esta configuração de eólica de velocidade constante permite dois pontos de funcionamento com duas velocidades diferentes.

O enrolamento do estator é realizado de forma a criar um número de pares de pólos variável (2 valores) e, portanto, permite duas velocidades de sincronismo.

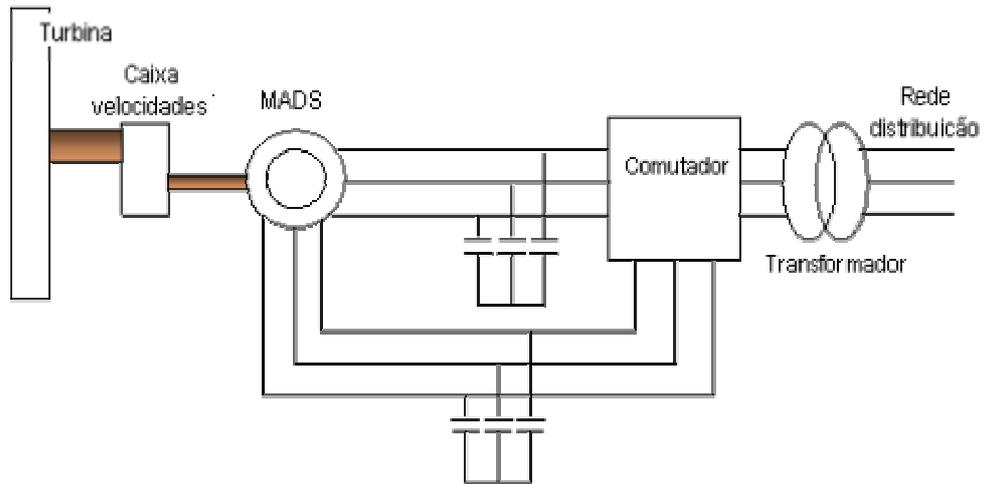
Por um lado, obtém-se um estator de baixa potência (reduzida velocidade) e elevado número de pólos, para baixas velocidades de vento, uma vez que a potência mecânica é:

$$P_{tr} = \Gamma (1 - s) \Omega_s$$

com: P_{tr} potência mecânica transmitida ao gerador, Γ binário electromagnético, Ω_s velocidade de sincronismo, s escorregamento, ω frequência angular da rede e p o número de pares de pólos. A uma reduzida potência, corresponde uma baixa velocidade, estando a velocidade ligada ao número de pares de pólos através de:

$$\Omega_s = \frac{\omega}{p}$$

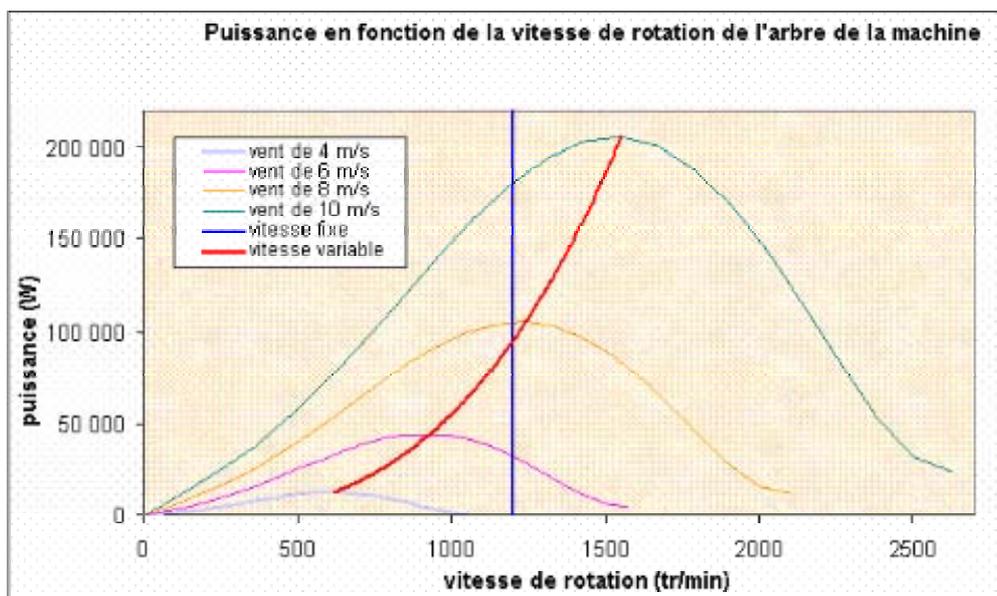
A uma baixa velocidade, corresponde um elevado número de pares de pólos. Por um lado, tem-se um estator de elevada potência correspondente a uma elevada velocidade e, portanto, a um reduzido número de pares de pólos, para velocidades de vento mais elevadas.



Esquema de ligação à rede de uma eólica com uma máquina de duplo estator

3. AEROGERADORES DE VELOCIDADE VARIÁVEL

Para poder otimizar a potência produzida, em função da velocidade do vento, é desejável que se possa regular a velocidade do aerogerador. O objectivo é ter um gerador a frequência fixa e velocidade variável. O gerador a velocidade variável, permite o funcionamento numa larga gama de velocidades do vento, recuperando, assim, o máximo de potência do vento e reduzindo, também, as emissões sonoras, quando funciona com vento fraco. No funcionamento a velocidade variável, o sistema encontra-se regulado de forma a que, para cada velocidade do vento, o aerogerador se encontre a potência máxima; este funcionamento denomina-se **Maximum Power Point Tracking**. A potência máxima do aerogerador é função da sua velocidade $P(\omega)$.



Os sistemas a velocidade variável funcionam com o aerogerador ligado à rede e requerem o uso de **conversores de frequência**.

Os conversores de frequência

Em funcionamento a velocidade variável, a frequência e a amplitude da tensão de saída do gerador, são variáveis com a velocidade de rotação. Por forma a poder fazer a ligação à rede de distribuição eléctrica esta tensão é convertida através de conversores e filtros de potência intercalados entre a máquina (síncrona ou assíncrona) e a rede. Normalmente, este conjunto de electrónica de potência é constituído por um rectificador da tensão de saída do gerador e por um ondulator cuja tensão de saída apresenta a amplitude e a frequência da rede. Um aerogerador assim equipado pode suportar rajadas de vento e reduzir as solicitações mecânicas.

A cadeia de conversão de energia é composta por:

gerador

conversores de potência:

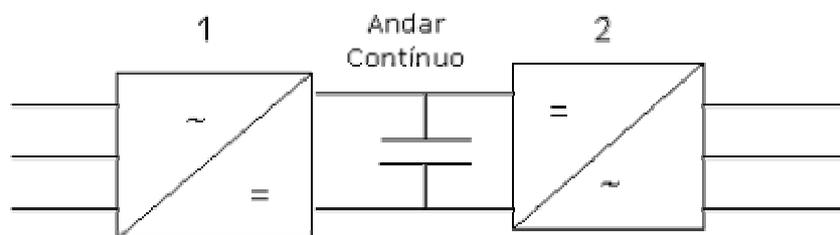
- **Conversor alternado/contínuo ou rectificador comandado (1)**

Utiliza-se um rectificador a díodos para as máquinas síncronas; o seu funcionamento é unidireccional.

O rectificador com MLI é utilizado com as máquinas assíncronas, pois permite o fornecimento da potência reactiva de magnetização.

- **Conversor contínuo / alternado ou ondulator (2)**

Este conversor estático permite regular a tensão ou a corrente eficazes e a frequência da corrente ou da tensão, para se poder fazer o paralelo à rede (ligação à rede de energia eléctrica); um ondulator com comando por MLI permite minimizar a geração de correntes harmónicas.



Conversores estáticos de frequência

Normalmente, estes conversores são comandados em tempo real através de cartas electrónicas de controlo implantadas em computadores. A gestão da transferência de potência entre o rectificador e o ondulator, é efectuada através do andar contínuo, constituído por um condensador.

Os sistemas de velocidade variável

Apresentar-se-á, sucessivamente:

- **montagem com dois geradores**

Configuração com dois geradores

Para baixas velocidades de vento, utiliza-se um gerador de reduzida potência nominal e, para vento forte, utiliza-se um gerador de elevada potência nominal. Esta montagem pode ser efectuada tanto com máquinas síncronas como assíncronas.

- **gerador com um número de pólos variável**

Gerador com um número variável de pares de pólos

Pode realizar-se o enrolamento do estator do gerador síncrono ou assíncrono, de forma a poder obter-se um número variável de pares de pólos e, portanto, de diferentes velocidades de sincronismo e escolhe-las em função da velocidade do vento. Esta solução explora a fórmula da velocidade de sincronismo Ω_s :

$$\Omega_s = \frac{\omega}{p}$$

onde ω representa a frequência angular da rede (fixa) e p o número de pares de pólos (que se vai fazer variar).

- **nos geradores assíncronos**, é possível existir uma ligeira variação da velocidade. São possíveis diversas configurações:

MAS de rotor bobinado com resistências rotóricas

rotor da máquina assíncrona equipado com resistências variáveis

Esta solução explora o facto de o escorregamento g ser uma função da resistência do rotor, que se exprime por R_r/g no esquema equivalente de uma máquina assíncrona. A junção de resistências eléctricas ao circuito do rotor, permite ajustar as condições do escorregamento às condições do vento. Ao fazer variar a resistência interna do rotor, faz-se variar o escorregamento g . Com efeito, a velocidade de rotação do rotor, ω_r , é dada por:

$$\omega_r = |g| \omega$$

sendo ω , a frequência angular da rede (fixa) e g o escorregamento, que também se pode exprimir por:

$$\omega_r = p |\Omega_s - \Omega|$$

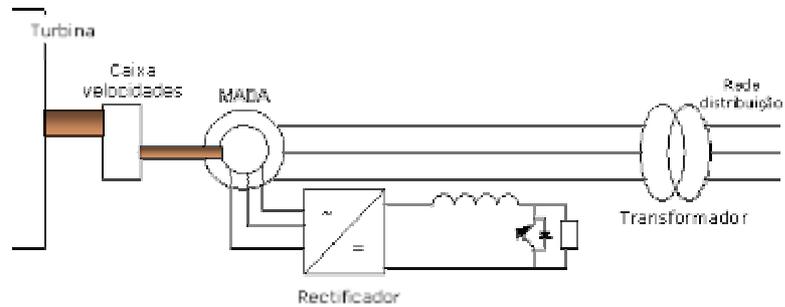
onde Ω_s representa a velocidade de sincronismo, pelo que:

$$\Omega = \Omega_s + \frac{\omega_r}{p}$$

se $g < 0$

Ex : A variação máxima do escorregamento é da ordem de 10 % .

O gerador utilizado é a MADA (Máquina Assíncrona Dupla Alimentação), isto é, uma máquina assíncrona com rotor bobinado, onde a energia rotórica é dissipada nas resistências:



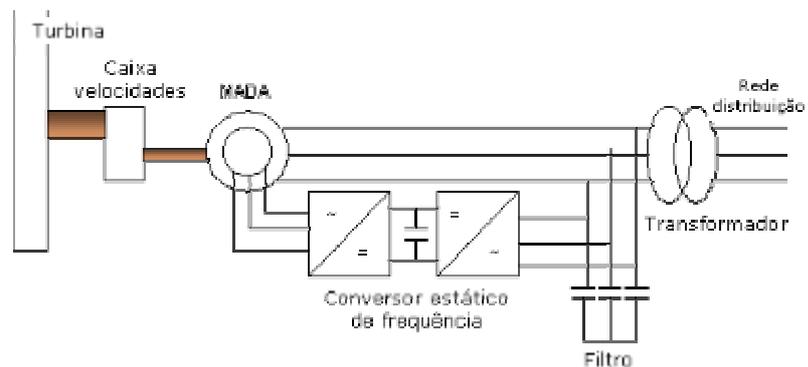
Esquema de ligação à rede de uma eólica com um gerador assíncrono equipado de resistências variáveis

MADA associada a dois conversores MLI

máquina assíncrona com dupla alimentação: máquina assíncrona de rotor bobinado associada a um duplo conversor de modulação de largura de impulso (MLI) (estrutura de Scherbius) com interruptores realizados através de IGBT .

A dupla alimentação refere-se ao facto de o rotor estar ligado ao duplo conversor e o estator estar ligado à rede.

Esta configuração é utilizada em eólicas de grande potência. A gama de variação da velocidade de rotação pode duplicar. Os conversores de frequência permitem a rectificação e o re-envio para a rede, de uma parte da electricidade produzida.



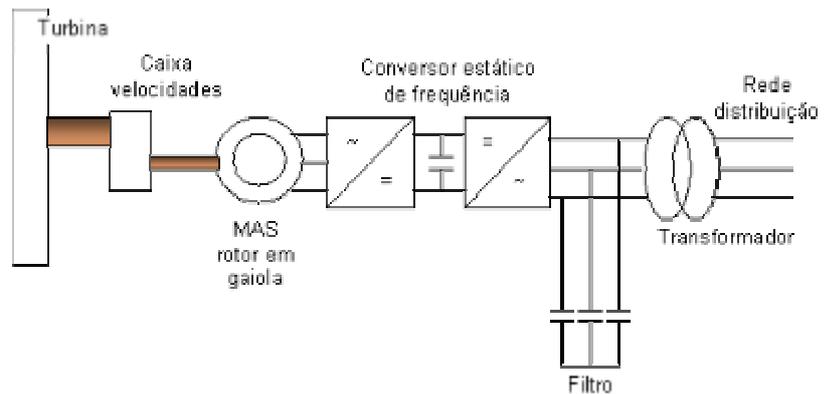
O princípio de funcionamento baseia-se na variação da velocidade através da variação da frequência de alimentação dos enrolamentos do rotor.

A bidireccionalidade do duplo conversor permite modos de funcionamento hipo e hiper síncronos (abaixo e acima da velocidade

de sincronismo), bem como a regulação do factor de potência visto pela rede.

MAS de rotor em gaiola

MAS de rotor em gaiola associada a um conversor de frequência, ligada à rede.

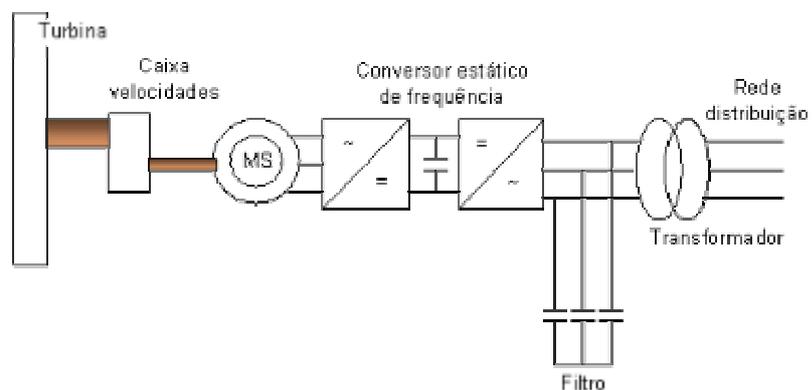


- Para os geradores síncronos:

MS com caixa de velocidades e um conversor no estator

Máquina síncrona + caixa de velocidades + conversor no estator.

Para o caso de uma máquina síncrona, a amplitude a frequência são função da velocidade de rotação; a ligação à rede necessita de ser feita através de um conversor estático de frequência, composto por um rectificador e um ondulator.



Pode evitar-se o uso da caixa de velocidades, usando um gerador com um elevado número de pares de pólos. Recorde-se que, para a máquina síncrona:

$$\Omega_s = \Omega = \frac{\omega}{p}$$

São possíveis duas configurações, dependendo do tipo de rotor:

rotor bobinado

o rotor é bobinado. Se a máquina tiver um elevado número de pares de pólos, a sua velocidade de rotação é baixa.

rotor de ímanes permanentes

o rotor é constituído por ímanes permanentes de fluxo axial, permitindo uma máquina de construção mais compacta. Há necessidade de ligar a máquina à rede através de um conversor de potência, mas a caixa de velocidades pode ser dispensada.

O gerador está ligado à rede através de um conversor de frequência que adapta a frequência variável da energia produzida, à frequência fixa da rede.

A velocidade de rotação do gerador deve ser, rigorosamente, um submúltiplo da frequência angular das correntes do estator.