



Temática – Energias Renováveis

Capítulo – Energia Eólica

Secção –

## ESTUDO APLICADO DE UMA EÓLICA

### INTRODUÇÃO

Nesta exposição apresentam-se as equações e os conhecimentos necessários para a resolução dos exercícios.

- pré-requisitos: nenhum
- nível: Área de Especialização
- duração estimada :
- autores : Diane Brizon, Nathalie Schild
- 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. POTÊNCIA DE UM AEROGERADOR

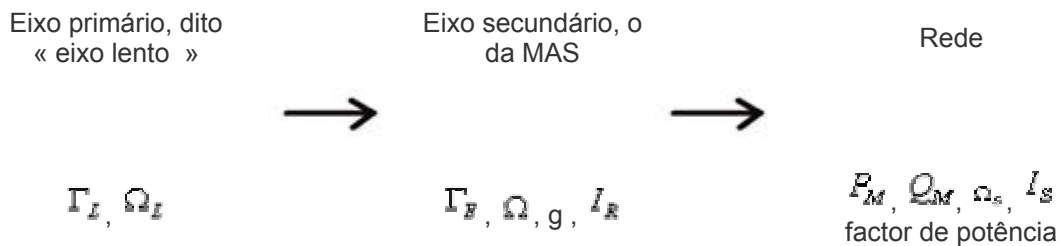
Os aerogeradores são classificados de acordo com a sua potência; com 1 MW, podem alimentar-se 900 habitações de 3 pessoas, exceptuando o aquecimento eléctrico.

|                  | Diâmetro das pás | Valores de potência      |
|------------------|------------------|--------------------------|
| Pequena potência | <12 m            | < 40 kW                  |
| Média potência   | 12 a 45 m        | 40kW a 1 MW ( qq 100 kW) |
| Grande potência  | > 46 m           | > 1 MW                   |

## 2. APRESENTAÇÃO DO ESTUDO

No estudo de um aerogerador equipado com uma MAS (máquina assíncrona), que é o caso mais comum, há interesse em conhecer o valor dos binários  $\Gamma_L$ ,  $\Gamma$  e  $\Gamma_g$  e as velocidades dos eixos primário e secundário :  $\Omega_L$  e  $\Omega$ .

O eixo primário é o do rotor da eólica, dito lento, e que roda à velocidade  $\Omega_L$ , fornecendo o binário  $\Gamma_L$ . O eixo secundário é o do gerador que está directa, ou indirectamente, ligado à rede. O rotor do gerador roda à velocidade  $\Omega$ , e fornece o binário electromagnético  $\Gamma_g$ .



Para otimizar a potência eléctrica activa  $P$  que é produzida em função da velocidade do vento, regula-se a velocidade  $\Omega_L$  de rotação do aerogerador. Para um determinado valor de velocidade de vento, o ponto de funcionamento do aerogerador pode ser determinado a partir da característica da potência  $P$  fornecida pelo aerogerador, em função da velocidade  $\Omega_L$  da turbina. O ponto de funcionamento nominal é escolhido de forma a que a potência produzida seja máxima.

O ponto de funcionamento também pode ser definido pelas potências activa  $P_M$  e reactiva  $Q_M$ , a tensão simples  $V_s$ , a potência da carga  $P_{CH}$ , e o factor de potência  $\cos \varphi$ . Desta forma,  $P_M$  e  $Q_M$  irão variar com a velocidade do vento.

## 3. CONVERSÃO DE ENERGIA

**Variação da velocidade do vento,  $v$ , em função da altura,  $h$**

$$\frac{V}{V_0} = \left(\frac{h}{h_0}\right)^\alpha$$

$V_0$  : velocidade em m/s à altura de referência  $h_0$  do solo  
 $\alpha$  : coeficiente característico do local; entre 0,1 e 0,4

### Coeficiente de potência $C_p$

A energia recuperável do vento, está associada à energia cinética do vento ao atravessar uma determinada superfície  $S$ ; a potência associada é:

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3$$

Contudo, esta energia não pode ser inteiramente recuperada pelo aerogerador, pois há que evacuar o ar turbinado; introduz-se, assim, o coeficiente  $C_p$  no cálculo da potência:

$$P_{turbine} = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot S \cdot v^3$$

$v$  : velocidade do vento em m/s

$\rho \sim 1,25 \text{ kg/m}^3$ , massa volúmica do ar, nas condições normais de temperatura e de pressão ao nível do mar.

$S$  : superfície do círculo correspondente ao ar turbinado pelas pás, em  $\text{m}^2$

O coeficiente  $C_p$  caracteriza o nível de rendimento de uma turbina eólica; pode ser definido pela razão:

$$C_p = \frac{\text{Potência disponível no eixo}}{\text{Potência disponível (recuperável)}}$$

### Binário $\Gamma$ produzido pela eólica

$$\Gamma = \frac{P}{\Omega} = \frac{\frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot S \cdot v^3}{\Omega}$$

Define-se, também, o coeficiente de binário  $C_\Gamma$  como:

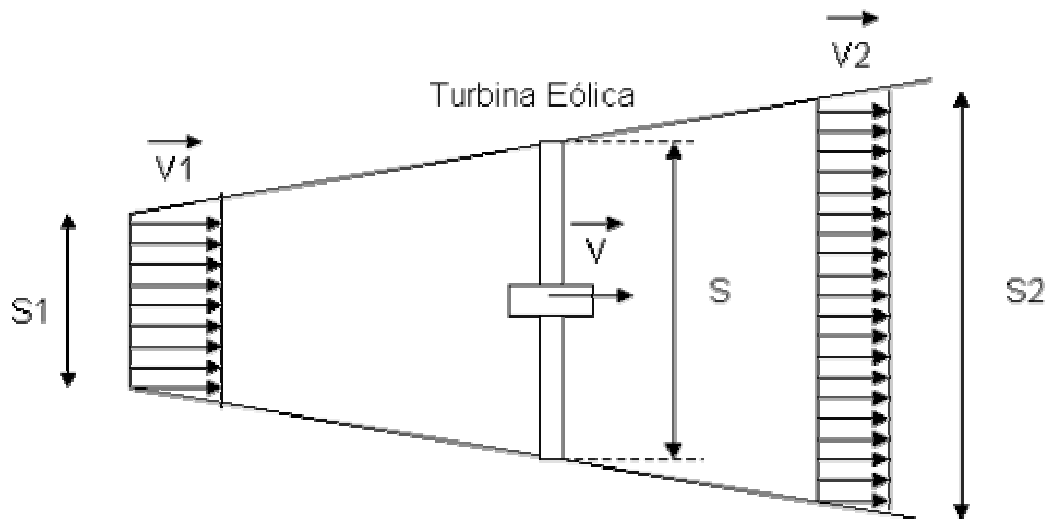
$$C_\Gamma = \frac{C_p}{\lambda}$$

**ver : exercício 6 : Binário Mecânico**

### Limite de Betz

O coeficiente de potência foi introduzido pela teoria de Betz. O limite de Betz indica que, mesmo para os melhores aproveitamentos eólicos (turbinas de 2 ou 3 pás de eixo horizontal), recupera-se apenas um máximo de 59% da energia do vento, o que significa que  $C_p$  máximo (teórico) é, aproximadamente, 0,59. Para uma aplicação real, este coeficiente é da ordem de 0,3 a 0,4 no máximo.

A teoria de Betz modeliza a passagem do ar antes e após a turbina, por um tubo de corrente onde:



$V_1$  é a velocidade do vento antes das pás da turbina

$V$  é a velocidade do vento nas pás da turbina, da ordem de 10 m/s

$V_2$  é a velocidade do vento após ter transferido energia às pás da turbina

Onde  $V_1 > V > V_2$ , e sendo estas velocidades paralelas ao eixo do rotor.

Nota: O valor máximo de  $C_p$  pode determinar-se através de um balanço de potência, atendendo a que:

- por um lado, a potência recuperável pelo aproveitamento eólico é a devida à variação de energia cinética do vento, pelo que:

$$P_{recup} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V \cdot (V_2^2 - V_1^2)$$

- por outro lado, à força exercida sobre a eólica pode associar-se uma potência  $P_{Força}$ : pela conservação do momento linear, obtém-se:  $F = \rho \cdot S \cdot V \cdot (V_1 - V_2)$   
 Onde:

$$P_{Força} = F \cdot V = \rho \cdot S \cdot V \cdot (V_1 - V_2) \cdot V = \rho \cdot S \cdot V^2 \cdot (V_1 - V_2)$$

$P_{\text{Força}}$  corresponde à potência absorvida pelo rotor, isto é, à potência transmitida ao gerador.

#### ver exercício 4 : Determinação do limite de Betz

#### Relação de velocidade $\lambda$

Define-se  $\lambda$  como a velocidade específica, ou relação de velocidade (tip-speed ratio) como a relação entre a velocidade linear da extremidade da pá e a velocidade do vento:

$$\lambda = \frac{R\Omega}{V}$$

R : comprimento das pás, em m

$\Omega$  : velocidade das pás, em rpm

V : velocidade do vento, em m/s

Para que se tenha uma ordem de grandeza para este parâmetro : Se  $\lambda < 3$ , diz-se que a eólica é lenta, se  $\lambda > 3$ , diz-se que a eólica é rápida.

A característica  $C_p(\lambda)$ , específica de cada eólica, permite classificar os diferentes tipos de eólicas.

No dimensionamento da eólica há, também, que ter em conta os esforços inerciais e elásticos devidos ao movimento das pás; movimento de arrasto, de batimento, de torsão; somam-se a estes, os efeitos da velocidade do vento, do gradiente de velocidade. Todos estes esforços são exercidos nas pás e, de seguida transmitidos ao núcleo da turbina e à estrutura da eólica, à torre.

#### Os parâmetros de uma turbina eólica são:

- o rendimento da máquina
- a massa volúmica do ar, em  $\text{kg/m}^3$
- o número de pás
- o comprimento das pás, em m
- o passo da hélice
- a superfície varrida pelas pás, em  $\text{m}^2$
- o ângulo de inclinação das pás
- a altura da torre, em m
- a velocidade nominal do vento, em m/s
- o rendimento
- a velocidade nominal do rotor, em tr/min

#### Balanço de potências:

$$\eta_{\text{aerogén. teor}} = \eta_{\text{turbine}}$$

|                                    |   |             |
|------------------------------------|---|-------------|
| Pmax mecânica fornecida ao gerador | → | P eléctrica |
|------------------------------------|---|-------------|

Ver:

**Exercício 1 : Comprimento de uma pá**

**Exercício 5 : Parâmetros de um aerogerador de 300 kW de velocidade constante**

#### 4. O MULTIPLICADOR

O multiplicador de velocidade caracteriza-se pela sua relação de transformação de velocidades e pelo seu rendimento.

**Cálculo da relação de multiplicação**

$$\Omega_{MAS} = \Omega_{turbina} \text{ relação do multíp.}$$

$\Omega_{MAS}$ : velocidade de rotação do eixo da MAS

**Cálculo do rendimento**

$$P_{MAS} = P_{meca} \text{ rendimento}$$

$P_{MAS}$ : potência mecânica do eixo da MAS

$P_{meca}$ : potência mecânica fornecida pela turbina eólica

**ver: Exercício 2 : Velocidade de rotação e potência eléctrica de um aerogerador**

#### 5. ESPECIFICAÇÕES DA MAS

**Balço de Potências:**

$$\begin{array}{ccc} & \text{MAS} & \\ P_{meca} & \longrightarrow & P_{eléc} (Ps) \end{array}$$

$$P_S = P_{mecâ} - \sum P_{perdas}$$

A potência mecânica  $P_{meca}$  é fornecida pela turbina eólica. O trânsito de potência faz-se do rotor para o estator. A máquina roda a uma velocidade superior à de sincronismo, o que quer dizer que o escorregamento é negativo.

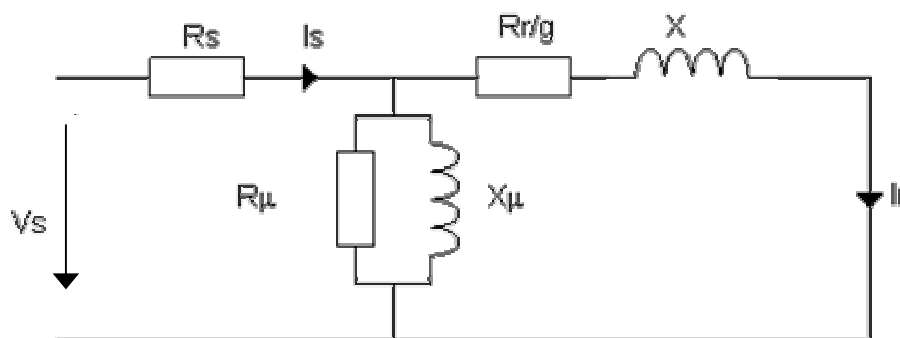
**As características do gerador (MAS) são:**

- o número de pólos
- a potência nominal, em kW
- a velocidade nominal, em rpm
- o rendimento nominal
- o  $\cos \varphi$  nominal
- o binário electromagnético, em Nm
- a corrente nominal do estator, em A
- a tensão do rotor, em V, no caso de a MAS ser de rotor bobinado.
- a frequência de alimentação do estator, em Hz
- o tipo de ligação do estator (estrela ou triângulo)
- a tensão de alimentação do estator, em V
- a velocidade de sincronismo, em rpm

### Conhecimentos sobre a MAS

No âmbito do estudo de um aproveitamento eólico, a MAS funciona como gerador e não como motor. As noções básicas sobre esta máquina, incluem:

- velocidade de sincronismo
- escorregamento
- balanço de perdas em funcionamento gerador
- binário electromagnético
- hipóteses de Kapp
- conhecimento dos parâmetros do esquema equivalente e respectiva determinação através dos ensaios em vazio, com o rotor bloqueado e ensaio em corrente contínua (medição das resistências)
- cálculo das potências activa e reactiva trocadas com a rede
- noção de saturação do circuito magnético



- $I_s$  - corrente do estator
- $R_s$  - resistência do estator
- $V_s$  - tensão simples do estator
- $R_\mu$  - resistência magnética
- $X_\mu$  - reactância magnética
- $R_r/g$  - resistência do rotor, considerando o escorregamento  $g$
- $X$  - reactância do rotor
- $I_r$  - corrente do rotor

*Esquema equivalente por fase, da máquina assíncrona*

### ver : Exercício 3: Estudo do gerador assíncrono de um aerogerador

#### 6. ESPECIFICAÇÕES DA MS

O número de pares de pólos da máquina síncrona,  $p$ , relaciona-se com a velocidade de rotação,  $V$ , através de:

$$V(\text{rpm}) = \frac{60 f}{p}$$

Por exemplo:

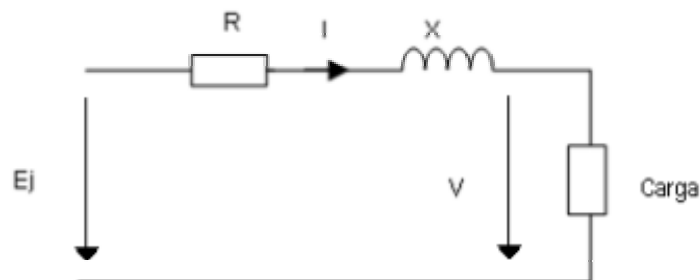
- Para  $f=50$  Hz, 2 pares de pólos : 1500 rpm
- Para  $f=60$  Hz, 1 par de pólos: 3600 rpm

Pode escolher-se a potência do gerador em função da velocidade desejada:

- pequena, para uma velocidade elevada e, portanto, reduzido número de pólos,
- grande, para uma velocidade reduzida e, portanto, elevado número de pólos.

#### Relativamente à máquina síncrona em funcionamento de gerador:

- .. conhecimento da noção de binário
- .. conhecimento da relação entre velocidade e número de pólos
- .. conhecimento dos ensaios em vazio e com o rotor bloqueado
- .. determinação dos elementos do esquema equivalente



$E_j$  – força electromotriz  
 $R$  – resistência do enrolamento  
 $I$  – corrente absorvida pela carga  
 $X$  – reactância síncrona  
 $V$  – tensão simples aos terminais do gerador

*Esquema equivalente por fase, da máquina síncrona*

#### 7. ESPECIFICAÇÕES DO ONDULADOR

##### Conhecimentos necessários:

- calcular as perdas em condução
- dimensionamento dos dispositivos interruptores de potência
- calcular as perdas totais
- conhecimento do esquema térmico equivalente (dissipador)
- calcular a taxa de distorsão

#### **Os parâmetros:**

Um dos parâmetros do ondulator é a sua frequência de funcionamento.

### **8. CARACTERÍSTICAS DA REDE**

#### **Parâmetros da rede**

- a potência de curto-circuito  $P_{cc}$

#### **Tipos de rede**

- rede em ilha: o gerador é regulado de forma a gerar uma tensão de valor eficaz e frequência fixas numa gama de velocidade limitada.
- rede infinita ou de potência infinita: a rede impõe a tensão  $V$  e a frequência  $f$ , o que impõe a velocidade do eixo do gerador. O aerogerador fornece um complemento de potência à rede e considera-se que a sua impedância interna é nula. Para o caso de rede infinita, o gerador é regulado em tensão e frequência antes de se efectuar a sua ligação à rede. Posteriormente, procede-se à regulação das potências activa e reactiva.
- rede com impedância interna:  $X_L$  e  $R_L$ . A potência de curto-circuito  $P_{cc}$  tem um valor definido.

### **9. BATERIA DE CONDENSADORES**

#### **Conhecimentos necessários:**

- Efectuar a compensação do factor de potência

#### **Os parâmetros:**

- a potência fornecida, em kVar
- a tensão nominal, em V

**ver : Exercício 3: Estudo do gerador assíncrono de um aerogerador**

### **10. OS FILTROS**

A utilização de conversores electrónicos de potência requer o uso de filtros para diminuir a taxa de distorção harmónica.

#### Conhecimentos:

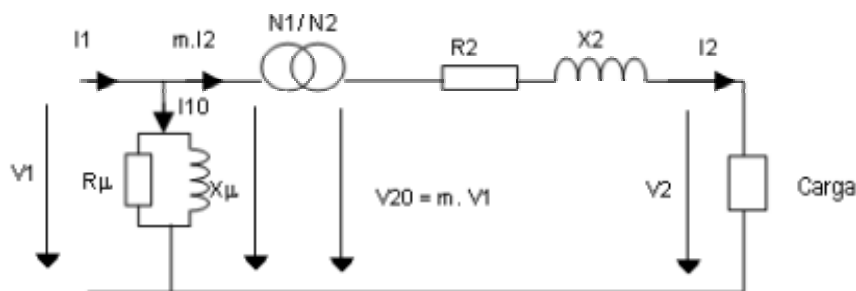
- ” noção de harmónica
- ” noção de taxa de distorção
- ” dimensionamento do filtro: valor de L e C

## 11. OS TRANSFORMADORES

A ligação do aerogerador à rede faz-se através de um transformador.

#### Conhecimentos necessários:

- ensaio em corrente contínua, ensaio em vazio e em curto-circuito
- esquema equivalente



$V_1$  – tensão simples do primário  
 $I_1$  – corrente do primário  
 $I_{10}$  – corrente de magnetização  
 $R_\mu$  – resistência de magnetização  
 $X_\mu$  – reactância de magnetização  
 $I_2$  – corrente do secundário  
 $N_1$  – número de espiras do primário  
 $N_2$  – número de espiras do secundário  
 $R_2$  – resistência equivalente referida ao secundário  
 $X_2$  – reactância de fugas referida ao secundário  
 $m$  – relação de transformação

*Esquema equivalente monofásico do transformador*

$$\text{com : } R_1 = r_1 + \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 r_2 \quad r_2 = r_1 + \frac{r_2}{m^2}$$

$$X_1 = \left[1 + \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2\right] X_2 = \left[1 + \frac{1}{m^2}\right] X_2$$

$r_1$  : resistência do enrolamento primário

$r_2$  : resistência do enrolamento secundário

$l_1$  : indutância de fugas do primário

$l_2$  : indutância de fugas do secundário

$\omega$  : frequência angular das grandezas eléctricas