



*Curso de*  
*Energias Renováveis*

Ana Estanqueiro

**Princípio de funcionamento de  
turbinas eólicas: parte I**

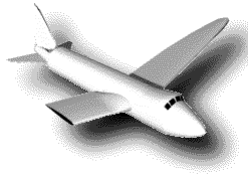


Turbinas Eólicas

**Princípio de funcionamento**



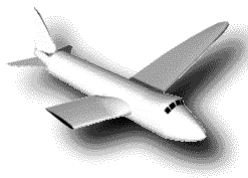
## Turbinas Eólicas: Princípio de funcionamento



INETI



## Turbinas Eólicas: Princípio de funcionamento



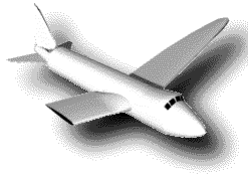
Lift ↑



INETI



## Turbinas Eólicas: Princípio de funcionamento



Lift ↑

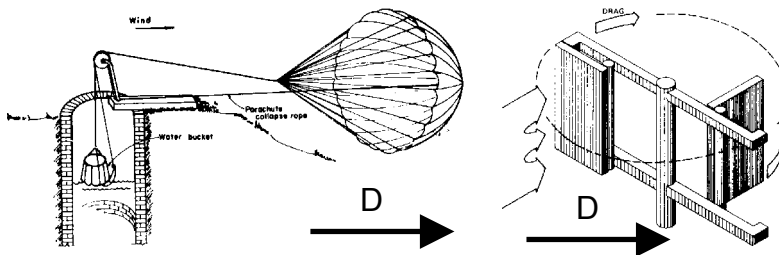


$$P = \frac{1}{2} \rho C_p A V^3$$

INETI



## Turbinas Eólicas: Princípio de funcionamento



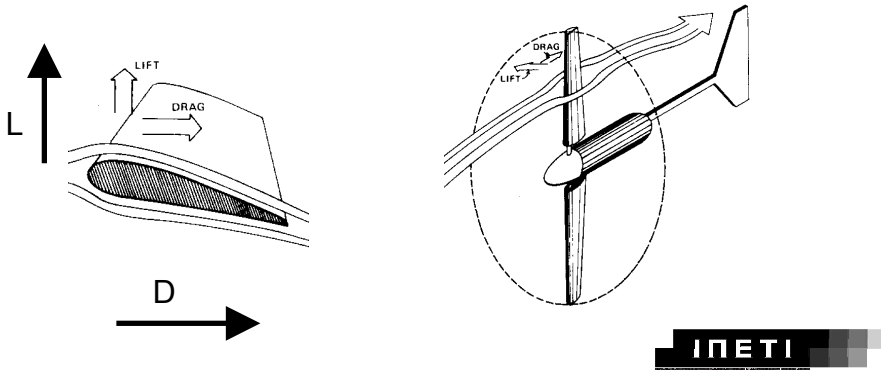
INETI



## Turbinas Eólicas: Princípio de funcionamento

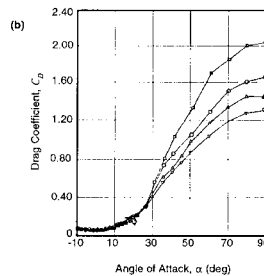
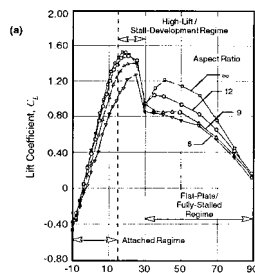
Forças actuantes na:

a) pá/asa de uma turbina b) Forças num rotor eólico



## Turbinas Eólicas: Princípio de funcionamento

- Variação típica de  $C_L$  (a) e  $C_D$  (b) de um perfil (NACA 44\*\*) em função do ângulo de ataque





## Turbinas eólicas

# Aspectos tecnológicos e operacionais



## Turbinas eólicas: aspectos tecnológicos

- **Eixo vertical vs eixo horizontal.**
- **Velocidade rotação “fixa” vs variável.**
- **Gerador de indução ou síncrono.**
- **Ligação à rede directa vs controlada.**
- ...



## Tipos de Turbinas: Eixo horizontal e vertical



Comuns



Fora fabrico

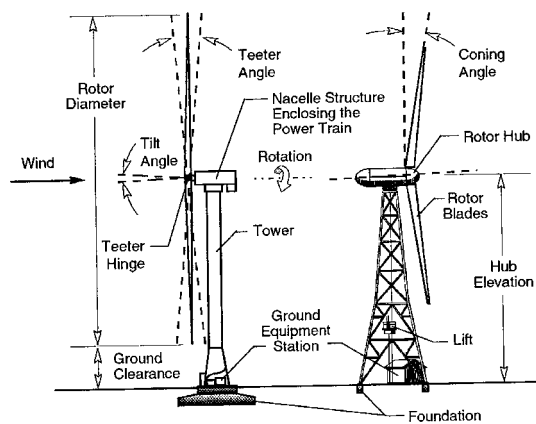
11



## Princípio de funcionamento

### Turbinas Eólicas HAWT:

**Dimensões e parâmetros relevantes**

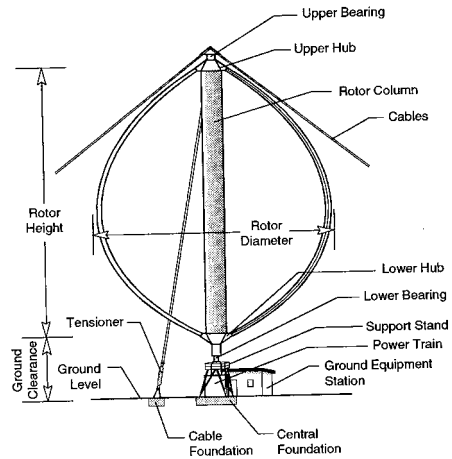




## Princípio de funcionamento

### Turbinas Eólicas VAWT:

Dimensões e parâmetros relevantes

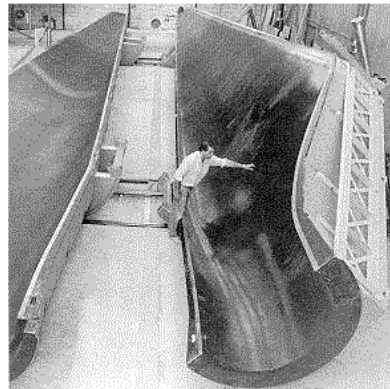
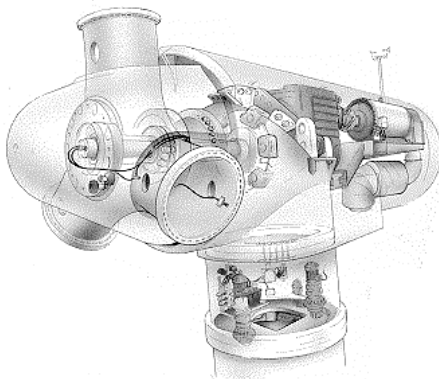


13



## Princípio de funcionamento

### Turbinas HAWT: Estrutura da *nacelle* e das pás





## Turbinas eólicas

### Caracterização do desempenho de um rotor eólico

15



### Caracterização do desempenho de um rotor eólico

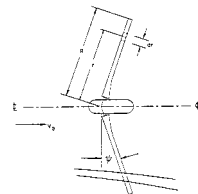
- **Parâmetros relevantes de projecto e caracterização de desempenho:**

– Solidez:

$$\sigma = \frac{NC}{\pi R^2}$$

– Velocidade na ponta da pá:

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

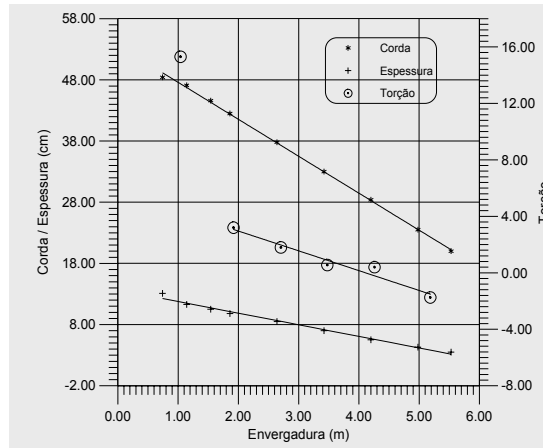






## Caracterização do desempenho de um rotor eólico

- **Parâmetros relevantes de projecto:**

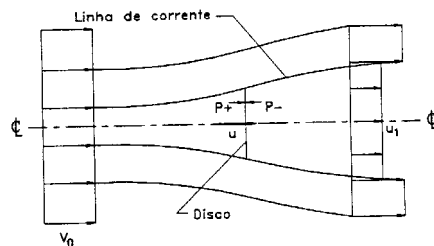


17



## Caracterização do desempenho de um rotor eólico

- **Teoria do disco actuador (Rankine-Froude):**
  - determinação da força axial e coeficiente de potência máximo



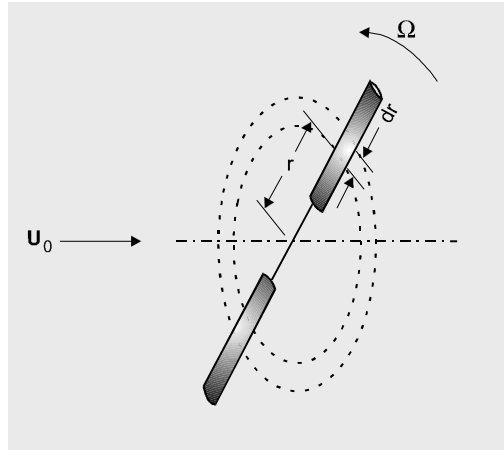
$$F_{ax} = \dot{m}(V - V_1) = \rho\pi R^2 V(V - V_1)$$

18



## Caracterização do desempenho de um rotor eólico

- **Método do elemento de pá (1):**

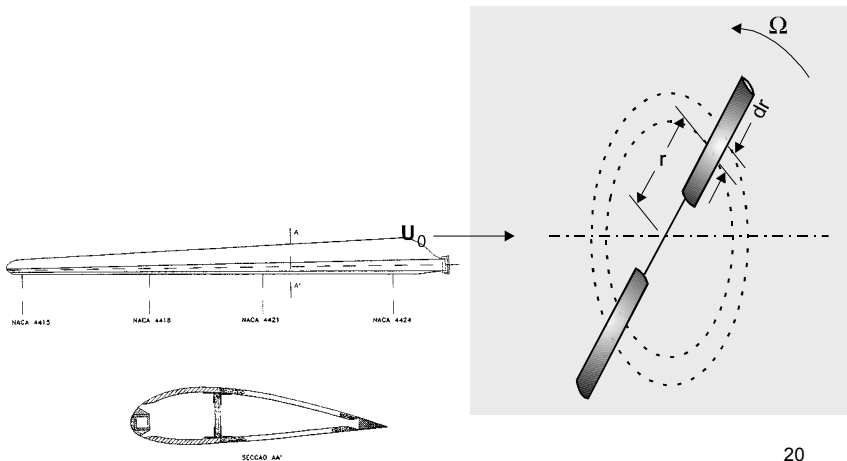


19



## Caracterização do desempenho de um rotor eólico

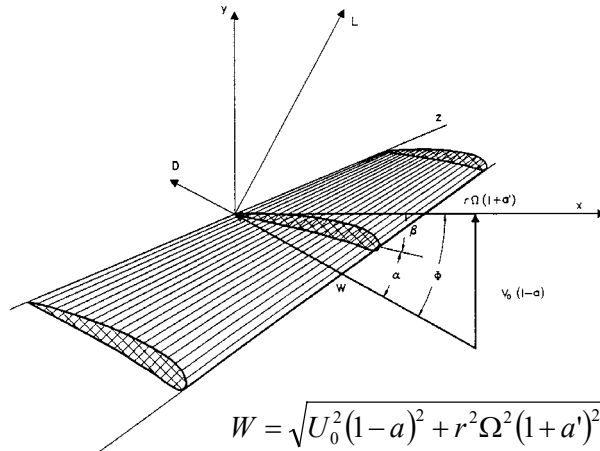
- **Método do elemento de pá (2):**



20



• Teoria de Glauert/elemento de pá:



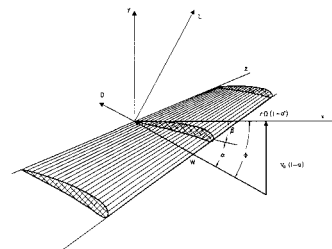
• Teoria de Glauert/elemento de pá:

– Força axial

$$dF_{ax} = \frac{1}{2} \rho B C W^2 C_y dr$$

– Binário/torque/par

$$dQ = BrdF_{\tan g} = \frac{1}{2} \rho W^2 B C C_x r dr$$





• Teoria de Glauert/elemento de pá:

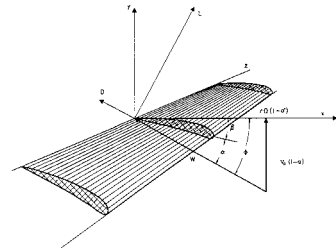
$$\phi = \alpha + \psi$$

$$W = \sqrt{V_0^2(1-a)^2 + r^2\Omega^2(1+a')}$$

$$\text{tg } \phi = \frac{1-a}{1+a'}$$

$$C_x = C_L \sin \phi - C_D \cos \phi$$

$$C_y = C_L \sin \phi + C_D \cos \phi$$



• Teoria de Glauert / elemento de pá:

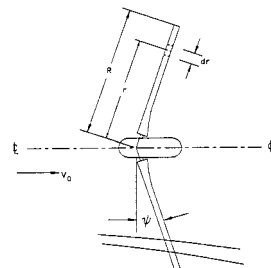
– Torque/par:

$$Q_{mec} = \int_0^r dQ = \frac{1}{2} \rho \int_0^r W^2 B C C_x r dr$$

– Velocidade de rotação



– Potência no eixo





## Caracterização do desempenho de um rotor eólico

- **Limite de Betz:**

*Limite máximo de potência extraível do escoamento (Betz, 1927):*

$$C_{P_{max}} = \frac{P_{max}}{\frac{1}{2} \rho A V_0^3} = \frac{16}{27} = 0.593$$

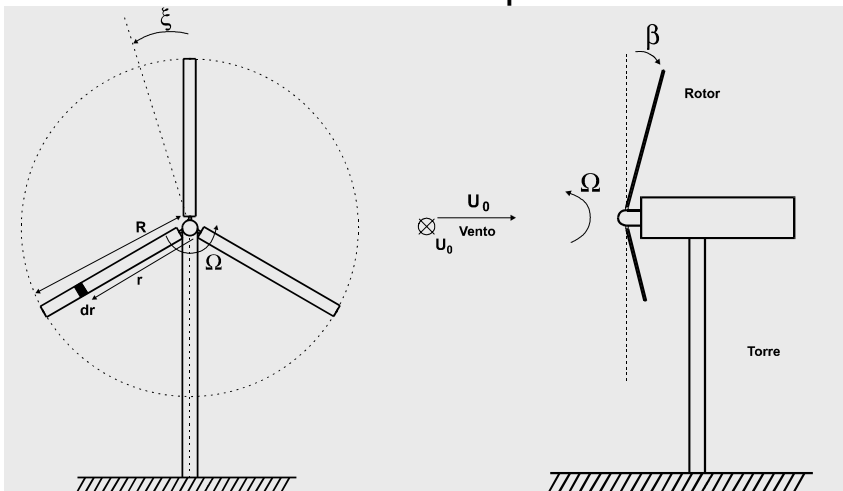
Potência incidente

25



## Caracterização do desempenho de um rotor eólico

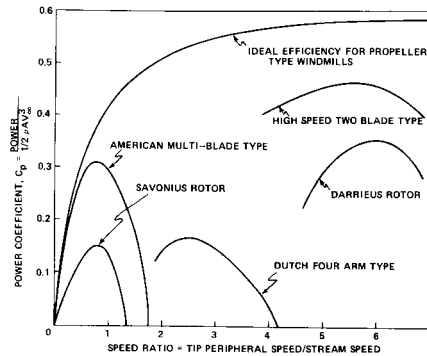
- **Graus de liberdade das pás:**





## Caracterização do desempenho de um rotor eólico: Curva de potência ou de $C_p$

- **Factor de potência ( $C_p$ ) dos vários tipos de turbinas:**

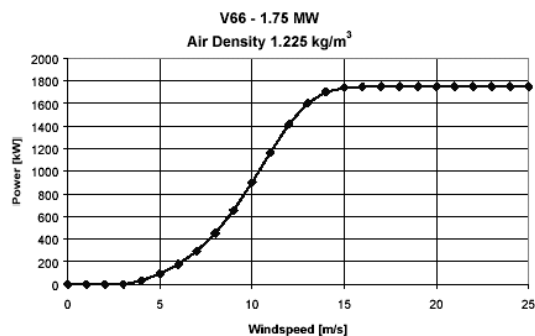


27



## Caracterização do desempenho de um rotor eólico: Curva de potência ou de $C_p$

- **Curva de potência (caract. actual):**



28



## **Tipos de Turbinas: Outros Parâmetros**

- **Regulação potência**
  - Passo fixo (“stall”)
  - Passo variável (pitch”)
- **Posição Rotor face à Estrutura de suporte**
  - Em frente à torre (“upwind”)
  - Atrás da torre (“downwind”)

**INETI**



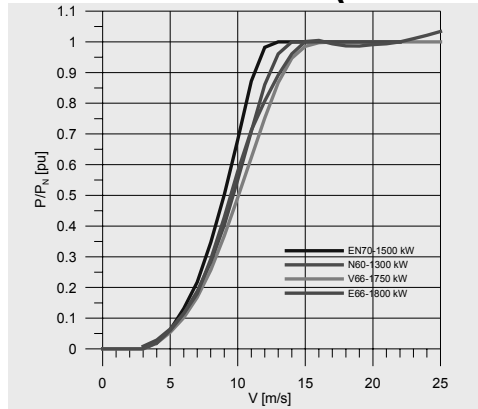
## **Turbinas Eólicas**

**Aspectos tecnológicos e operacionais:  
Regulação de potência**



## Regulação de potência

- **Passo fixo vs variável (stall vs pitch):**



- **Análise comparativa da curva de potência adimensionalizada dos aerogeradores:**

- Nordex 1300 kW, Enron 1500 kW, Vestas 1750 kW e Enercon 1800 kW

31



## Turbinas eólicas

**Aspectos tecnológicos e operacionais: :  
estrutura de suporte**

32

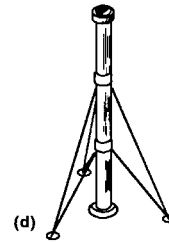
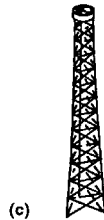
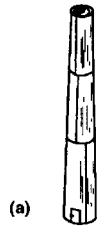




## Estruturas de Suporte

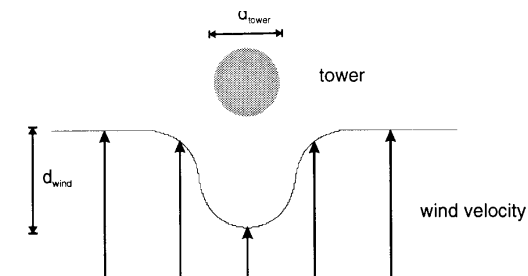
### Tipos de torres:

- a) troços aço
- b) betão
- c) treliça
- d) tubular espiada



## Estruturas de Suporte

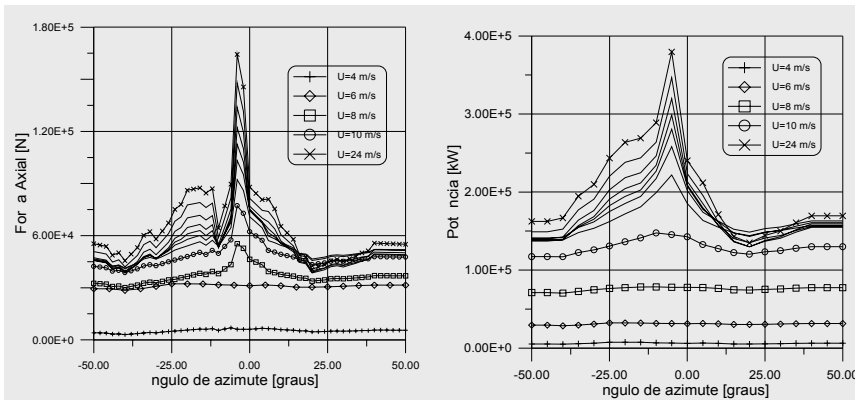
- Efeito de sombra da torre:





## Estruturas de Suporte

- Efeito de interferência da torre:



35



## Turbinas eólicas

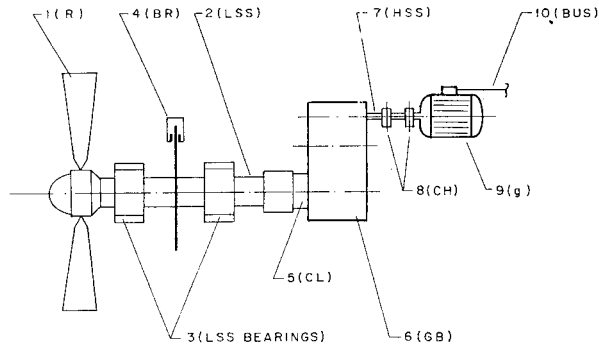
**Aspectos tecnológicos e operacionais:  
sistema de transmissão**

36



## Princípio de funcionamento

### Sistema de transmissão



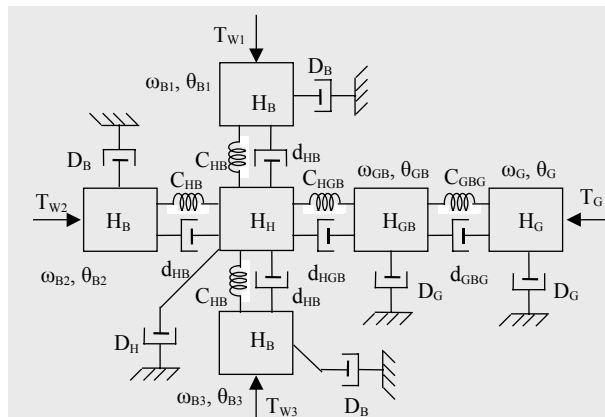
- |  |                                    |
|--|------------------------------------|
| 1. Sistema pás e cubo (rotor eólico);    | 6 - caixa de velocidades;          |
| 2. veio de baixa velocidade (VBV);       | 7 - veio de alta velocidade (VAV); |
| 3. chumaceiras do VBV;                   | 8 - união elástica;                |
| 4. travão de disco/sistema de segurança; | 9 - gerador eléctrico              |
| 5. união elástica                        | 10 - ligação à rede eléctrica      |

37



## Princípio de funcionamento

### Típico Equivalente de um Sistema de Transmissão



38



## Turbinas eólicas

**Conversão mecano-eléctrica:  
O gerador eléctrico  
(Cont. Parte II)**