Sistemas Energéticos

3º ano 6º semestre

Aula 26

Aula 26: Energia Eólica

Tópicos

- ***Introdução***
- ***Modelo teórico de Betz***
- ***Lei exponencial de Hellmann***
- ***Distribuição de Weibull***
- ***Relação da velocidade periférica Ω***
- ***Factor de actividade FA***
- ***Rendimento aerodinâmico***
- ***Coeficiente de torque***
- ***Área frontal varrida por uma pá***

26.1 - Introdução

A energia eólica tal como a solar são as que actualmente têm merecido maior atenção dos Mídias. A energia eólica é tida como a que mais se desenvolveu nos últimos tempos. Como se pode ver na figura abaixo, a energia eólica ainda é a que ocupa a maior fatia das energias renováveis sem contar com a energia hídrica.

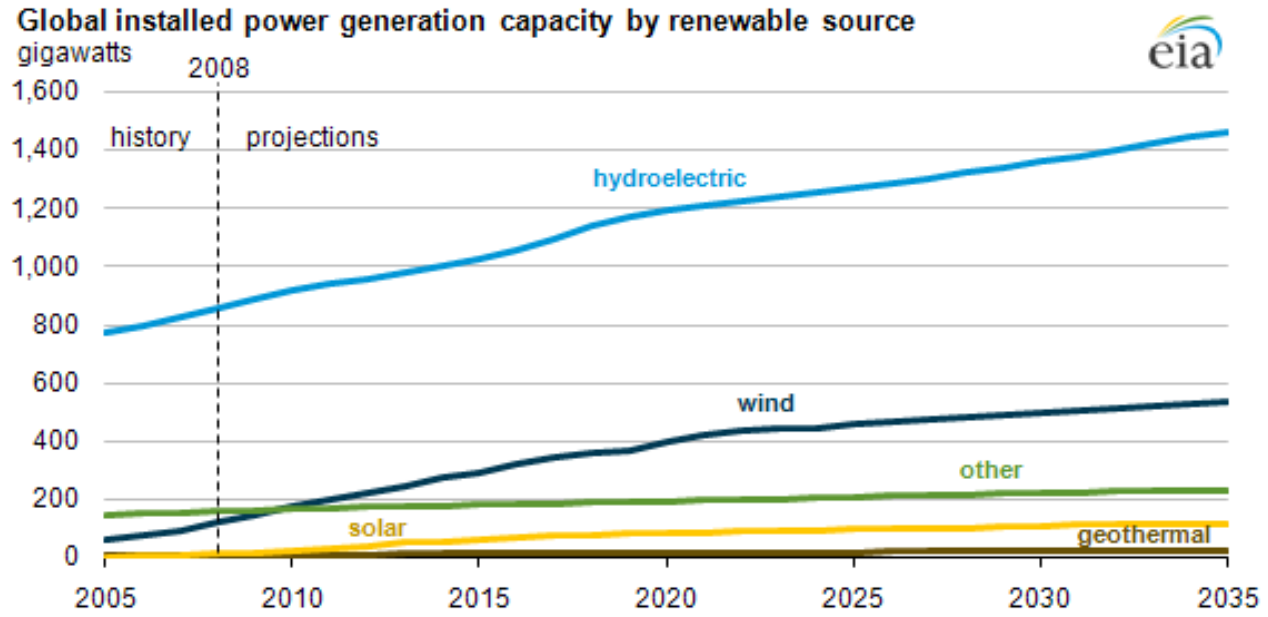


Figura 26.1 – Capacidade instalada de energias renováveis

26.1 - Introdução

A energia eólica a nível mundial aumentou 5,7 vezes desde 2007, e aumentou 18,7 vezes desde 2000. Em 2013 o mundo adicionou duas vezes mais energia em relação ao que tinha em 2000. O mundo levou décadas para alcançar 17 Gigawatts de capacidade, mas conseguiu acrescentar 111 Gigawatts em apenas um ano (2019-2020).

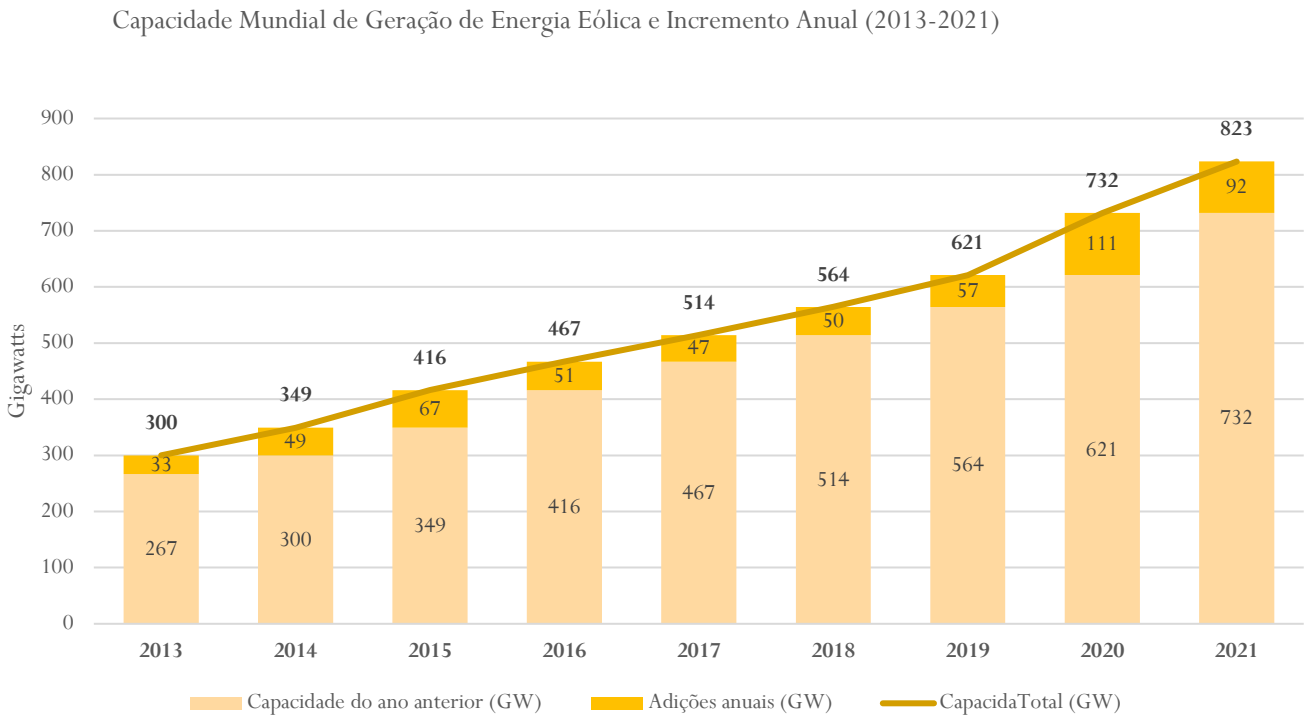


Figura 26.2 – Evolução da produção de energia eólica (IRENA 2022)

26.1 - Introdução

Os dispositivos para a utilização de energia eólica podem ser encontrados nos mais diferentes modelos. A aplicação prática de alguns dos sistema que se apresentam nas Figuras 26.2 e 26.3, nunca foi demonstrada. Os dispositivos mais comuns são as turbinas de duas ou três hélices e os moinhos de vento.

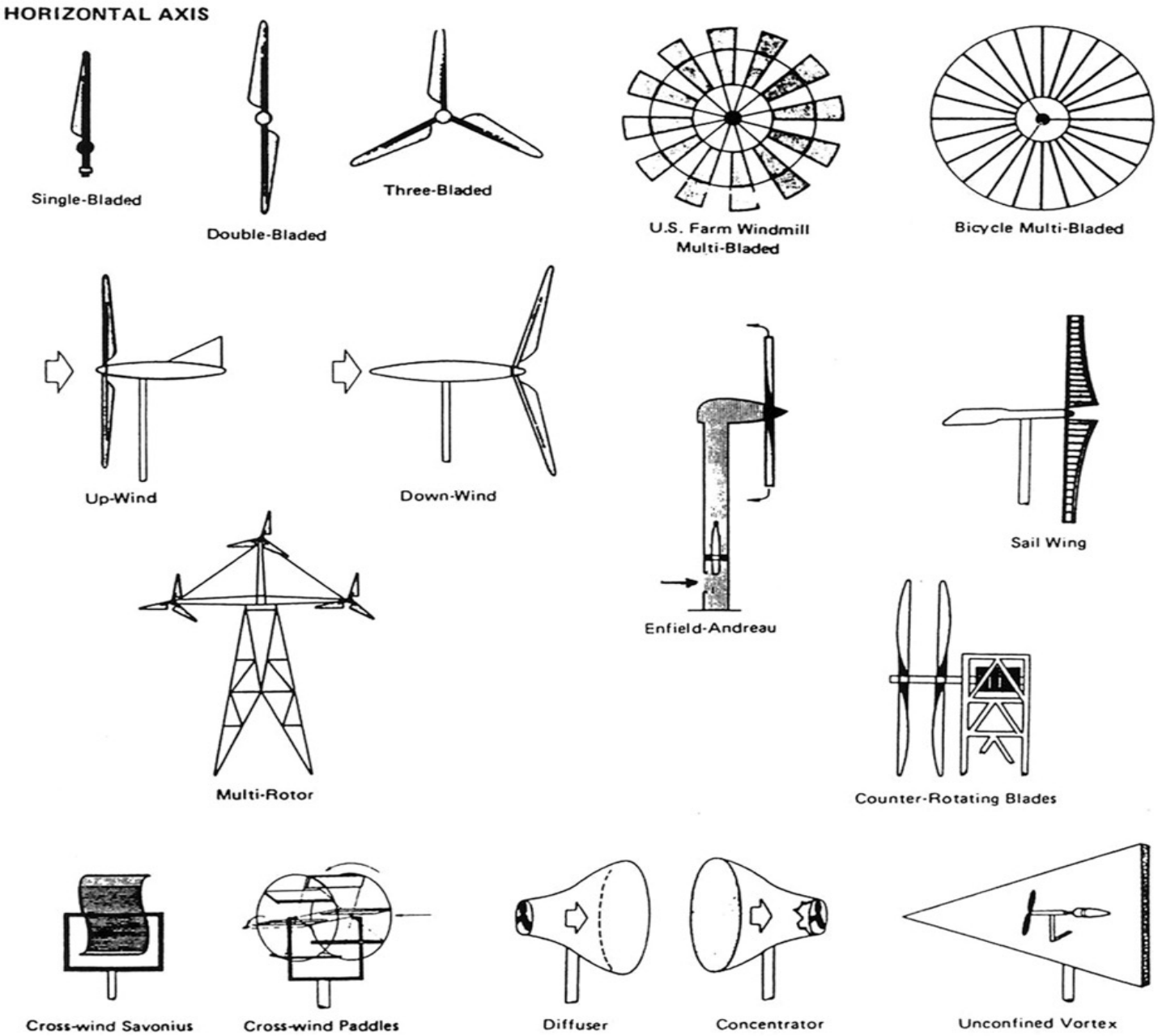
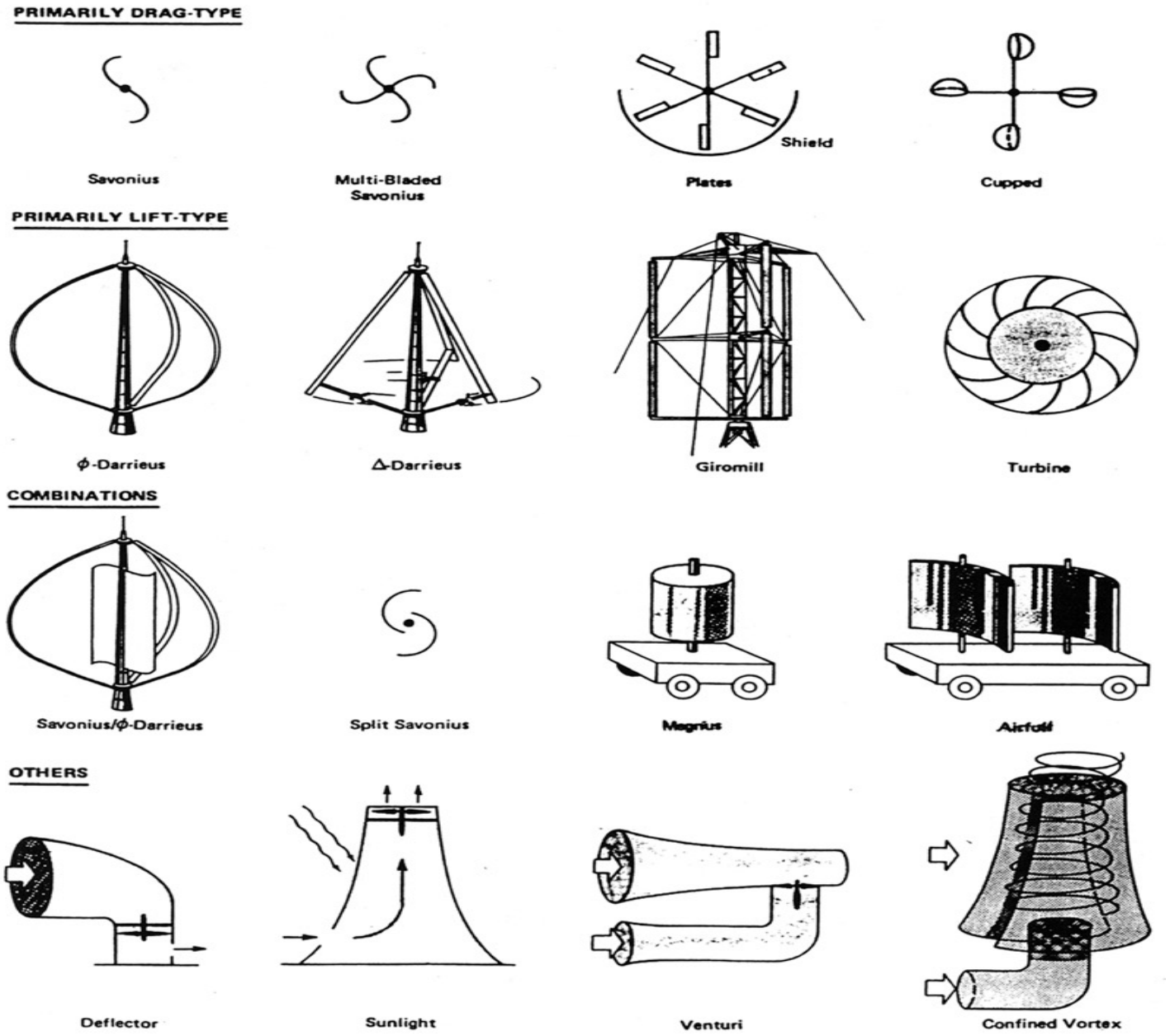


Fig. 26.3 – Diferentes configurações de turbinas eólicas

Fig. 26.4 – Diferentes configurações de turbinas eólicas



26.1 - Conceitos fundamentais

Antes de se discutir com pormenores o funcionamento das turbinas eólicas é necessário debruçarmo-nos sobre alguns detalhes dos componentes das mesmas. A torre é montada na base e na parte superior da mesma encontra-se o componente que contém a caixa de velocidades, os controlos e os subsistemas do gerador. O rotor é acoplado à caixa de velocidades por meio de um veio.

O diâmetro do rotor coincide com a área varrida.

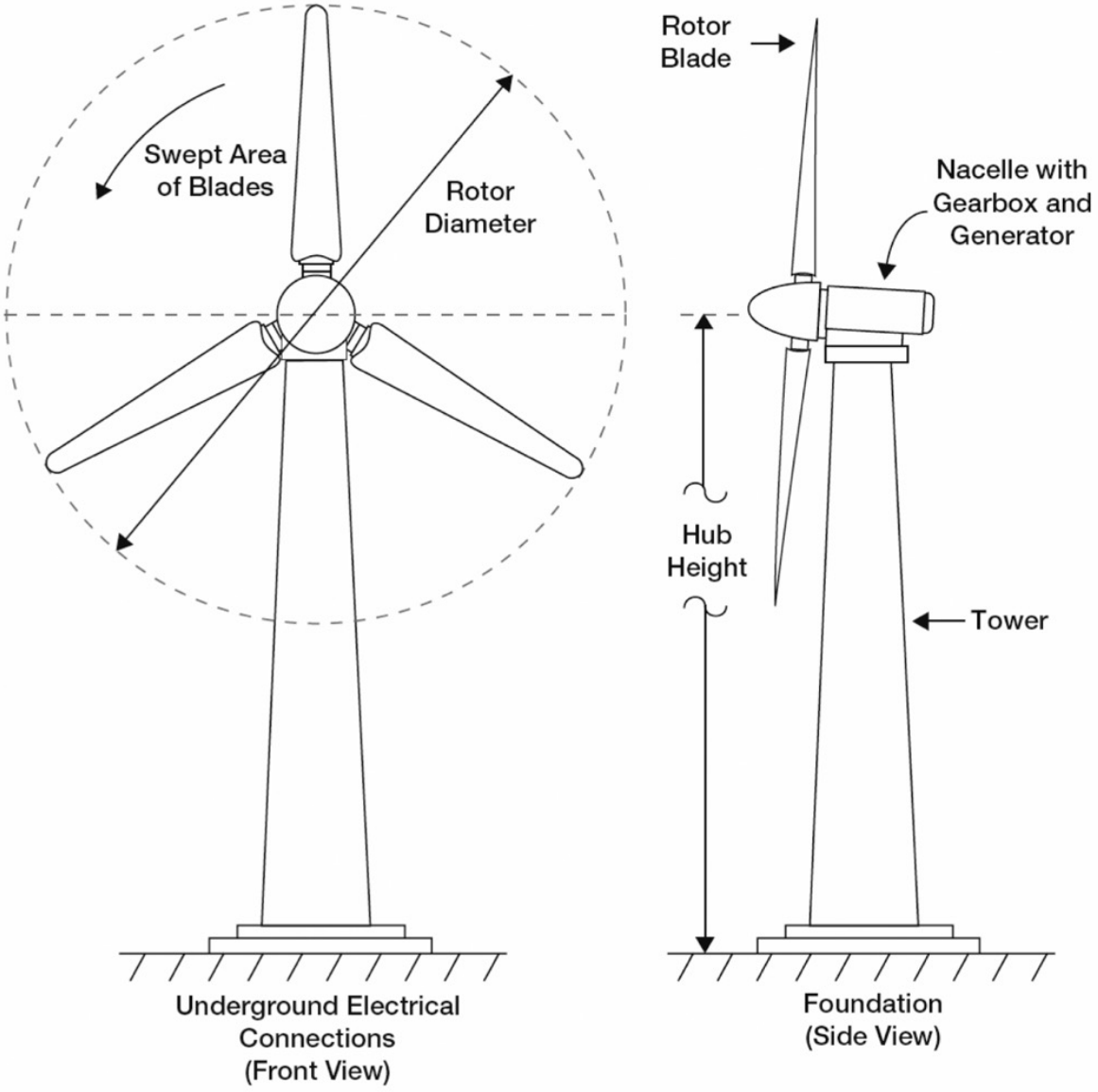


Fig. 26.5 – Componentes de turbina eólica

26.1 - Conceitos fundamentais

Desde o início dos anos 2000, as turbinas eólicas cresceram em tamanho – tanto em altura como em comprimento das pás – e geraram cada vez mais energia.

As turbinas eólicas aumentaram em altura da torre (ou cubo) (desde os 30 metros até os 90 m) e o diâmetro do rotor (de 30 m até 125 m) entre os anos 1990 e 2020, com a capacidade de geração de energia também a crescer de 0,2 MW até 3 MW. Inovações quase na fase comercial estão a produzir turbinas com altura maior que o topo da Estátua da Liberdade de Washington (169 m de altura) com um rotor com 150 m de diâmetro acoplado a uma torre de 160 m.

26.1 - Conceitos fundamentais

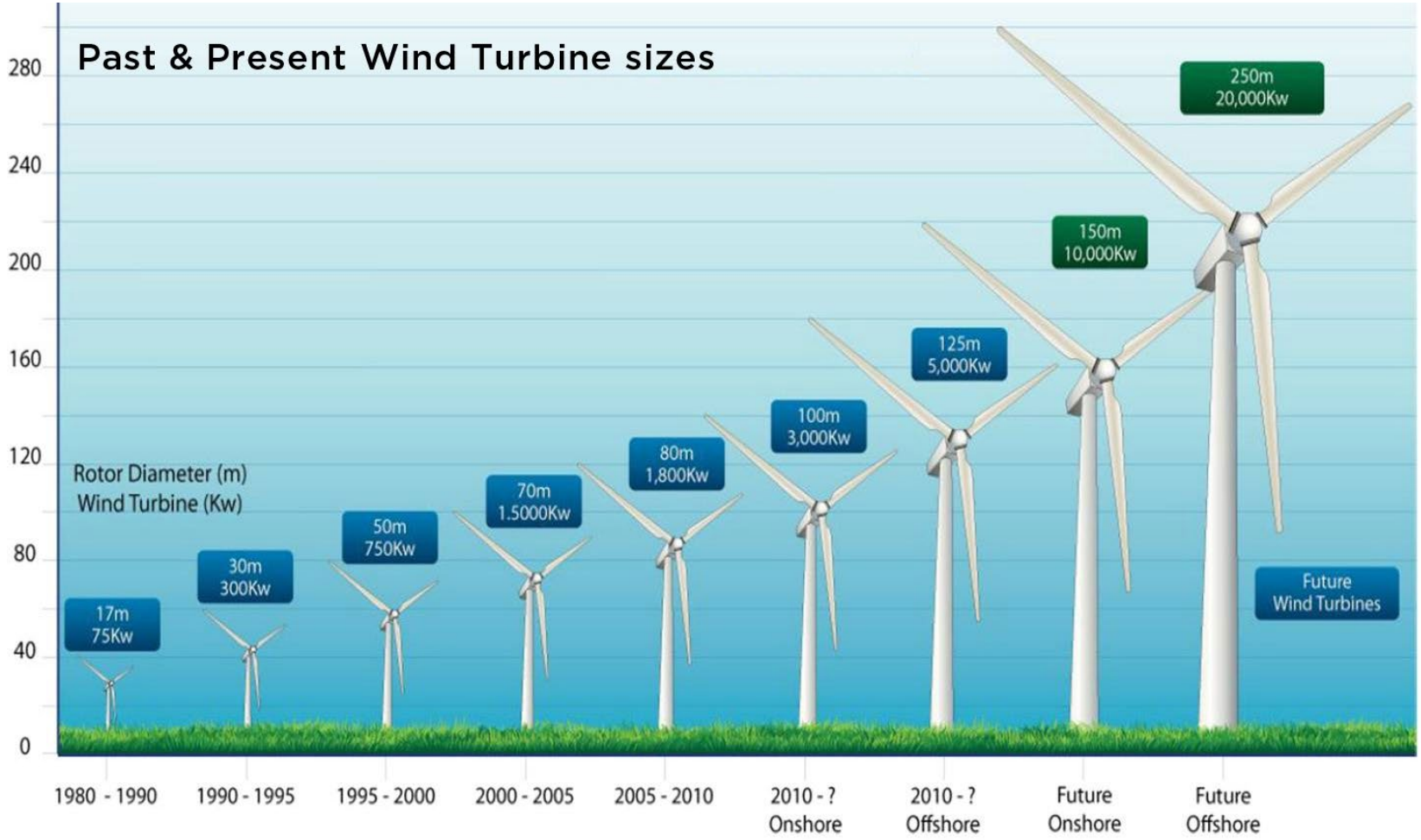


Fig. 26.4 – Passado, presente e futuro das dimensões das turbinas eólicas

26.1 - Conceitos fundamentais

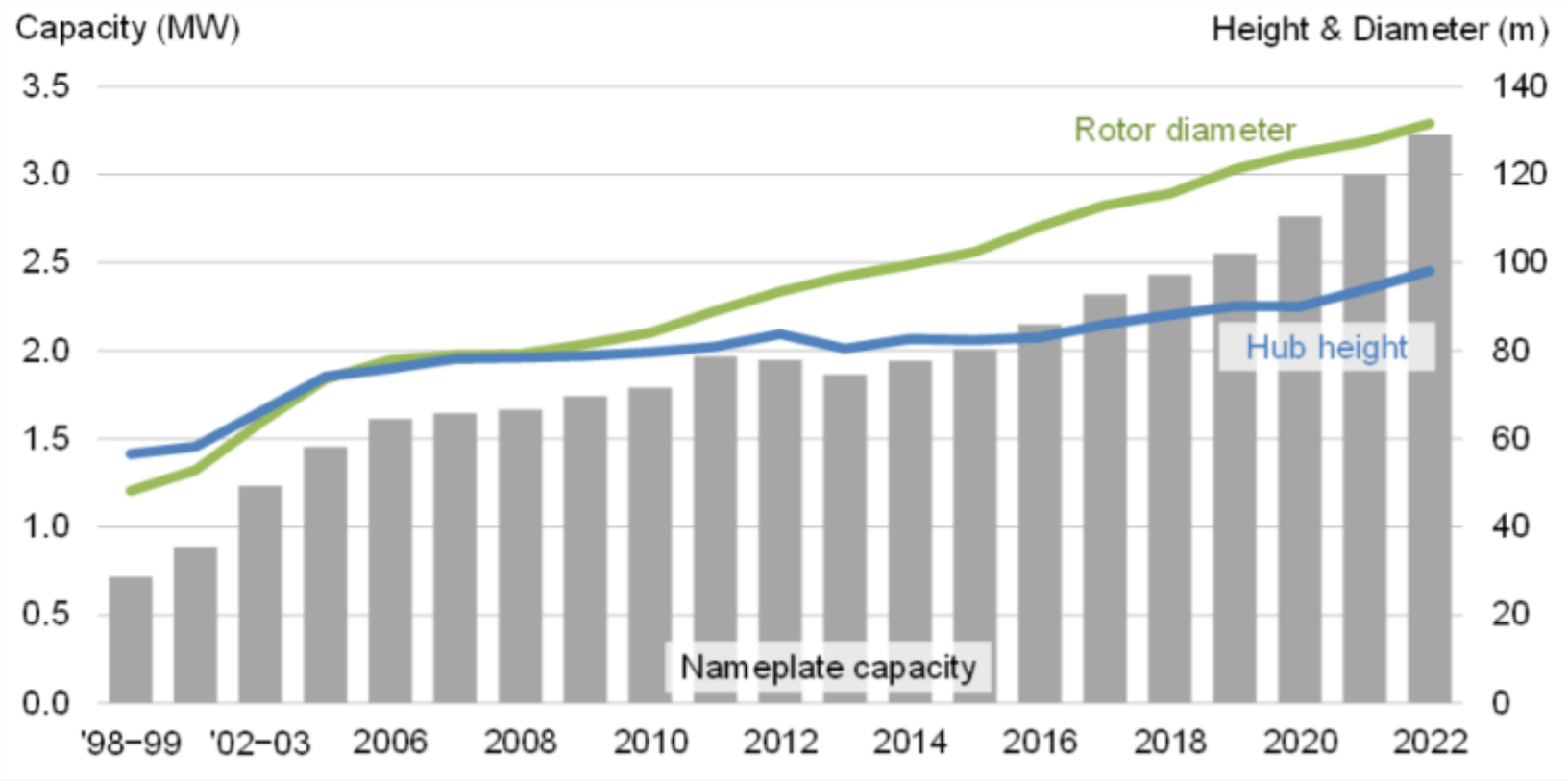


Fig. 26.5 – Evolução das dimensões das turbinas em função da potência produzida

26.2 - Modelo teórico de Betz

A potência disponível no vento com velocidade V, com o fluxo $\dot{m}$ varrendo uma área A é dada por:

$$P = \frac{1}{2}\dot{m}V^2 \qquad (26.1)$$

Como a massa do ar é dada por $\dot{m}=\rho AV$

$$P = \frac{1}{2}\rho AV^3 \qquad (26.2)$$

A Equação 26.2 é muito importante pois demonstra que a potência disponível no vento é proporcional a área varrida pela turbina eólica e ao cubo da velocidade do vento.

26.2 - Modelo teórico de Betz

A análise de Beltz utiliza uma aproximação de um actuador de disco. Na análise de actuador, toda a energia transferida tem lugar no plano do actuador e só a transformação da energia tem lugar nos extremos. A análise do actuador de disco apresenta-se em figuras no slide seguinte.

A figura mostra três distribuições: de pressão, velocidade e da área do fluxo transversal.

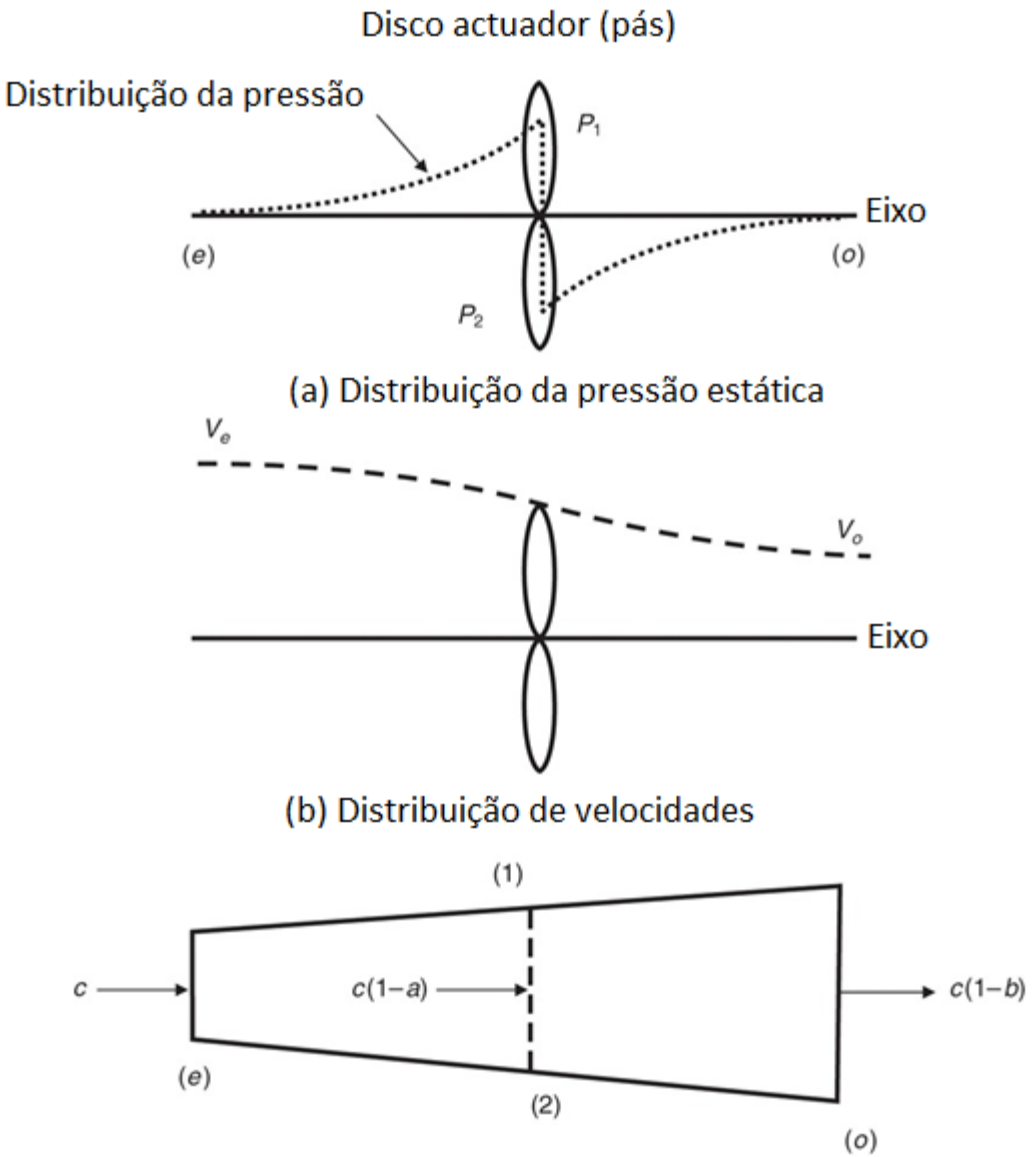


Fig 26.8 Distribuição de pressão, velocidade e a área do fluxo transversal.

26.2 - Modelo teórico de Betz

O disco do actuador é representado pelas pás nos gráficos de distribuição de pressão e de velocidade e pela linha tracejada na área de distribuição da secção transversal. A área do actuador, a área varrida pelas pás é:

$$A = (\pi/4)D^2$$

Onde D é o diâmetro do rotor.

Longe do rotor à entrada do fluxo, o ponto é denotado como (e) e na entrada, a velocidade do vento é denotada pela letra (c) nesta análise.

26.2 - Modelo teórico de Betz

No disco do actuador a velocidade reduz-se a c(1-a) e na saída, indicada por (o), a velocidade é c(1-b). Como a velocidade reduz-se de c para c(1-a) a montante do actuador, a pressão estática aumenta de P_e para P_1. Quando a energia é extraída do fluxo no actuador a pressão cai para P_2. A jusante do actuador, como a velocidade continua a decrescer, a pressão aumenta de P_2 para P_o. Em termos das variáveis apresentadas na figura a potência disponível torna-se:

$$P_{disp} = \frac{1}{2}\rho A c^3 \qquad (26.3)$$

A montante e a jusante do actuador aplicando-se a equação de Bernoulli pode-se escrever:

26.2 - Modelo teórico de Betz

$$P_e = \frac{1}{2}\rho c^2 = P_1 + \frac{1}{2}\rho c^2 (1-a)^2$$

$$P_2 + \frac{1}{2}\rho c^2 (1-a)^2 = P_o + \frac{1}{2}\rho c^2 (1-b)^2 \qquad (26.4)$$

Resolvendo em relação à diferença de pressões obtém-se:

$$\frac{P_e - P_1}{\rho} = \frac{1}{2}c^2\left[(1-a)^2 - 1\right]$$

$$\frac{P_2 - P_0}{\rho} = \frac{1}{2}c^2\left[(1-b)^2 - (1-a)^2\right] \qquad (26.5)$$

Somando as duas expressões e usando $P_e = P_o$ as Equações da variação da pressão ao longo do actuador transformam-se em:

$$\frac{P_2 - P_0 + P_e - P_1}{\rho} = \frac{P_2 - P_1}{\rho} = \frac{1}{2}c^2\left[(1-b)^2 - (1-a)^2 + (1-a)^2 - 1\right]$$

$$= \frac{1}{2}c^2\left[(1-b)^2 - 1\right] \qquad (26.6)$$

26.2 - Modelo teórico de Betz

A variação da pressão P_1-P_2 é dada por:

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2}\rho c^2\left[1-(1-b)^2\right] \qquad (26.7)$$

A força axial no actuador é dada por:

$$T = (P_1 - P_2)A = \frac{1}{2}\rho A c^2\left[1-(1-b)^2\right] \qquad (26.8)$$

Somando as duas expressões e usando P_e=P_o as expressões da variação da pressão ao longo do actuador transformam-se em:

$$\frac{P_2 - P_0 + P_e - P_1}{\rho} = \frac{P_2 - P_1}{\rho} = \frac{1}{2}c^2\left[(1-b)^2 - (1-a)^2 + (1-a)^2 - 1\right] \qquad (26.9)$$

$$= \frac{1}{2}c^2\left[(1-b)^2 - 1\right]$$

26.2 - Modelo teórico de Betz

A variação da pressão P_1-P_2 é dada por:

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2}\rho c^2\left[1-(1-b)^2\right] \qquad (26.10)$$

A taxa da variação da energia cinética expressa em termos de c e a e dada por:

$$T = (P_1 - P_2)A = \frac{1}{2}\rho A c^2\left[1-(1-b)^2\right] \qquad (26.11)$$

A variação máxima da energia cinética, isto é a potência máxima extraída, ocorre quando a derivada da energia cinética em relação a (a) é igual a zero

$$\frac{dE_c}{da} = 0 = (1)(1-a)^2 + 2a(1-a)(-1)$$

$$a = \frac{1}{3} \qquad (26.12)$$

26.2 - Modelo teórico de Betz

Usando a=1/3 na Equação 26.11 obtém-se a expressão da potência máxima extraída

$$P_{\max} = \frac{8}{27}\rho A c^3 \qquad (26.13)$$

O coeficiente de potência C_P é definido como a potência extraída dividida pela potência do vento disponível no escoamento

$$C_P = \frac{P_{ext}}{\frac{1}{2}\rho A V_{vent}^3} \qquad (26.14)$$

O valor máximo do coeficiente de potencia, o limite de Beltz torna-se:

$$C_{P_{\max}} = \frac{\frac{8}{27}\rho A c^3}{\frac{1}{2}\rho A c^3} = \frac{16}{27} = 0,5926 \qquad (26.15)$$

26.2 - Modelo teórico de Betz

O limite de Beltz representa a potência máxima que se pode extrair de uma dada corrente de vento. O coeficiente de potência é talvez o mais importante parâmetro usado para caracterizar uma turbina. A Equação 26.16 é muitas vezes escrita para retractar a potência extraída em função do coeficiente de potência.

$$P_{ext} = \frac{1}{2} C_P \rho A V_{vent}^3 \qquad (26.16)$$

Sendo o coeficiente de potência o parâmetro mais importante para as turbinas eólicas, dai a figura seguinte ser incontornável na engenharia de turbinas eólicas.

26.2 - Modelo teórico de Betz

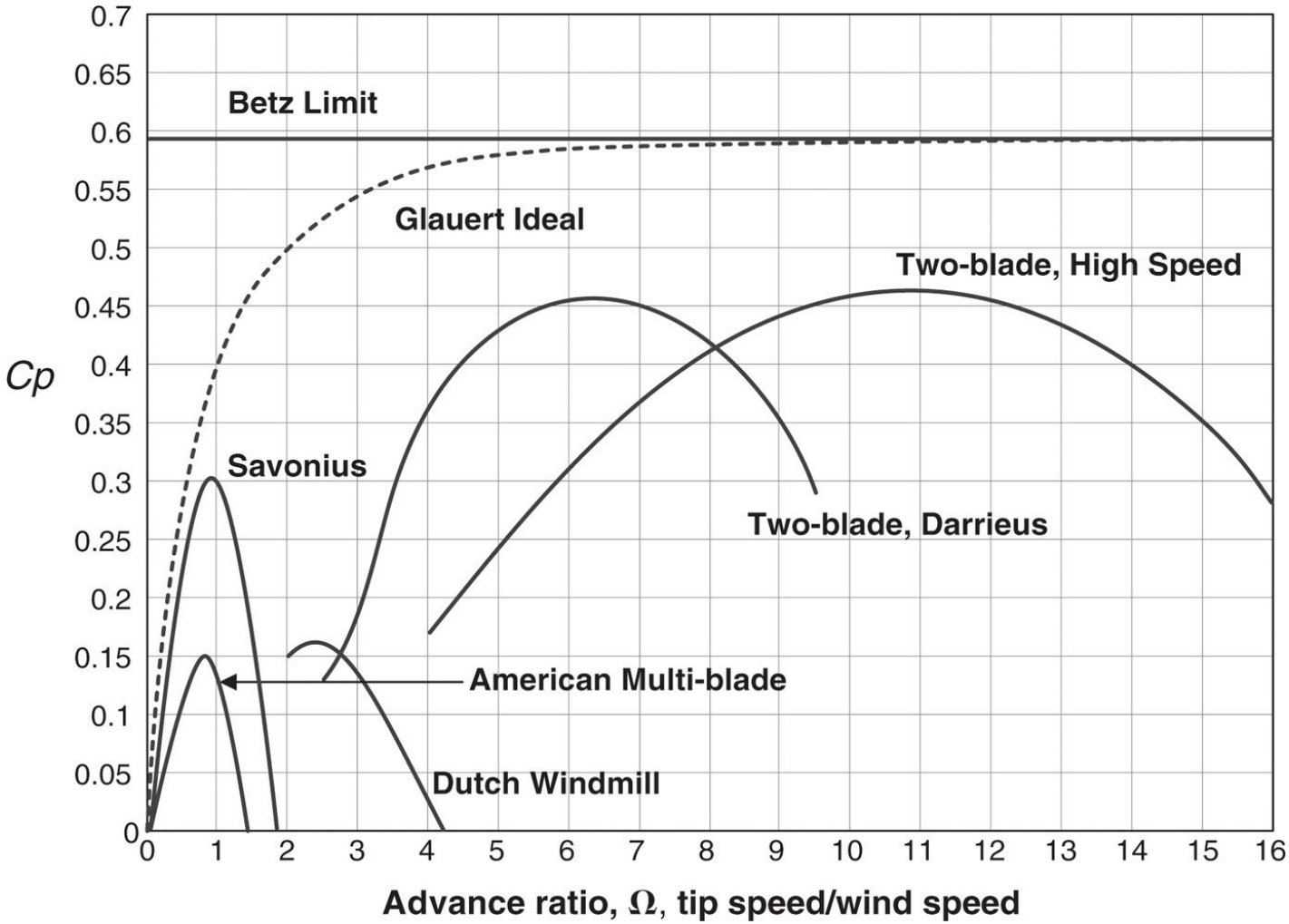
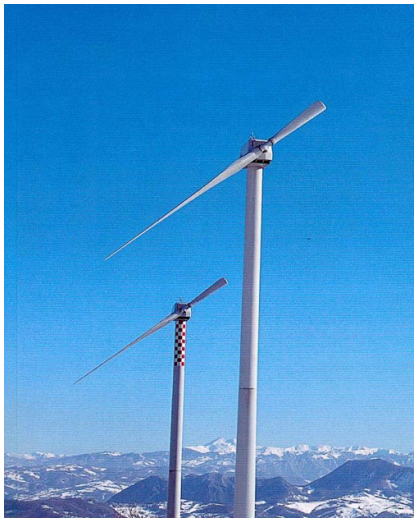


Fig 26.9 Coeficientes de potência para turbinas eólicas de diferentes configurações.

26.2 - Modelo teórico de Betz

Savonius

Two-Blades Darrieus



Two blade high speed

Dutch Windmill

American Multi-blade

26.2 - Modelo teórico de Betz

Esta figura apresenta a gama esperada de coeficientes de potência para turbinas eólicas bem projectadas de diferentes configurações. No eixo das abcissas encontra-se o **coeficiente de avanço Ω** que é a razão entre velocidade do rotor e a velocidade do vento.

$$\Omega = \frac{r\omega}{V_{vent}} \qquad (26.17)$$

Onde:

r é o raio do rotor, ω a velocidade angular do rotor e V_{vent} a velocidade do vento.

26.2 - Modelo teórico 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 o rendimento máximo (teórico) é, aproximadamente, 0,59. Para uma aplicação real, este coeficiente é da ordem de 0,3 a 0,4 no máximo.

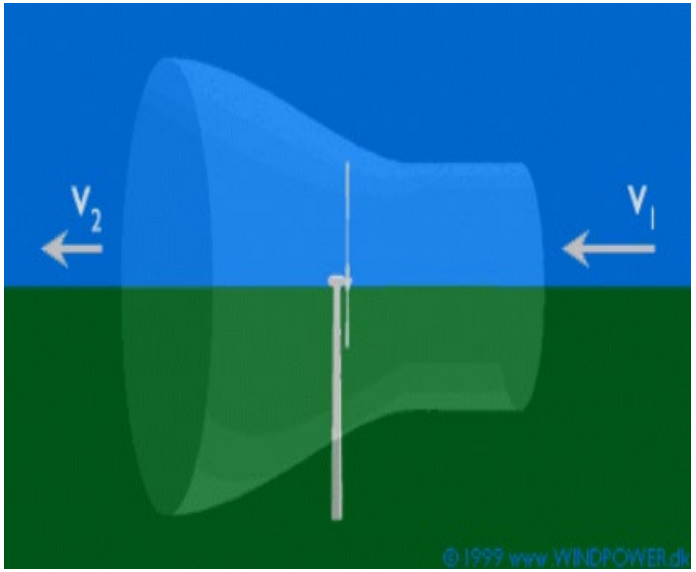


Fig 26.10 Aproveitamento eólico (**máximo de 59% da energia do vento**).

26.3 - Lei exponencial de Hellmann

A velocidade do vento varia com a altura, seguindo aproximadamente uma equação estatística, conhecida como Lei exponencial de Hellmann, da seguinte forma:

$$V_h = V_{10}\left(\frac{h}{10}\right)^{\alpha} \qquad (26.18)$$

Onde V_h é a velocidade do vento a altura h, V_{10} é a velocidade do vento a 10 metros de altura e α é o expoente de Hellmann que varia com a rugosidade do terreno e, cujos valores são indicados na Tabela 26.1.

26.3 - Lei exponencial de Hellmann

Tabela 26.1: Valores do exponente de Hellmann em função da rugosidade do terreno

Lugares planos com gelo	$\alpha = 0{,}08$ a $0{,}12$
Lugares planos (mar, costa)	$\alpha = 0{,}13$ a $0{,}16$
Terrenos pouco acidentados	$\alpha = 0{,}2$ a $0{,}26$
Zonas rusticas	$\alpha = 0{,}25$ a $0{,}4$
Terrenos acidentados ou bosques	$\alpha = 0{,}2$
Terrenos muito acidentados ou cidades	$\alpha = 0{,}25$ a $0{,}4$
Areia, superfície do oceano	$\alpha = 0{,}10$
Capim/relva baixa, terreno descoberto	$\alpha = 0{,}16$
Capim alto ou culturas de Alturas baixas	$\alpha = 0{,}18$
Culturas de Alturas elevadas ou florestas baixas	$\alpha = 0{,}20$
Florestas altas	$\alpha = 0{,}30$
Subúrbios arborizados e pequenas cidades	$\alpha = 0{,}45$

26.3 - Lei exponencial de Hellmann

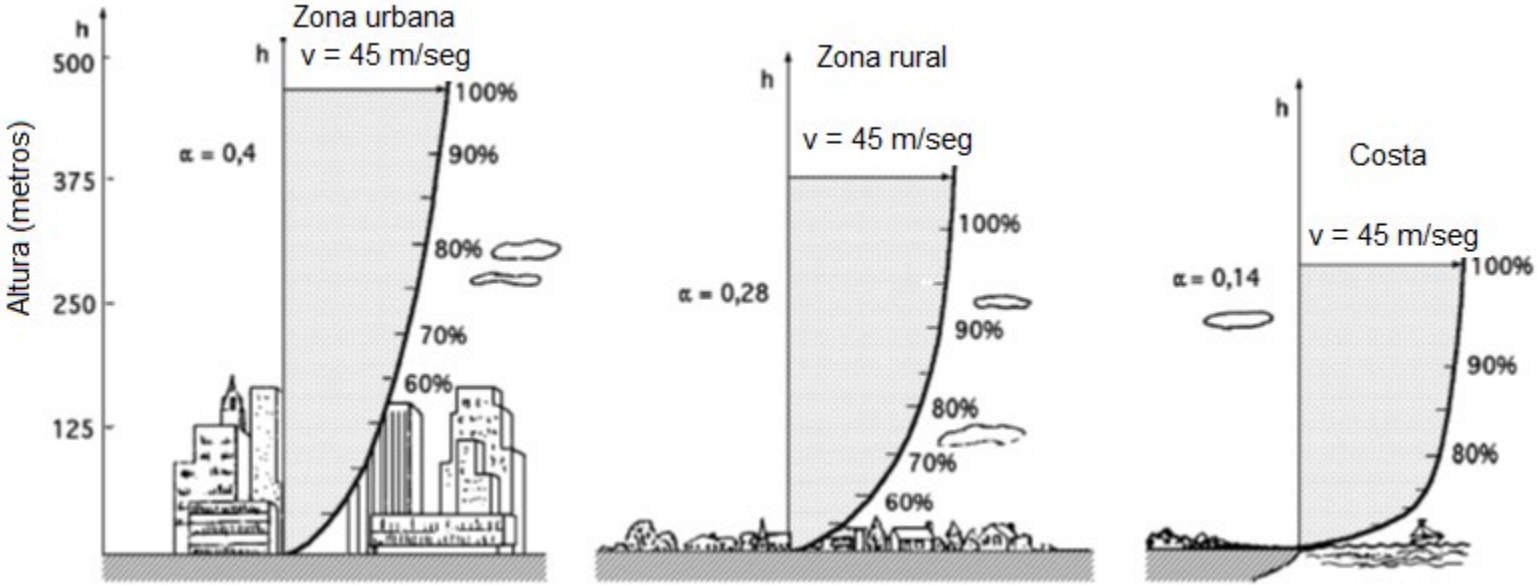


Fig 26.11 – Lei exponencial de Hellmann.

26.3 - Lei exponencial de Hellmann

Devido ao facto das maquinas eólicas partirem à determinada velocidade do vento, e ao mesmo tempo proporcionarem a potência máxima para velocidades iguais ou superiores a uma dada V_{nom}, é natural que os dados a serem utilizados sejam as curvas de duração de velocidade, que se podem converter em curvas de energia utilizando no eixo de ordenadas valores, $N = k \times v^3$, que proporcionam a potência disponível no vento para cada velocidade e da qual somente é possível extrair uma fracção.

26.3 - Lei exponencial de Hellmann

A velocidade media anual do vento (8760 horas) é calculada como mostrado na seguinte equação;

$$V = \frac{1}{8760}\int_0^{8760} v dt \qquad (26.19)$$

A intensidade energética do vento, definida como a relação entre a potência e a superfície frontal (área varrida), é proporcional ao cubo da velocidade, da seguinte maneira:

$$\frac{N_{vento}}{A} = I_h = I_{10}\left(\frac{h}{10}\right)^{3\alpha} = I_{10}\left(\frac{v_h}{v_{10}}\right)^3 \qquad (26.20)$$

26.3 - Lei exponencial de Hellmann

Numa máquina eólica pode-se considerar três velocidades do vento características da mesma. A velocidade de conexão v_{conex} que é aquela velocidade do vento a partir da qual se gera energia. Abaixo desta velocidade, toda a energia do vento seria gasta em perdas e não haveria geração de energia.

A velocidade nominal v_{nom} que é a velocidade a qual a máquina eólica alcança sua potência nominal. Acima desta velocidade a potência extraída do vento pode se manter constante. A velocidade de desconexão v_{emb} que é a velocidade acima da qual a máquina eólica deixa de gerar, porque ao se acelerar, os sistemas de protecção começam a actuar freando a máquina, desconectando-a da rede.

26.4 - Distribuição de Weibull

A potência disponível no vento com velocidade V com o fluxo $\dot{m}$ varrendo uma área A e dado por:

$$h(v,k,c) = \frac{k}{c}\left(\frac{v}{v}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^{k}\right] \qquad (26.21)$$

Como a massa do ar e dada por m=ϱ A V

$$V_{med} = \int_0^{\infty} h(v,k,c)\cdot v \cdot dv \qquad (26.22)$$

A potência disponível no vento com velocidade V com o fluxo m varrendo uma área A e dado por:

$$P_{disp} = \int_0^{\infty} \frac{1}{2}\cdot \rho.h(v,k,c)\cdot v^3 \cdot dv \qquad (26.23)$$

Assim a velocidade de interesse para a energia do vento é dada por:

$$V_{mc} = \sqrt[3]{\int_0^{\infty} h(v,k,c)\cdot v^3 \cdot dv} \qquad (26.24)$$

26.4 - Distribuição de Weibull

A densidade da potência média anual disponível passa a ser:

$$P_{disp} = \frac{1}{2}\rho V_{mc}^3 \qquad (26.25)$$

Baseado nos resultados do Slide 23 um valor razoável do coeficiente de potência para uma turbina eólica bem projectada é 0,5. A densidade da energia média anual extraída pode ser apresentada como:

$$P_{extr} = \frac{1}{4}\rho V_{mc}^3 \qquad (26.26)$$

O total de energia que pode ser extraída por ano para uma dada distribuição é a integral da Equação 26.26 para cada uma das velocidades possíveis.

$$E_{mc} = 0,25 \cdot \rho \int_0^\infty h(v,k,c) \cdot 8760 \cdot v^3 \cdot dv \qquad (26.27)$$

26.5 - Relação da velocidade periférica Ω

Se a velocidade do vento V_{vent}, o raio da pá e o numero de rotações n são conhecidos, pode-se calcular o Ω a qualquer distancia r compreendida ente o eixo de rotação do rotor e a periferia da pá, a relação de velocidades que se conhece como SR é dada de:

$$SR = \frac{2 \cdot \pi \cdot R \cdot n}{60 \cdot k \cdot V_{vent}} = \frac{\pi \cdot R \cdot n}{30 \cdot k \cdot V_{vent}} \qquad (26.28)$$

Onde k e uma constante de ajuste das diversas unidade que podem ser usadas, tomando os seguintes valores:

k = 1,47 quando a velocidade V_{vent} é dada em mph e o raio em ft

k = 1 quando a velocidade V_{vent} é dada em ft/s e o raio em ft

k = 1 quando a velocidade V_{vent} é dada em m/s e o raio em m

k = 3,6 quando a velocidade V_{vent} é dada em km/h e o raio em m

26.5 - Relação da velocidade periférica Ω

Tabela 26.2 - Máquinas de eixo horizontal

Tipo de máquina	Ω	Tipo de pá	C_L/C_D
Bombeamento de água	1	Placa plana	10
	1	Placa curva	20-40
	1	Asa de tela	10-25
Pequenos geradores eólicos	3-4	Perfil simples	10-50
	4-6	Perfil abaulado	20-100
Geradores eólicos grandes	3-5	Asa de tela	20-30
	5-15	Perfil abaulado	20-100

26.6 - Factor de actividade FA

O factor de actividade indica a capacidade estrutural do rotor para gerar energia e se define da seguinte maneira:

$$FA = \frac{100000}{32} \int_{raiz}^{ponta} \frac{L}{R}\left(\frac{r}{R}\right) d\left(\frac{r}{R}\right) \qquad (26.29)$$

Sendo: **L** o comprimento da corda média, **R** o raio e **r** a distância ao eixo. Os valores admissíveis do factor de actividade estão compreendidos entre 15 e 60. Com valores abaixo de 15 o rotor sofre resistência estrutural. Valores grandes de FA correspondem a pás largas e pequenos valores de FA correspondem a pás esbeltas. Os valores de FA maiores que 15 se relacionam a valores Ω compreendidos entre 6,5 e 10, valores de D/L da ordem de 60 e coeficiente de potência CN da ordem de 0,4.

26.7- Rendimento aerodinâmico

Define-se o rendimento aerodinâmico como a relação entre a potência gerada pelo aerogerador e a energia do vento que atravessa o rotor da seguinte maneira:

$$\eta_{aerod} = \frac{P}{\frac{\rho A v^3}{2}} \qquad (26.30)$$

Na figura seguinte apresenta-se a relação entre o rendimento aerodinâmico , a velocidade periférica Ω e o numero de pás para uma relação D/L→∞

26.7 - Rendimento aerodinâmico

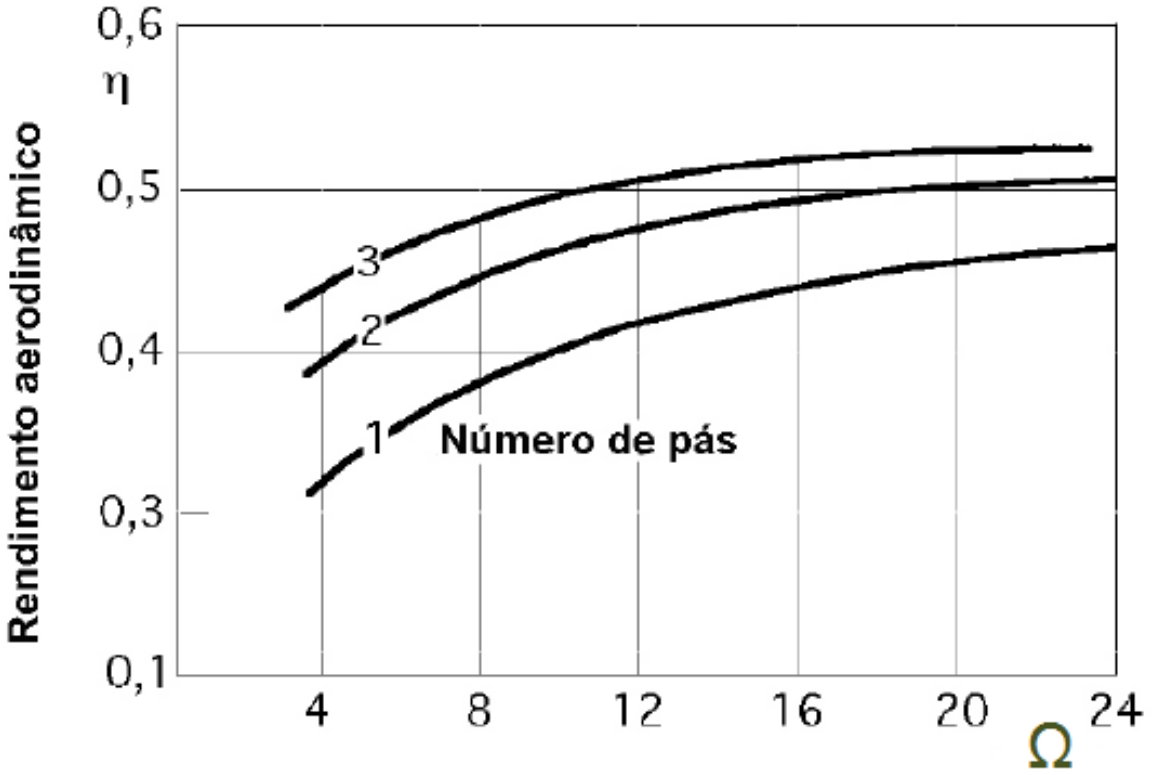


Figura 26.12 Relação entre o rendimento aerodinâmico, o Ω e o numero de pás para, D/L→∞

26.8 -Coeficiente de torque C_M

Define-se o coeficiente de torque C_M pela equação:

$$C_M = \frac{C}{\frac{1}{2}\rho A v^3 R} = \frac{C}{\frac{1}{2}\rho A v^2 R} = \frac{\frac{P_{util}}{P_{vento}}}{\frac{R\omega}{v}} \qquad (26.31)$$

$$= \frac{\eta_{aerod}}{\Omega} = \frac{C_N}{\Omega}$$

Para o caso particular de um rotor de hélice, o valor da área frontal varrida e o coeficiente C_M correspondente é:

$$C_M = \frac{C}{\frac{1}{2}\pi\rho v^2 R^3} \qquad (26.32)$$

26.8 - Coeficiente de torque C_M

O torque do motor pode ser expresso também em função do rendimento aerodinâmico ou coeficiente de potência C_N e da potência útil do vento da seguinte maneira:

$$C_M = \frac{P_u}{\omega} = \frac{\eta_{aerod} P_{vento}}{\omega} = \frac{C_N P_{vento}}{\omega} \qquad (26.33)$$

Tendo em conta a equação anterior, pode-se determinar a qualidade de uma máquina eólica, considerando as curvas do tipo (η_{aerod}-Ω) de onde pode-se fazer uma classificação mediante um gráfico, como o gráfico da Figura 26.9, obtendo-se as seguintes conclusões:

26.8 - Coeficiente de torque C_M

1. Os moinhos multipasse e savonius obtém o máximo rendimento aerodinâmico para Ω pequenos, isto é, giram a baixa velocidade. Mesmo assim, funcionam com velocidade de ventos V_{vent} pequenas.
2. O rendimento aerodinâmico, e portanto, a potência útil é superior nas máquinas Darrieus e de hélice.
3. O rendimento aerodinâmico se mantem sempre abaixo do limite de Betz, e se aproximaria dele se o Ω tendesse para infinito.
4. Se o Ω for maior que 3,5 as pás funcionam principalmente por empuxo ascencional, e se for menor que 3,5, funcionam por arrasto.

26.9 - Área frontal varrida por uma pá

A área A varrida pelo rotor e que se apresenta frontalmente ao vento, é um parâmetro que se utiliza com certa frequência nos cálculos de energia eólica. Esta área, para uma hélice, é a superfície total varrida pelas pás do rotor, perpendicular à direcção do vento. Para um rotor de hélice, de eixo horizontal, paralelo à direcção do vento, e com diâmetro d, o valor de A é:

$$A = \frac{\pi d^2}{4} \qquad (26.34)$$

26.9 - Área frontal varrida por uma pá

As dimensões de um rotor eólico determinam-se calculando, em primeiro lugar, a área frontal A do mesmo. Para isso, pode-se supô-lo como uma maquina motriz, a qual de antemão se tem que prefixar e atribuir a energia que se deseja gerar. Ao mesmo tempo, se determina a média de energia que se pode obter a partir dos recursos eólicos do lugar onde se vai instalar a máquina eólica.

Conhecidos esses dados energéticos, da máquina e da fonte de energia, iguala-se e se determina a área varrida pelo rotor, para, desta forma, se calcular o comprimento das pás.

26.9 - Área frontal varrida por uma pá

O desenho da máquina é relativamente simples, enquanto o estudo e a eleição do lugar com recursos eólicos pode ser mais complicado, podendo-se obter resultados ajustados entre a energia que se deseja obter e a energia do vento disponível e necessária para consegui-la. Estas medias da energia eólica necessária, P_{util}, são dadas pela equação:

$$P_{util} = P_{vento}\eta_{aerod} = \frac{1}{2}\rho A v^3 \eta_{aerod} \qquad (26.35)$$

Esta fórmula pode ser escrita, também da seguinte maneira:

$$A = \frac{2P_{util}}{\rho v^3 \eta} = \frac{93P_{util}}{\eta F C_A C_T} \qquad (26.36)$$

26.9 - Área frontal varrida por uma pá

Com P_{util} em kW e de forma que F seja um factor que depende da velocidade do vento e cujos valores se indicam na Tabela 26.2, sendo C_A e C_T dois factores de correcção da densidade do ar, em função da altitude (em metros) e da temperatura do lugar em C, valores que estão compilados na Tabela 26.3.

Quando se dispõe de um aerogerador eólico instalado e se conhece a eficiência do mesmo, a formula anterior permite comprovar se a área frontal da máquina corresponde às necessidades energéticas programadas de antemão.

26.9 - Área frontal varrida por uma pá

Quando se desenha uma máquina eólica é preciso fixar de forma aproximada a eficiência da mesma, que é um factor desconhecido, e para o qual se fará uso da Tabela 26.3.

Tabela 26.3 Valores do factor de potência F

v(mph)	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
F	1,07	1,78	2,62	3,74	5,13	6,82	8,86	11,3	14,1	17,3	21	25,2
v(mph)	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
F	29,9	35,2	41	47,5	54,6	62,4	70,9	80,1	90,1	101	113	125

26.9 - Área frontal varrida por uma pá

Tabela 26.4 Factores de correcção da densidade do ar

Altitude	C_A	Temperatura C	C_T
0	1	-18	1,13
750	0,898	-6	1,083
1500	0,819	+4	1,04
2250	0,744	+16	1
3000	0,676	+27	0,963
		+38	0,929

Tabela26.5 Valores estimados da eficiência

Máquina eólica	Eficiência em %	
	Construção simplificada	Projeto ótimo
Bomba dágua multipá	10	30
Bomba dágua multipá de tela	10	25
Bomba dágua Darrieus	15	30
Aerogerador Savonius	10	20
Aerogeradores pequenos ($< 2kW$)	20	30
Aerogeradores médios (2 a 10kW)	20	30
Aerogeradores grandes ($> 10kW$)	—	30 a 40
Gerador Darrieus	15	35

26.10 - Tamanho das pás e coeficiente de solidez Cs

Quando uma maquina eólica dispõe de determinado numero de pás Z, a superfície total das mesmas se calcula pela seguinte expressão:

Área total das pás = ZS = Solidez Cs × Área A varrida pelo rotor

Pelo que a solidez do rotor pode ser interpretada como a relação entre a área geométrica da pá, S = RL e a área varrida por ela em sua rotação:

$$Cs = \frac{ZS}{\pi R^2} = \frac{ZLR}{\pi R^2} = \frac{ZL}{\pi R} \qquad (26.37)$$

Para obter a superfície de uma pá divide-se a área total assim obtida pelo numero de pás. O coeficiente de solidez tem uma relação inversa com o Ω, Slide 19

26.10 -Tamanho das pás e coeficiente de solidez Cs

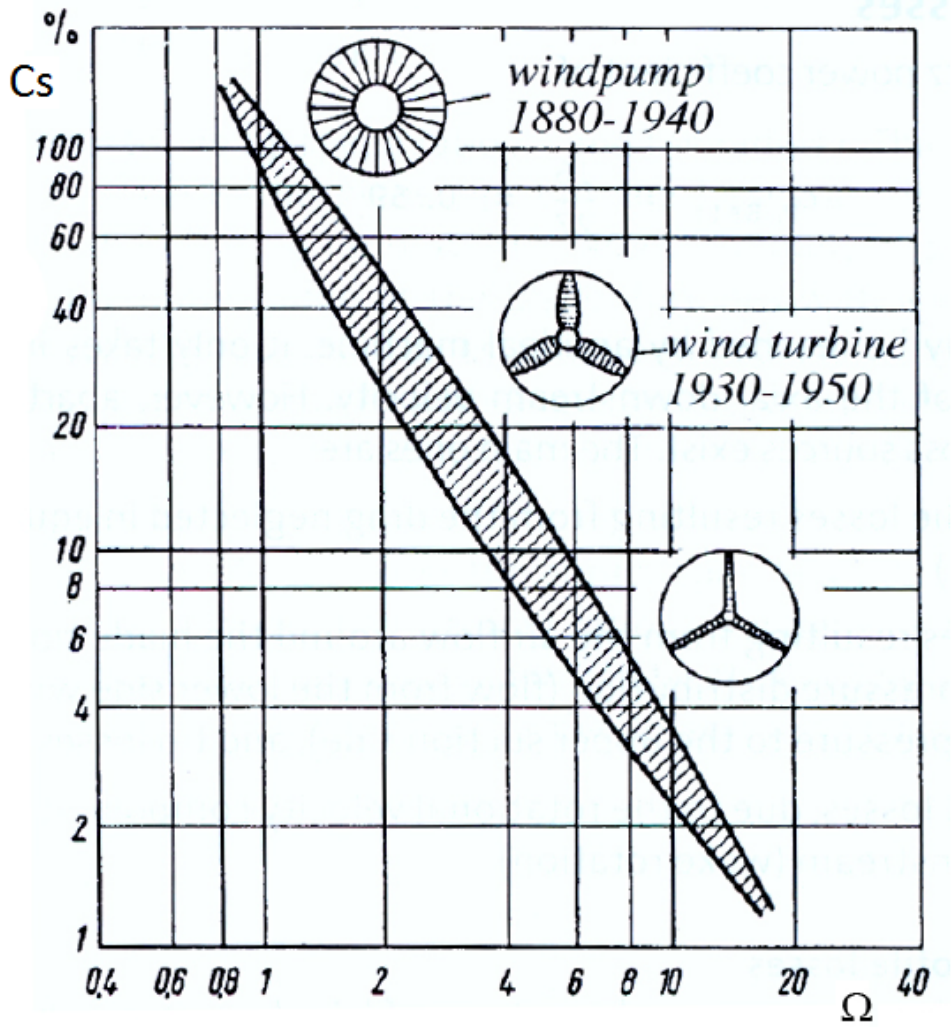


Figura 26.13 - Relação entre o coeficiente de solidez Cs e o Ω

26.11- Força centrífuga

A forca centrífuga empurra as pás para fora e tende a arranca-las do cubo do rotor e é dada pela equação:

$$F_{cent} = \frac{1}{2} G \frac{u^2}{r_G} = \frac{1}{2r_G} G \left(\frac{\pi r_G n}{30} \right)^2 = \frac{\pi^2}{1800 r_G} (r_G n)^2$$

$$= \frac{\pi^2}{1800 r_G} G \left[\frac{kv(SR)_G}{0,105} \right] = \frac{0,1034 G kv(SR)_G}{r_G} \qquad (26.38)$$

Onde: G é o peso da pá em kg, e k um valor que depende das unidades, SR, G e a relação da velocidade tangencial referida ao vento no centro de gravidade da pá à distancia r_G. r_G é a distância em metros, desde o eixo de rotação do rotor até o centro de gravidade da pá. Como a velocidade do vento está elevada ao quadrado, um aumento brusco da mesma originaria um grande aumento da força centrifuga.

26.11 - Força centrífuga

Para um rotor que funciona com um Ω fixo, a força centrífuga cresce com o quadrado da velocidade do vento. Existem duas condições operacionais a ter em conta para o cálculo da forca centrífuga:

1. A primeira facto que deve ser previsto, quando o rotor esta em fase de desenho ainda, é a velocidade máxima do vento que a máquina poderá suportar antes que o regulador comece a limitar o seu número de rotações.

26.11- Força centrífuga

2. Uma vez construída a máquina e esta entrar em funcionamento, se ela por alguma razão acelerar, por falha no mecanismo de regulação, deve-se prever a máxima velocidade que se pode permitir alcançar. Se a máquina eólica for pequena, pode suportar um excesso na velocidade de rotação de até 50%, mas se a máquina for grande, nestas circunstâncias ela ficaria avariada e inutilizada.

26.12 - Momento flector da pá

O momento flector da pá é calculado a partir das forças aerodinâmicas que actuam sobre as pás, que são paralelas ao eixo de rotação, a distância r_G do mesmo e são calculadas da seguinte maneira:

$$M_{flector} = r_G F_{aerod} \qquad (26.39)$$

Que proporciona um valor aproximado, somente, porque os valores que intervêm no cálculo são também aproximados, mas suficientes para um grande número de aplicações. Para valores exactos, seria necessária uma formulação mais complexa. O ponto de máximo esforço, e que portanto estará sujeito à fadiga máxima, encontra-se situado no engaste da pá com o cubo.

26.13 - Momento torsor

O momento de torsão das pás em relação ao eixo de rotação (torque motor) é dado pela seguinte expressão:

$$M_{torsor} = \frac{P_{geradorotor}}{\omega} = \frac{P_{util} d}{2 \cdot \Omega \cdot v} \qquad (26.40)$$

Onde:

P_{util} em kgm/s, d em m e v em m/s

A equação anterior pode ser escrita, também, da seguinte maneira:

$$M_{torsor} = \frac{51 P_{util} d}{\Omega \cdot v} \qquad (26.41)$$

26.13 - Momento torsor

O torque motor C, obtido dessa forma, é o total, e para saber o torque originado de cada pá, divide-se o torque total pelo número de pás. Deve-se ter em conta que a potencia P_{util} a ser usada é a que se tem no eixo do motor, e não no eixo de saída do gerador ou outro aparato impulsionado pelo aerogerador. Esse momento actua no plano de rotação, e a máxima tensão se localiza também no engaste das pás com o rotor. O torque aumenta com o coeficiente de solidez Cs.

26.14. Desvantagens

- O empecilho para a instalação de mais usinas eólicas é o seu alto custo, já que o custo da energia gerada por esta fonte representa em torno de 60% a 70% a mais do que aquela gerada em usinas hidroelétricas.
- Apesar de ser considerada uma fonte de energia limpa, as usinas eólicas emitem ruídos de baixa frequência que podem prejudicar os moradores próximos (caso estejam localizadas perto de uma área residencial).
- Estas centrais, podem causar interferência na transmissão de televisão e, se estiverem instaladas em rotas migratórias de pássaros, podem configurar uma ameaça a estes.

26.14 - PARQUES EÓLICOS

Fig 26.14 – Parque eólico (California).

26.14 - PARQUES EÓLICOS

Fig 26.15 – Parque eólico onshore (California).

26.14 - PARQUES EÓLICOS

Fig 26.16 – Parque eólico offshore (Dinamarca).