

Geração de energia elétrica renovável

Eólica

Moinhos de Vento Europeus

Moinhos de vento adaptados para bombeamento de água na construção de diques.

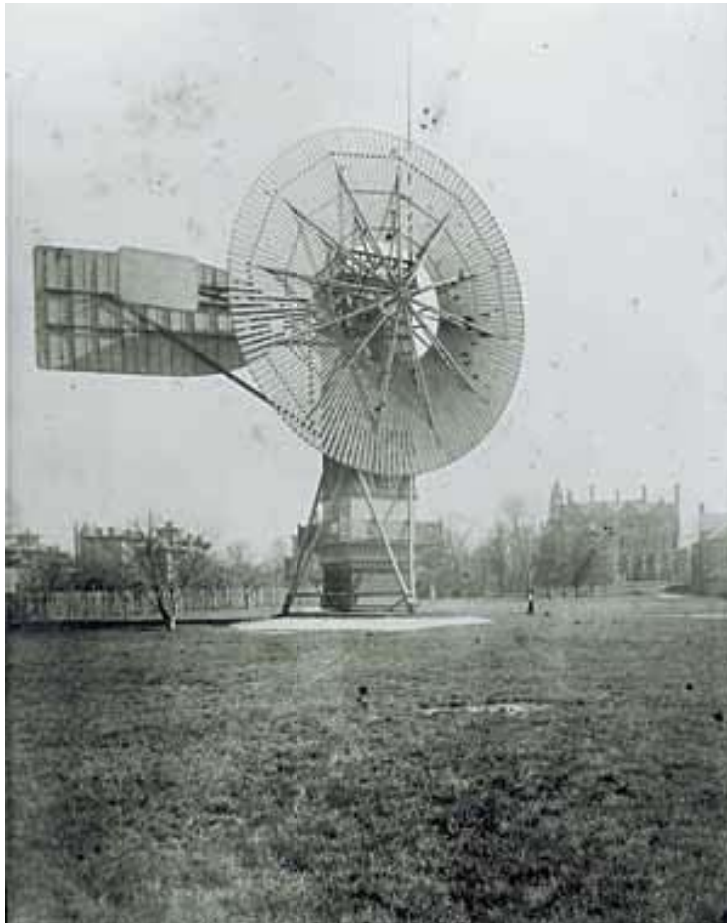


Fonte: Erich Hau, "Windkraftanlagen" (título em alemão), Springer, Berlin, 4 ed., 2008.

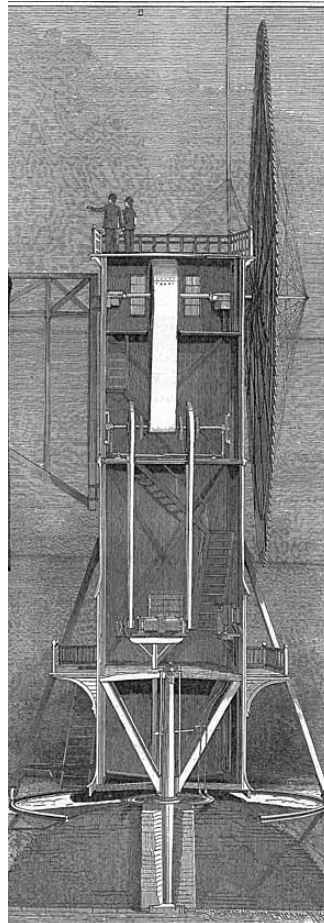
Moinhos de vento Holandeses
(século XV)

Primeiras Turbinas Eólicas

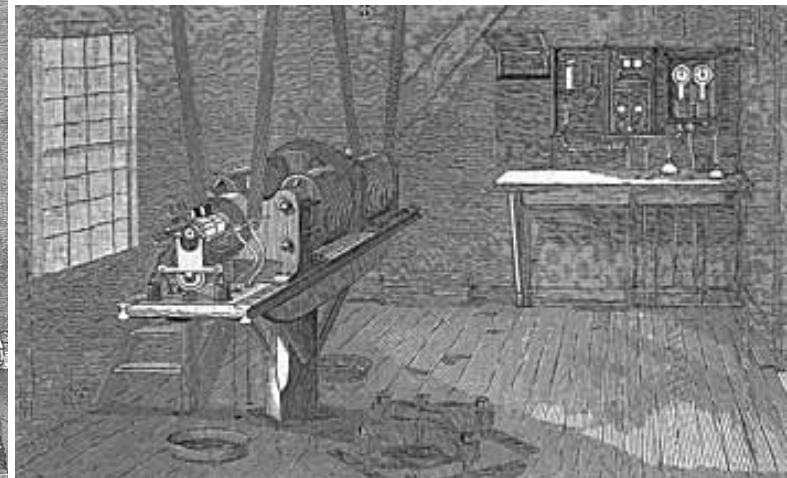
Brush Windmills: Cleveland, Ohio (1887-1888);



Brush Windmill



Vista lateral em corte



Sala do gerador elétrico

Diâmetro do rotor 17 m;

144 pás;

Potência nominal 12 kW;

Gerador de corrente contínua.

Evolução das Turbinas Eólicas

Durante os quase **120 anos** após a invenção da primeira turbina eólica para geração de energia elétrica, muitos modelos diferentes foram construídos.



100 kW (Rússia, 1931)



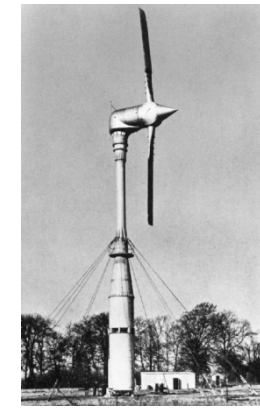
1250 kW (USA, 1941)



50 kW (Dinamarca, 1942)



70 kW (Dinamarca, 1942/3)



100 kW (Inglaterra, 1956)



800 kW (França, 1962)



2000 kW (USA, 1979)



630 kW (Dinamarca, 1979)



3000 kW (Alemanha, 1982)



1200 kW (Espanha, 1989)

Evolução das Turbinas Eólicas

Projeto Alemão MAN-Kleinhenz de 1942 (diâmetro do rotor 130 m, 10.000 kW)



O projeto foi terminado e a construção do protótipo não aconteceu por causa da segunda guerra mundial

Classificação (Horizontal/Vertical – eixo da turbina)

Horizontal



Vantagens:

- Maior eficiência energética (velocidade do vento é maior longe do solo)
- Tem torque de partida

Desvantagens:

- Precisa de mecanismo de alinhamento com o vento (yaw control)
- Maior dificuldade para reparos elétricos.

Classificação (Horizontal/Vertical – eixo da turbina)

Vertical



Turbina *Darrieus* 3.800 kW (Canadá, 1984)

Vantagens:

- Instalação do gerador, caixa de engrenagens no solo.
- não preciso de mecanismo de alinhamento com o vento (yaw control)

Desvantagens:

- velocidade do vento é baixa rente ao solo, assim, a eficiência de máquinas de eixo vertical é baixa
- Não tem torque de partida
- São necessários cabos tirantes (mais espaço)

Turbinas Eólicas Modernas

- **Turbinas eólicas de eixo vertical:**
não precisam se orientar conforme a direção do vento



Turbina *Darrieus* 3.800 kW (Canadá, 1984)



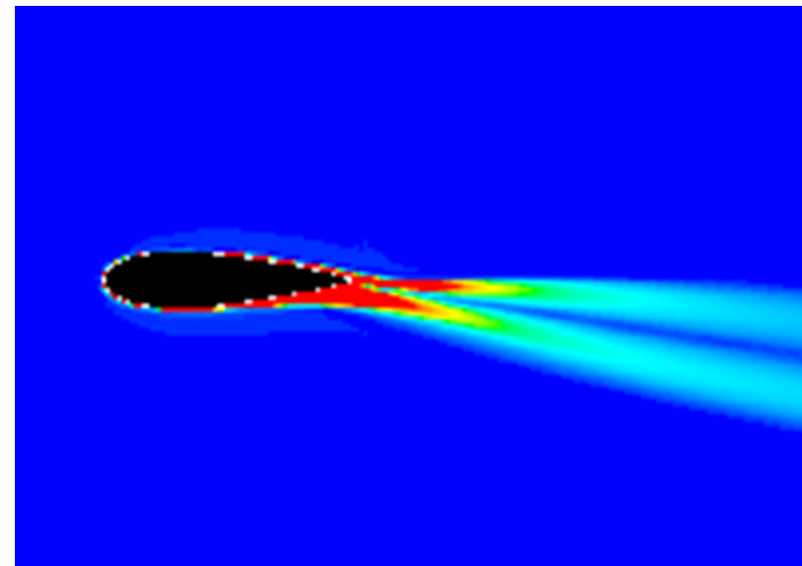
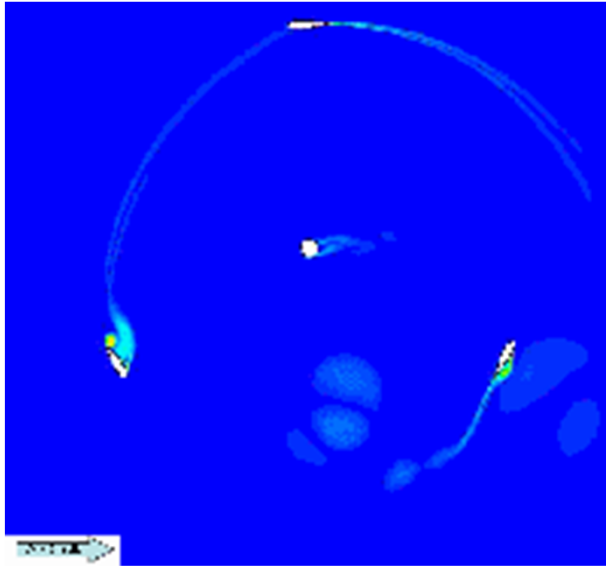
Turbina idealizada *Darrieus*
subtipo H-rotor de 3.000 a 10.000 kW
(VertAx Wind Ltd. - Inglaterra, 2009)



Turbina *Savonius* 5 kW
(Helix Wind - USA, 2009)

Turbinas Eólicas Modernas

- **Turbinas eólicas de eixo vertical:**
não precisam se orientar conforme a direção do vento



Turbinas Eólicas Modernas

- **Turbinas de eixo horizontal:**

são muito mais usadas, pois são mais simples de serem construídas, além da tecnologia apresentar um grau maior de maturidade.



Turbina eólica de 2.300 kW da Enercon



Fazenda eólica com turbinas de 3.000 kW da Vestas



Turbinas de 6.000 kW da REpower (fronteira Alemanha-Dinamarca março/2009)

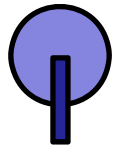
Dimensões de Turbinas Eólicas



Altura das maiores Turbinas Eólicas disponíveis no mercado.

Edifício
Mirante do Vale

170 m
51 andares



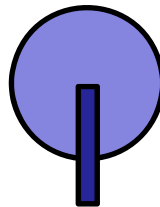
H = 99,5 m
d = 71 m
T = 64 m

2,3 MW
Enercon



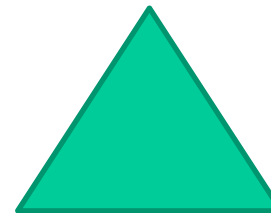
93 m

Estátua da
Liberdade



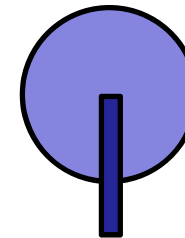
H = 139,6 m
d = 109,2 m
T = 85 m

3 MW da Vestas
catálogo



146,6 m

Pirâmide de Quéops



H = 163 m
d = 126 m
T = 100 m

6 MW da REpower
protótipo instalado

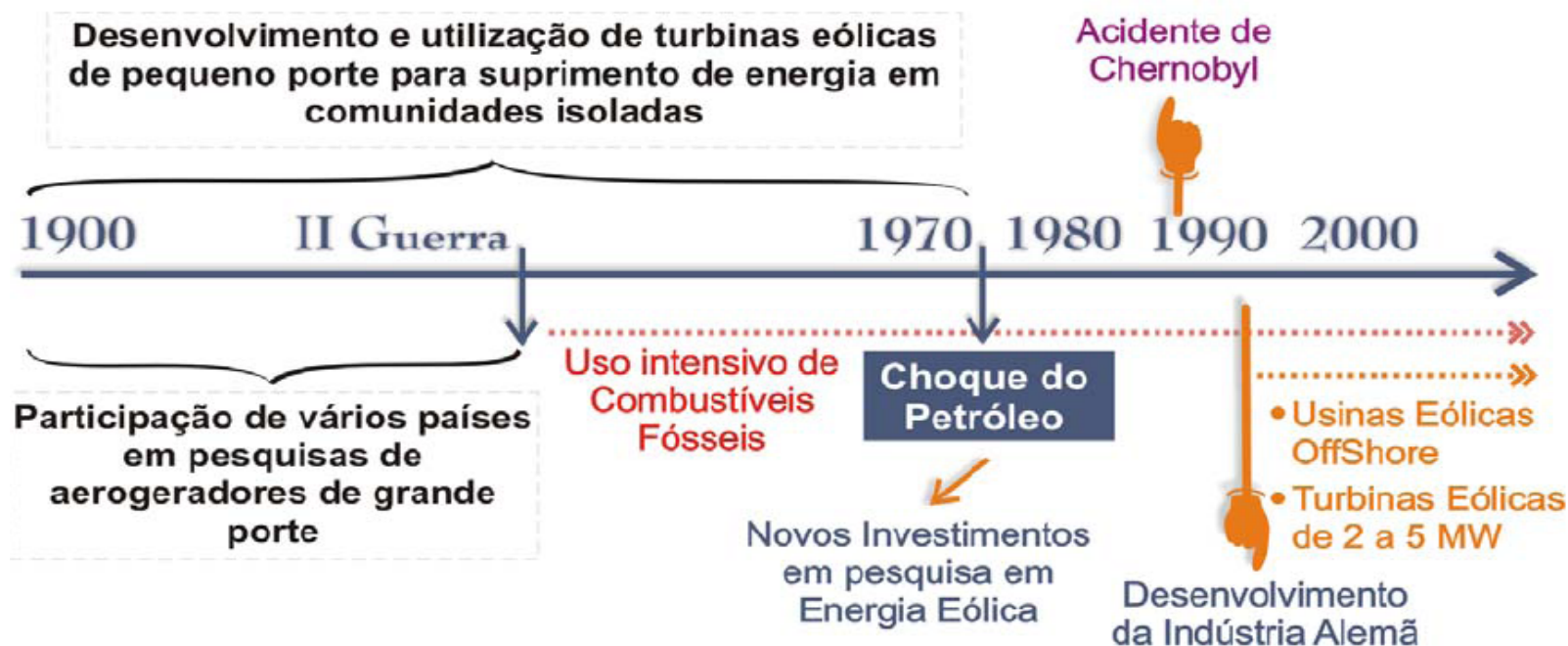


170 m

d = diâmetro do rotor da turbina
T = altura da torre de sustentação
H = altura total

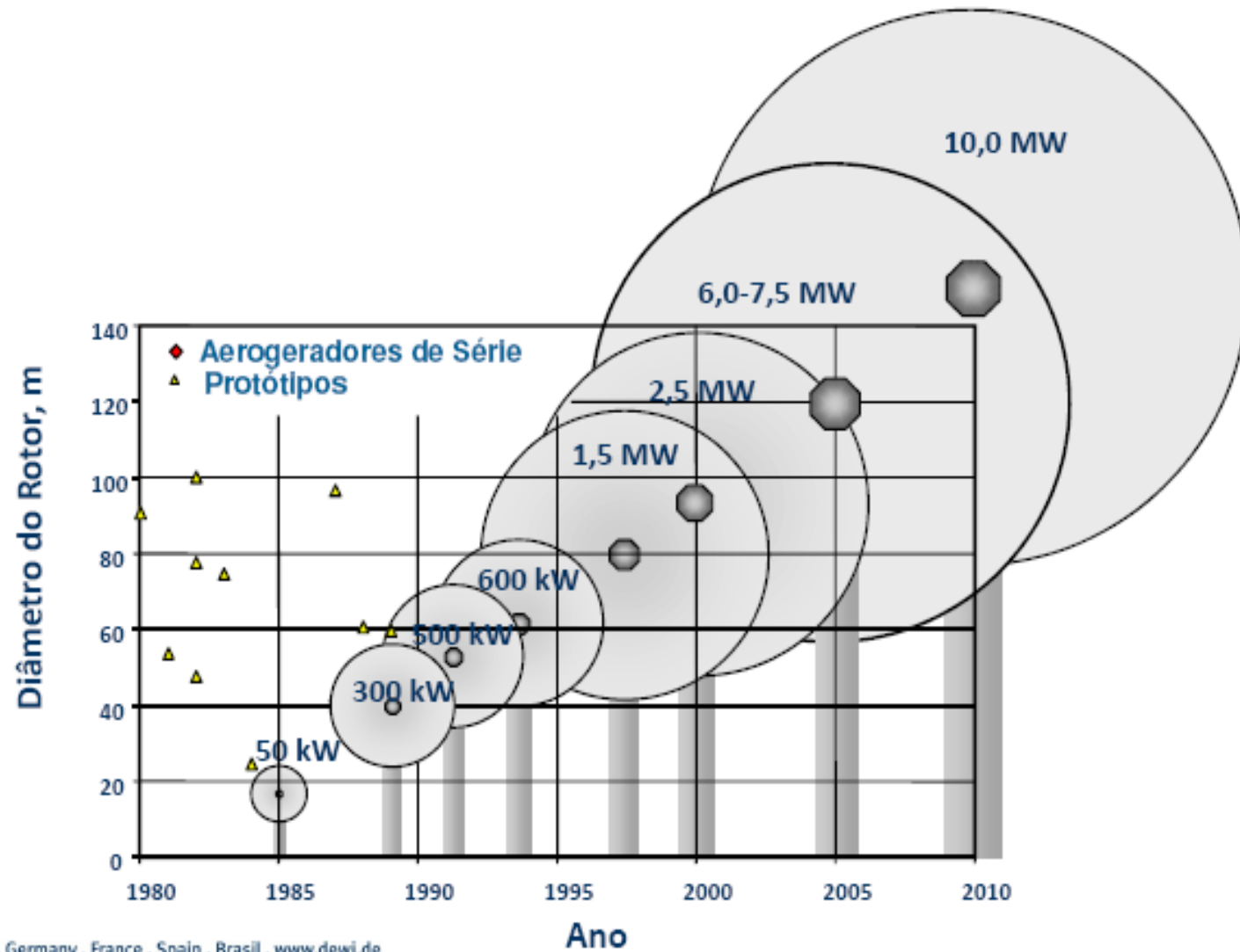
Fonte: Catálogos de fabricantes de turbinas eólicas

Desenvolvimento da Energia Eólica



Principais marcos do desenvolvimento da Energia Eólica no Século XX

Desenvolvimento da Energia Eólica



Potência mecânica contida no vento

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad \text{watts}$$

$$A = \frac{\pi}{4} D^2$$



sendo

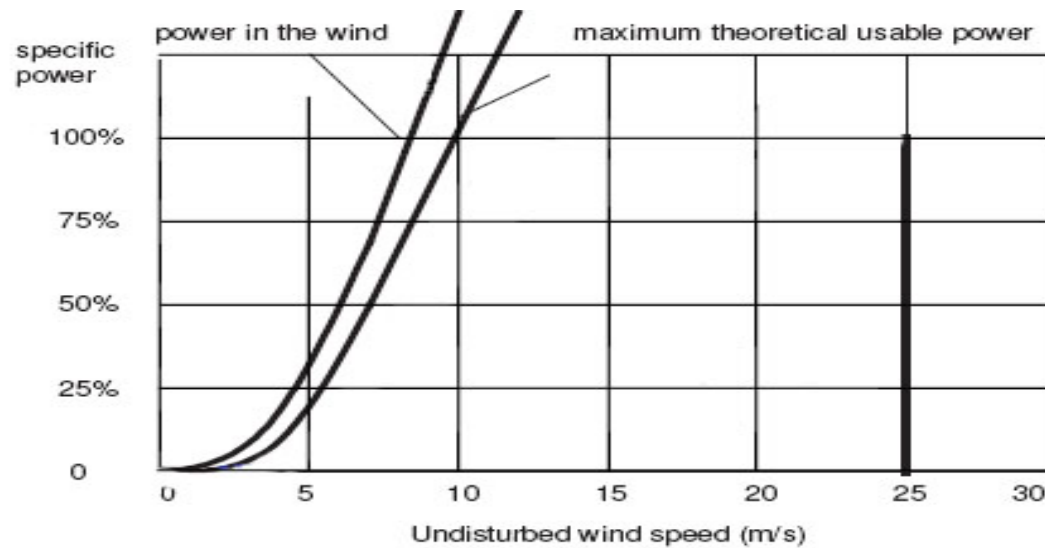
P = potência mecânica (Nm/s ou Watt)

m = massa de ar por segundo (kg/s)

V = velocidade do vento (m/s)

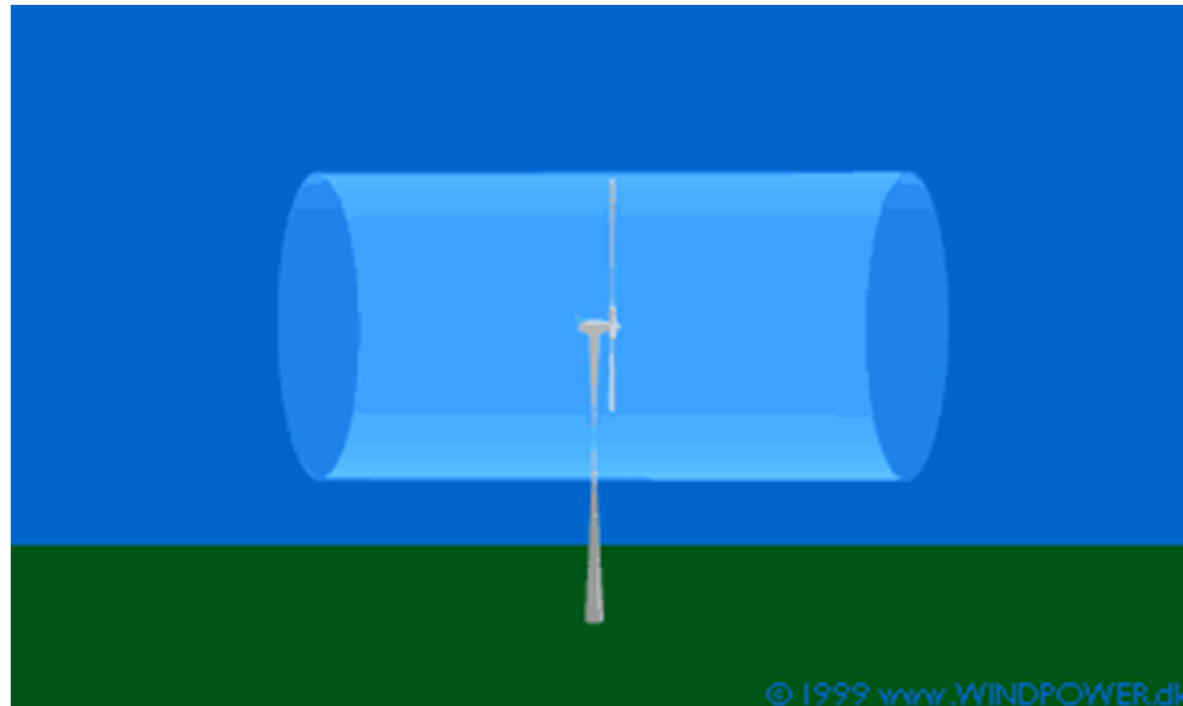
ρ = densidade do ar (kg/m³)

A = área de superfície do rotor (m²)



Lei de Betz:

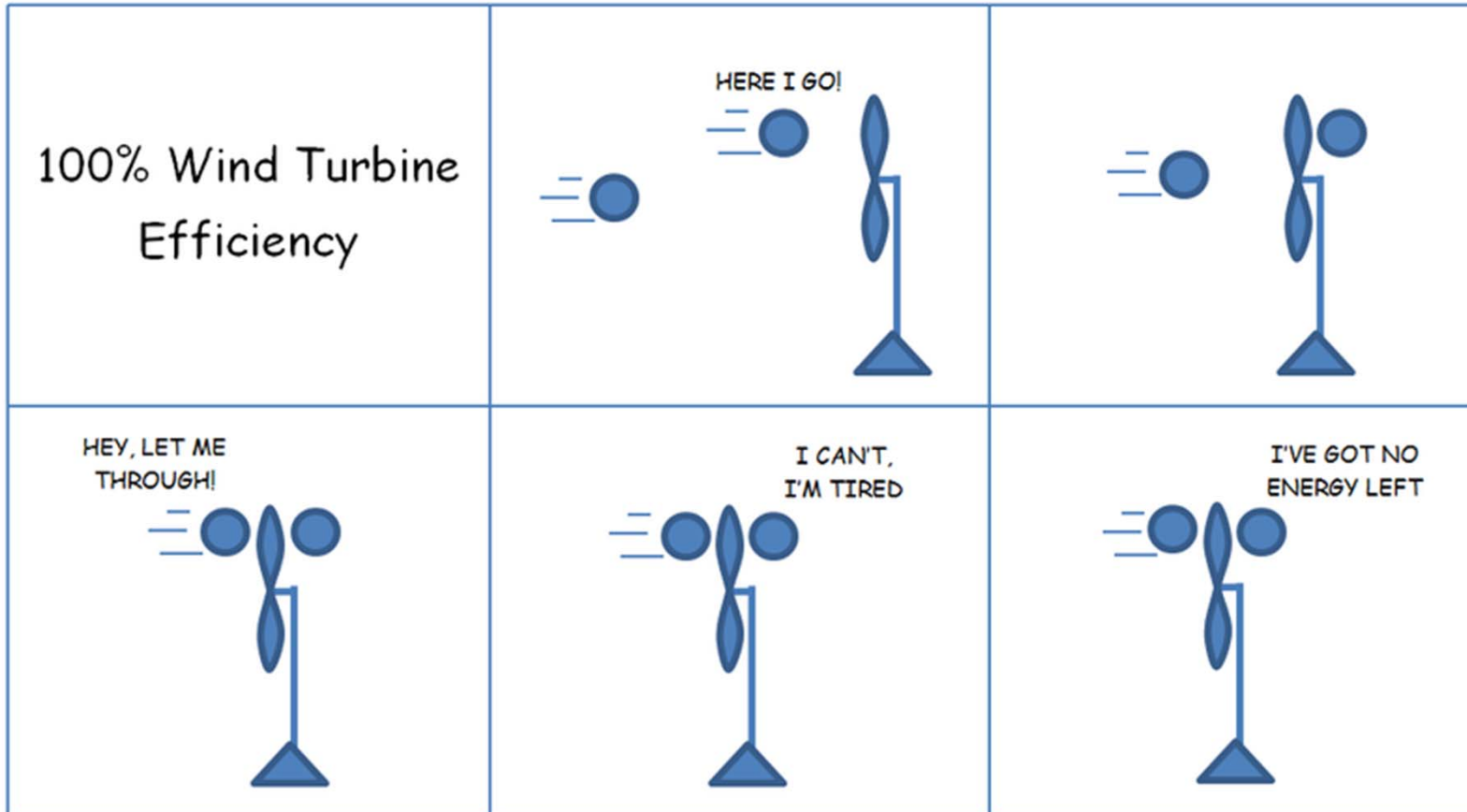
Incidência do vento em turbinas eólicas:



Qual o efeito?

<http://wiki.windpower.org>

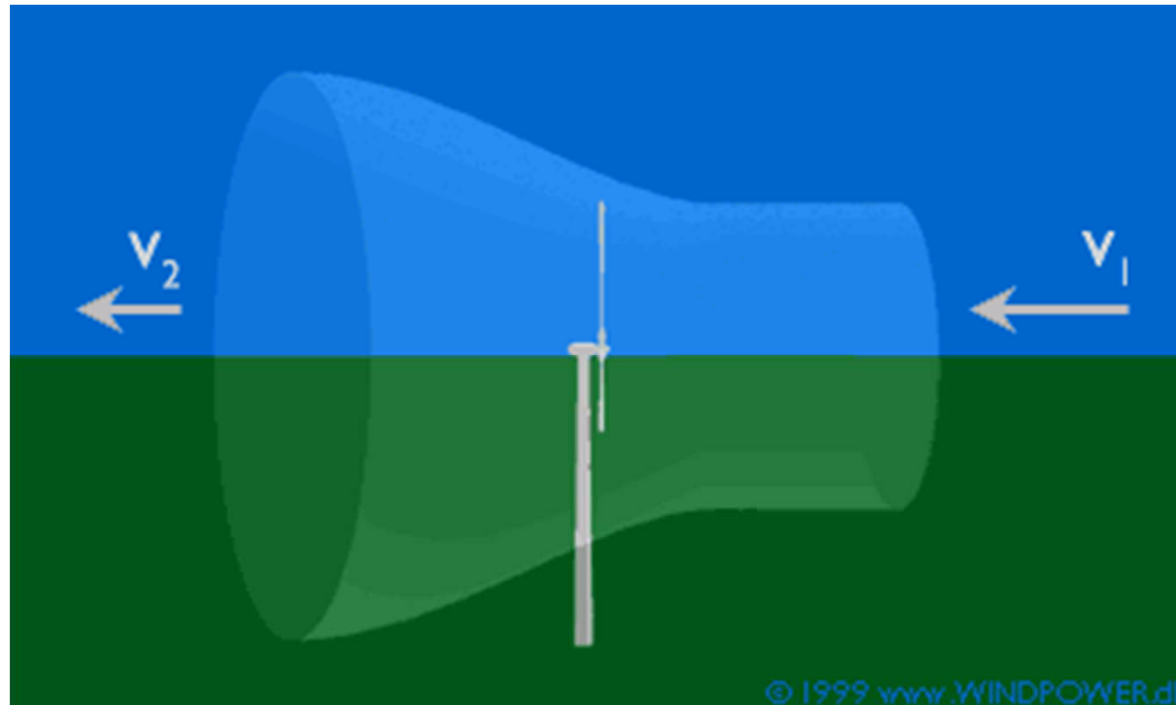
100% Wind Efficiency?



<http://wiki.windpower.org>

Lei de Betz:

Incidência do vento em turbinas eólicas:



Formato de garrafa.

<http://wiki.windpower.org>

Curva de potência de uma turbina eólica

A potência disponível no vento é: $P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3$

Na qual:

$$\left\{ \begin{array}{l} P = \text{Potência mecânica disponível no vento (W)} \\ \rho = \text{Massa específica do ar (kg/m}^3\text{)} \\ A = \text{Área varrida pelas pás (m}^2\text{)} \\ v = \text{Velocidade do vento não perturbado (m/s)} \end{array} \right.$$

Curvas de potência

Potência disponível Eólica

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3$$

Na qual:

P = Potência mecânica disponível no vento (W)

ρ = Massa específica do ar (kg/m³)

A = Área varrida pelas pás (m²)

v = Velocidade do vento não perturbado (m/s)

Potência disponível Hidráulica

$$P = \eta \rho g h q$$

P = Potência (Watts)

η = eficiência da turbina

ρ = densidade da água (kg/m³)

g = aceleração da gravidade (9.81 m/s²)

h = altura líquida – queda (m).

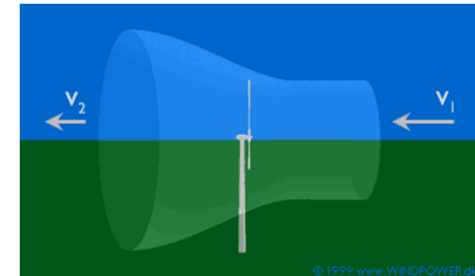
q = fluxo (m³/s)

Lei de Betz:

Existe um valor no qual a captura de energia é máxima para uma dada diminuição na velocidade do vento.

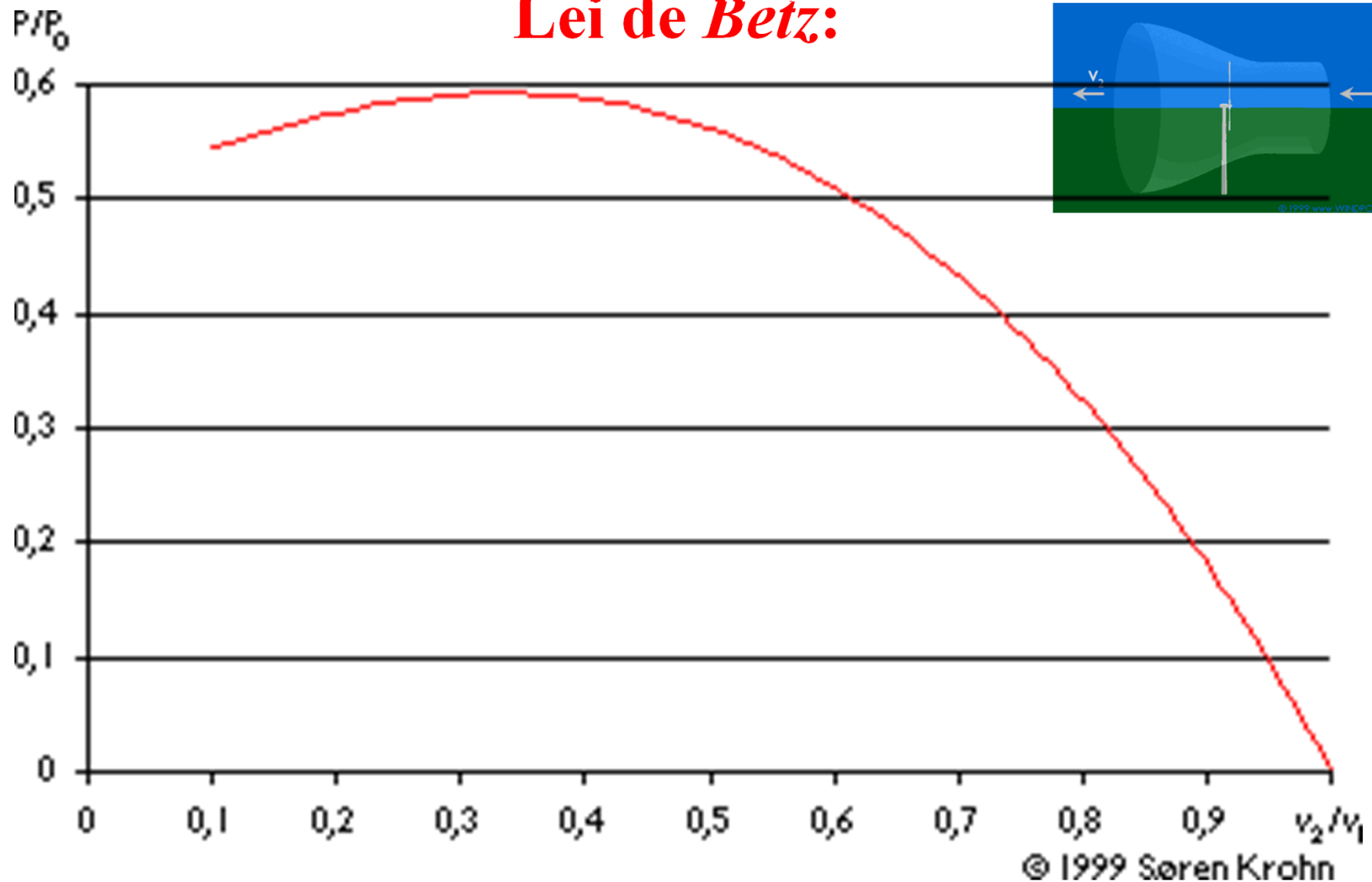
Utilizando leis da física para a aerodinâmica de turbinas eólicas, o físico alemão Albert Betz formulou uma lei que diz que uma turbina eólica ideal reduziria a velocidade do vento em $2/3$ da velocidade original.

Portanto, apenas é convertido no máximo $16/27$ (ou **59%**) da energia mecânica usando uma turbina eólica. Publicado em 1926.



<http://wiki.windpower.org>

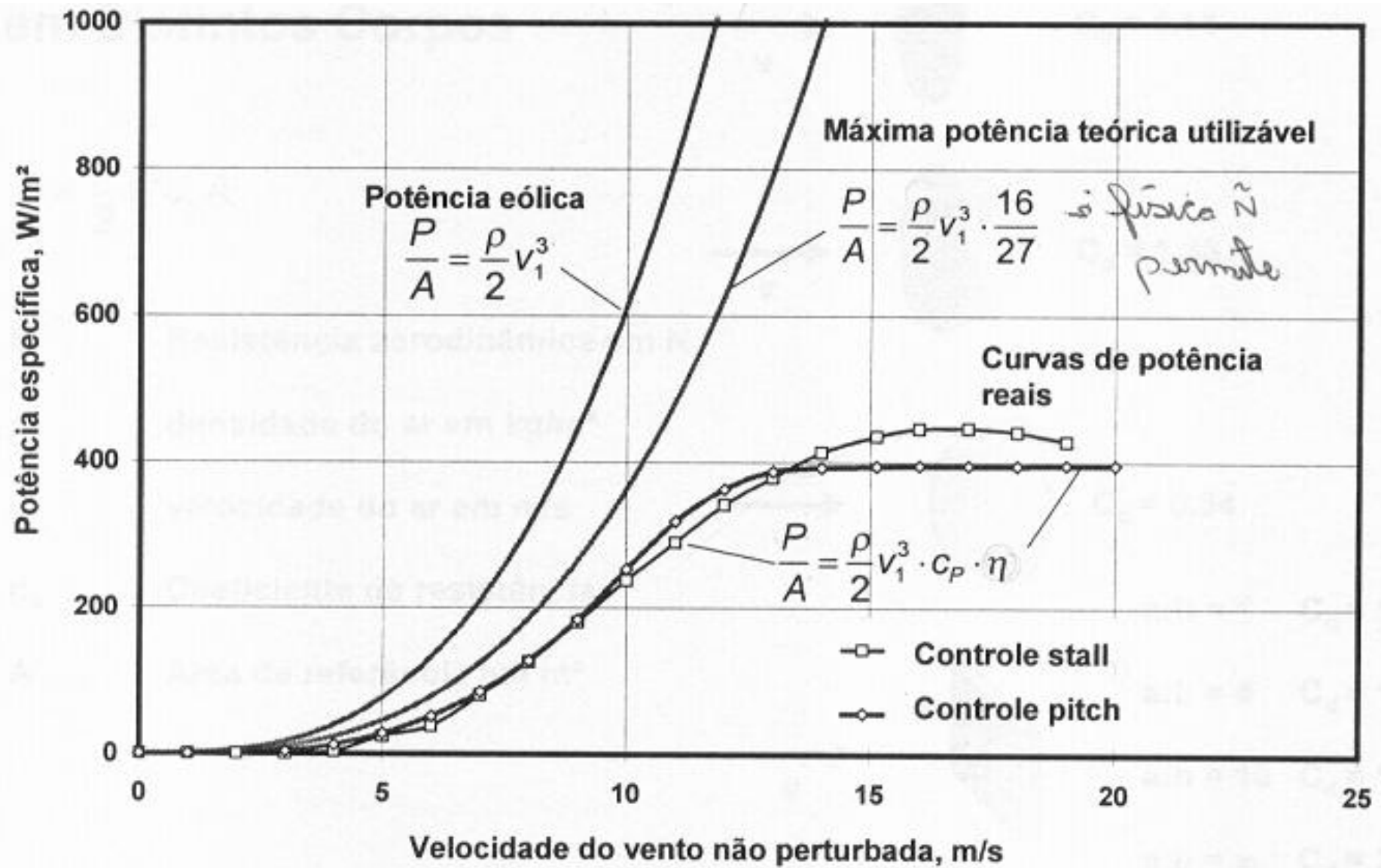
Lei de Betz:



O máximo valor de potência acontece para $v_2 / v_1 = 1/3$.

O valor máximo é de **0,59** ou $16/27$ da potência total no vento.

Curva de potência de uma turbina



Fonte: Dewi

Curva de potência de uma turbina eólica

A potência disponível no vento é:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3$$

A potência mecânica utilizável contida no vento é:

$$P_m = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot C_p$$

C_p = coeficiente de performance ou de potência

Curva de potência de uma turbina eólica

Na prática, a potência elétrica “ P_e ” fornecida por uma turbina eólica em função da velocidade do vento é determinada pela curva de potência da turbina.

$$P_e = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot C_p \cdot \eta$$

η = eficiência global da turbina eólica
(incluindo a eficiência elétrica e mecânica)


Coeficiente de performance ou de
potência (C_p)

Máximo coeficiente de potência alcançável para vários modelos de turbinas

C_p não é constante e é função da:

$$\lambda = \frac{\omega R}{V_1}$$

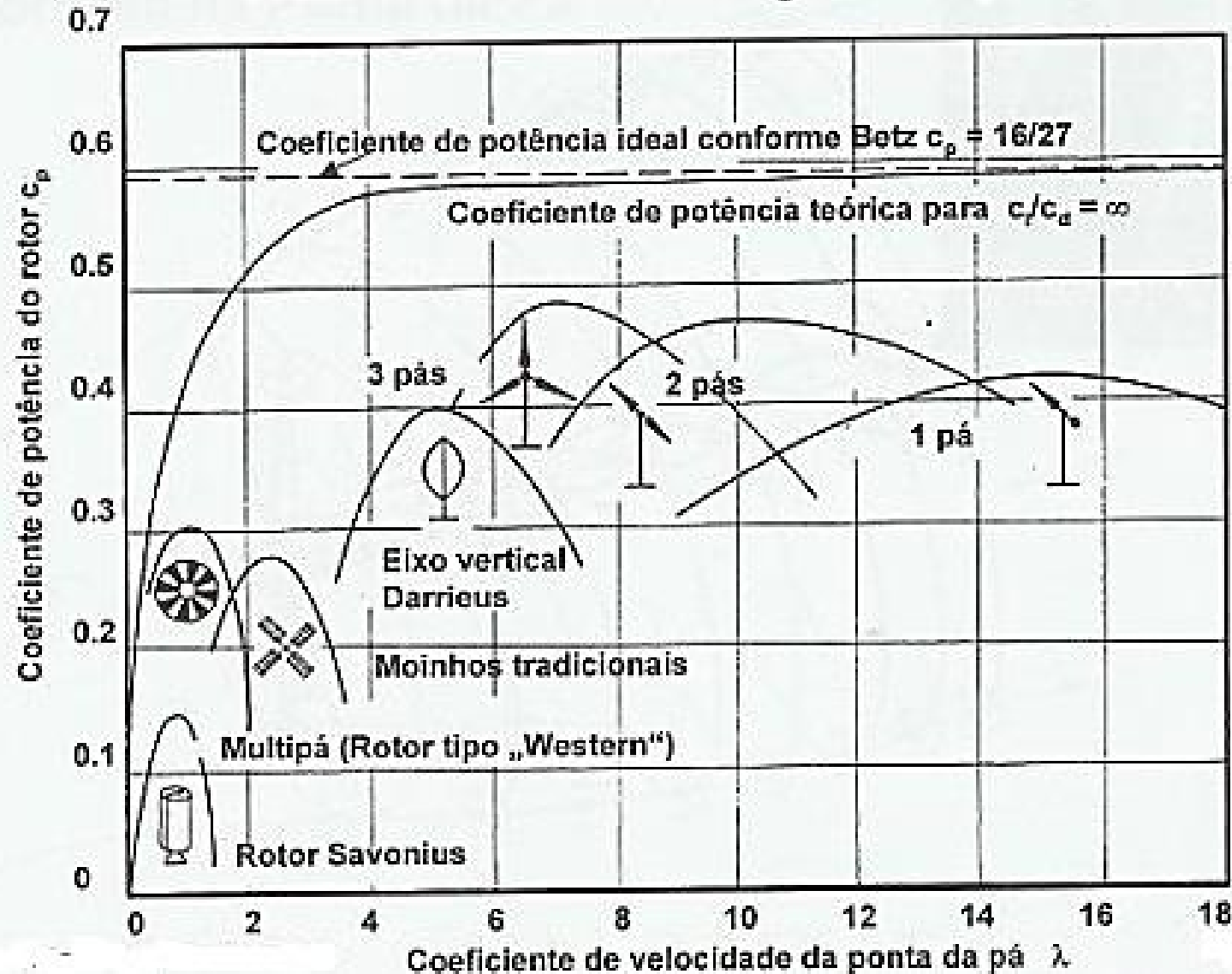
Onde:



- $\lambda =$ Razão de velocidade de ponta de pá
- $\omega R =$ Velocidade tangencial de ponta de pá
- $\omega =$ Velocidade angular
- $R =$ Raio da pá
- $V_1 =$ Velocidade do vento não perturbado

Máximo coeficiente de potência alcançável para vários modelos de turbinas

Número de Pás / Diagrama c_p - λ



$$\lambda = \frac{\omega R}{V_1}$$

As pás são projetadas para ter uma operação ótima à uma determinada velocidade específica

Coeficiente de Potência ou de Performance (variação do ângulo de inclinação)

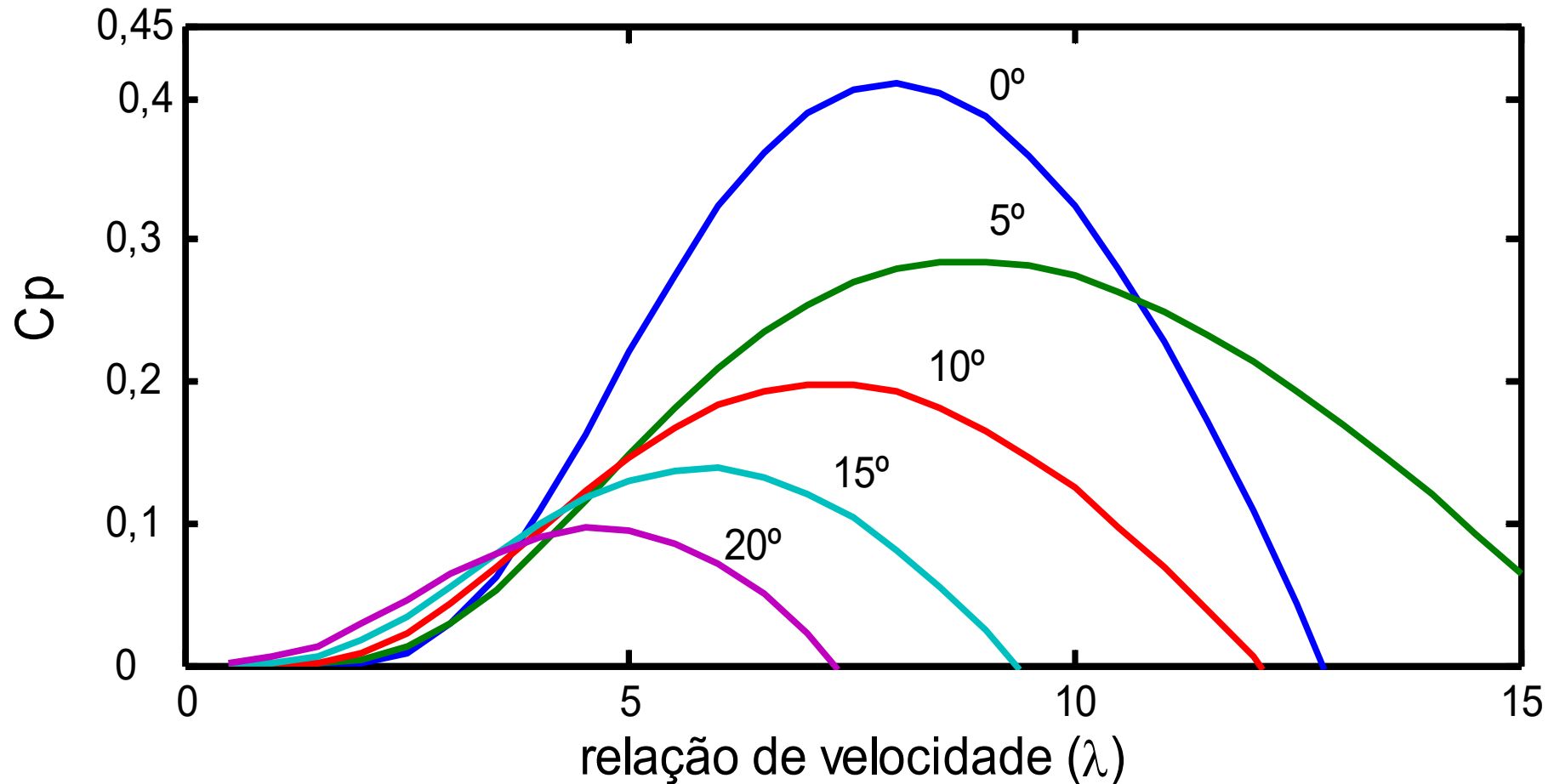
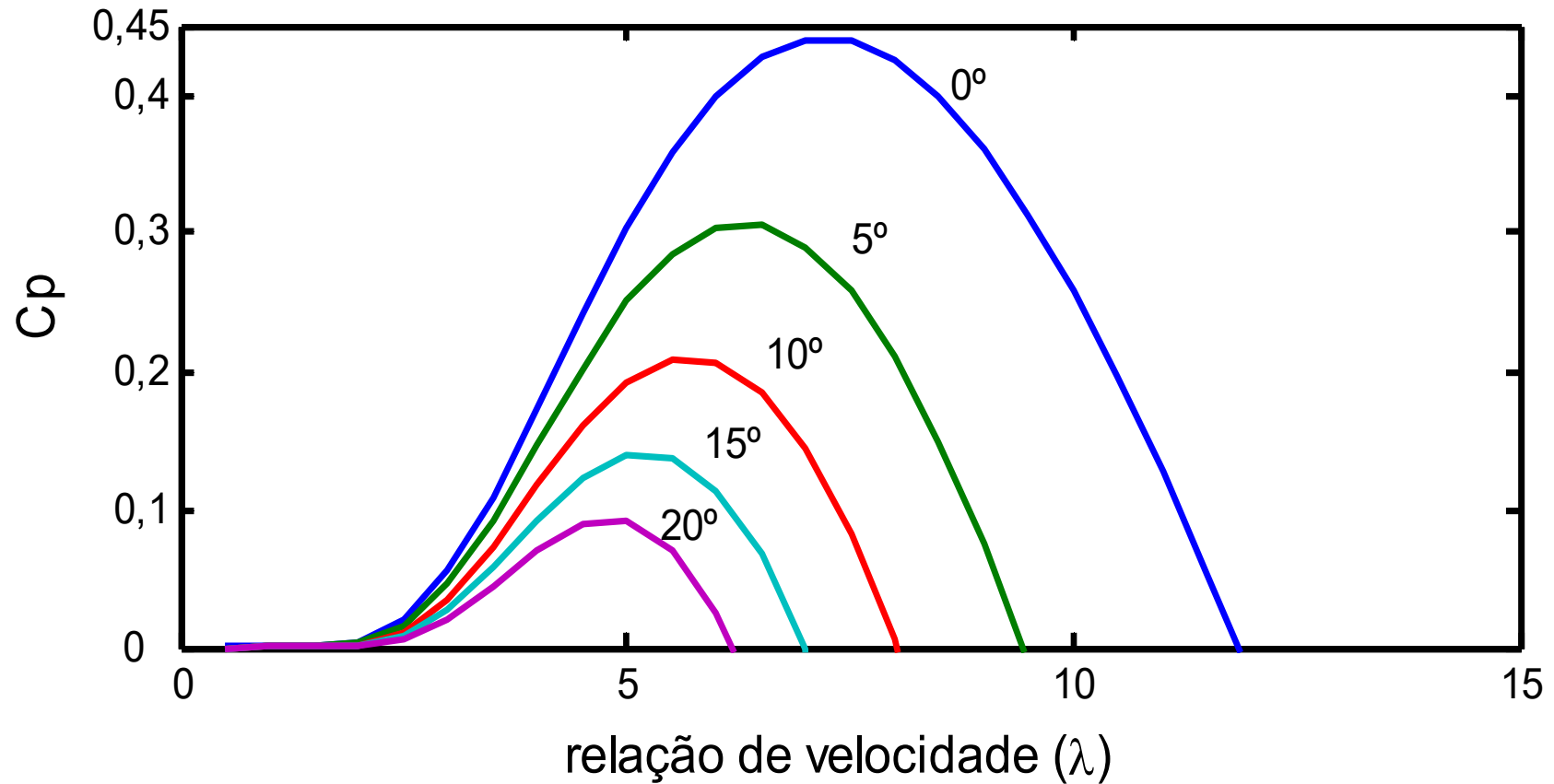


Figura - Curvas C_p sugeridas por *Heier*, para diferentes valores de ângulo de passo.

Coeficiente de Potência ou de Performance (variação do ângulo de inclinação)

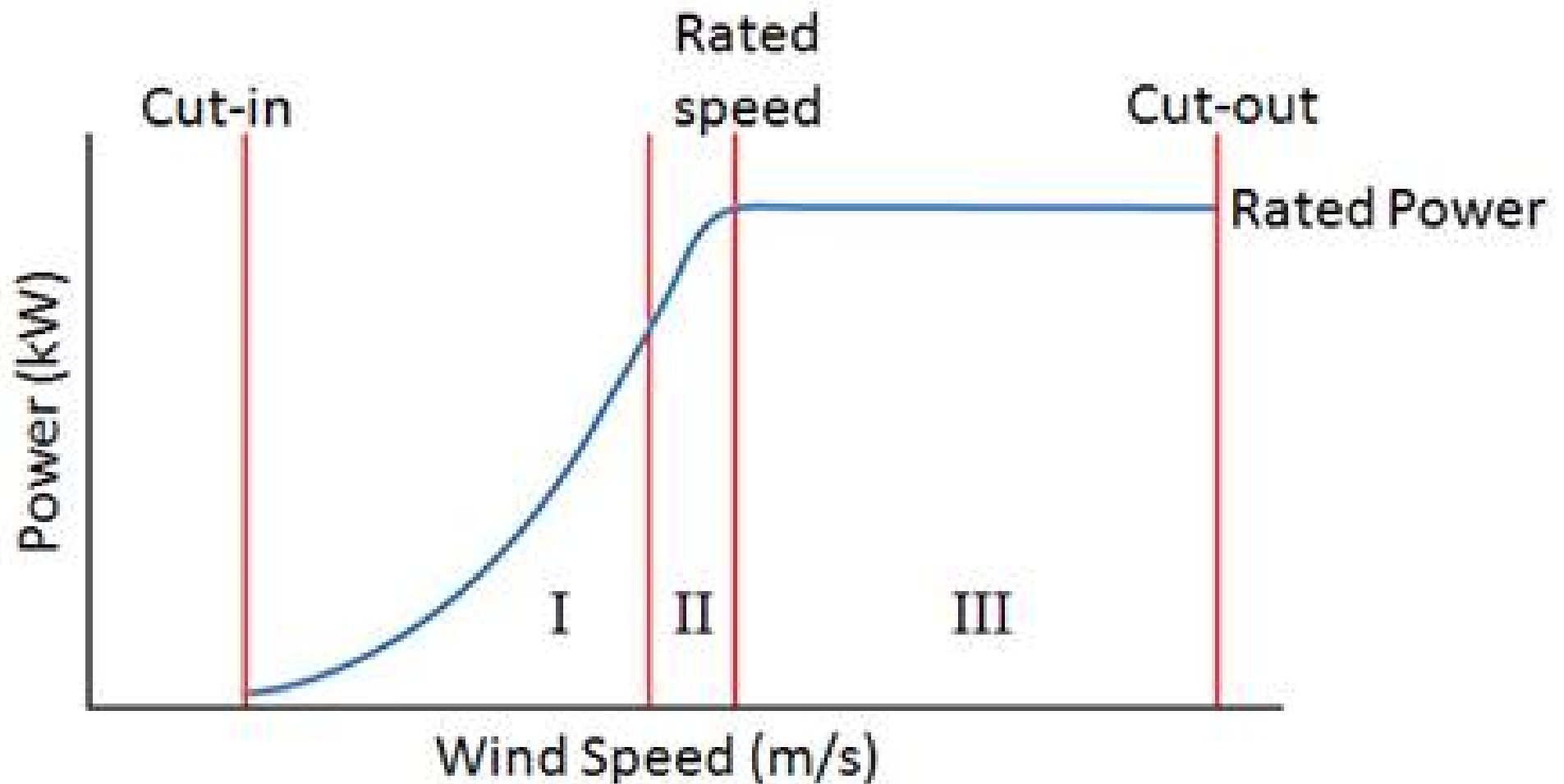


Curvas C_p sugeridas por *Slootweg*, para diferentes valores de ângulo de passo.

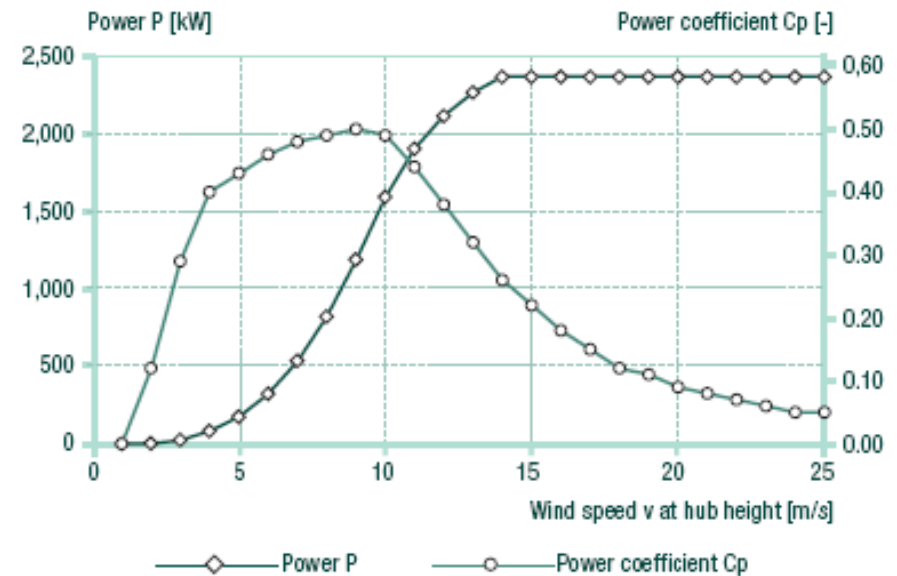
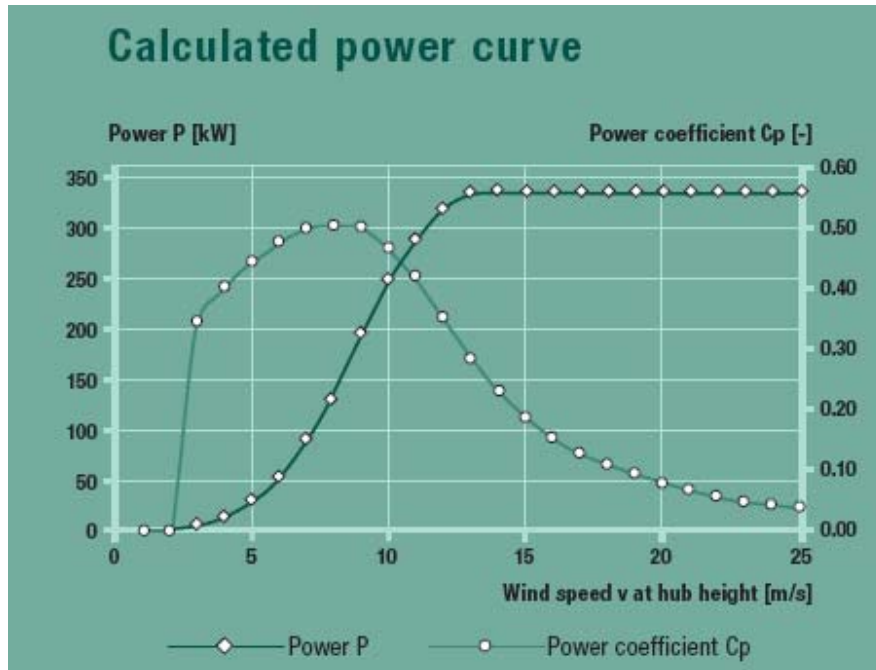
Curvas de potência

Curva de potência de uma turbina eólica

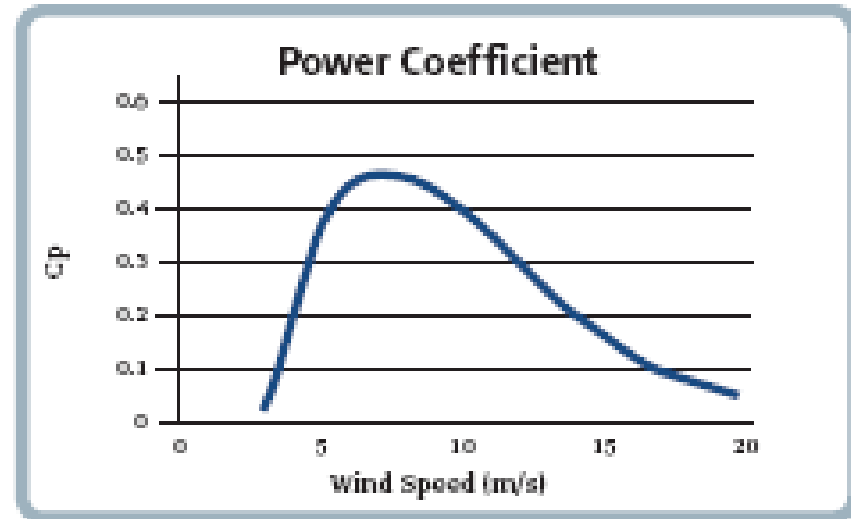
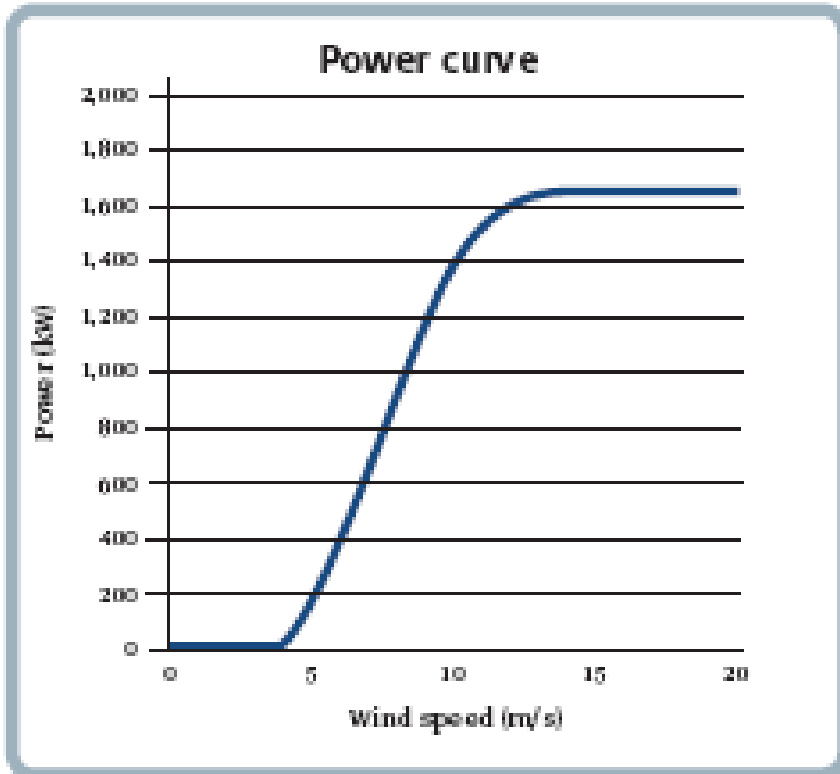
Pode ser dividida em 3 partes



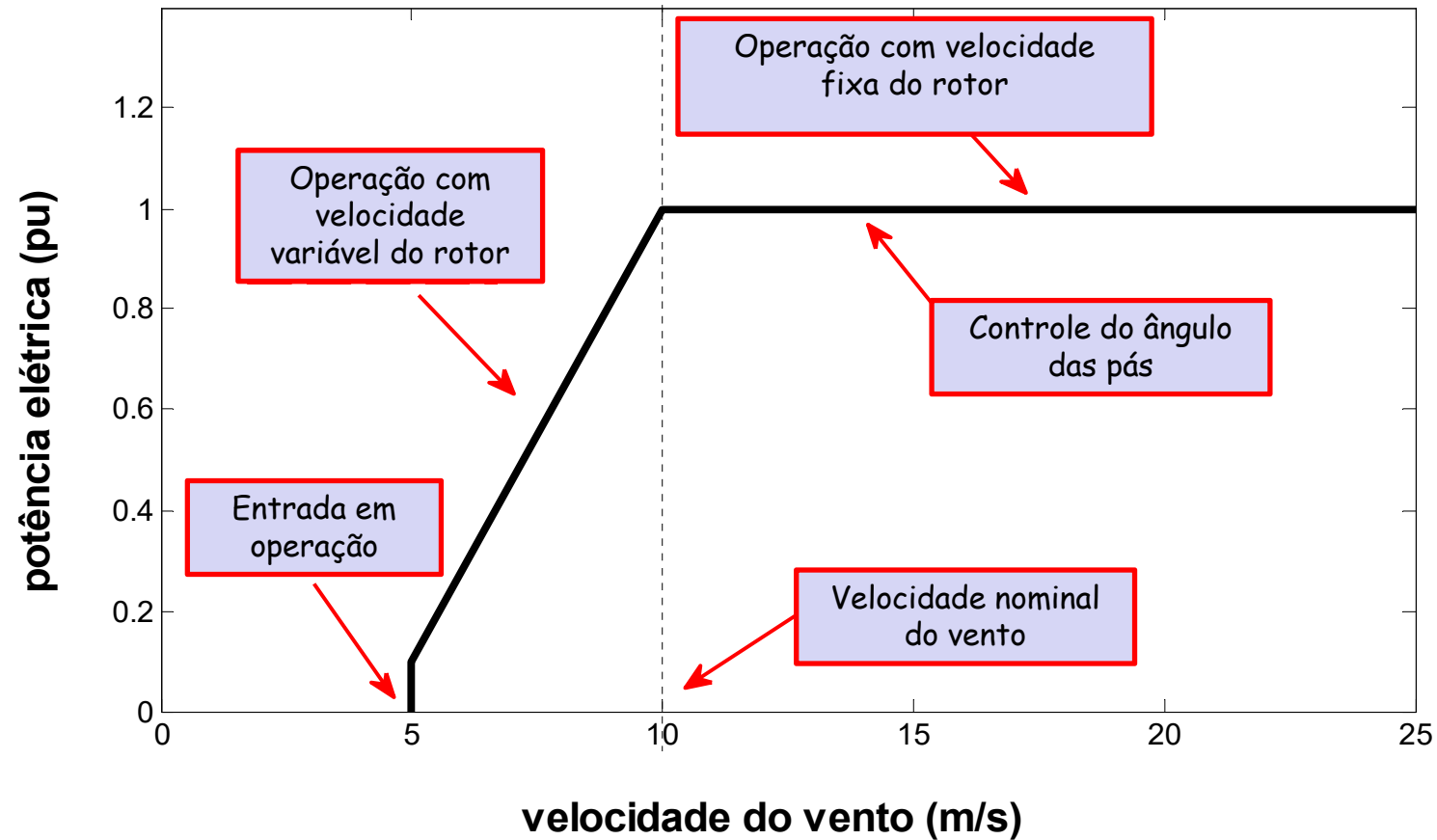
Coeficiente de Potência ou de Performance



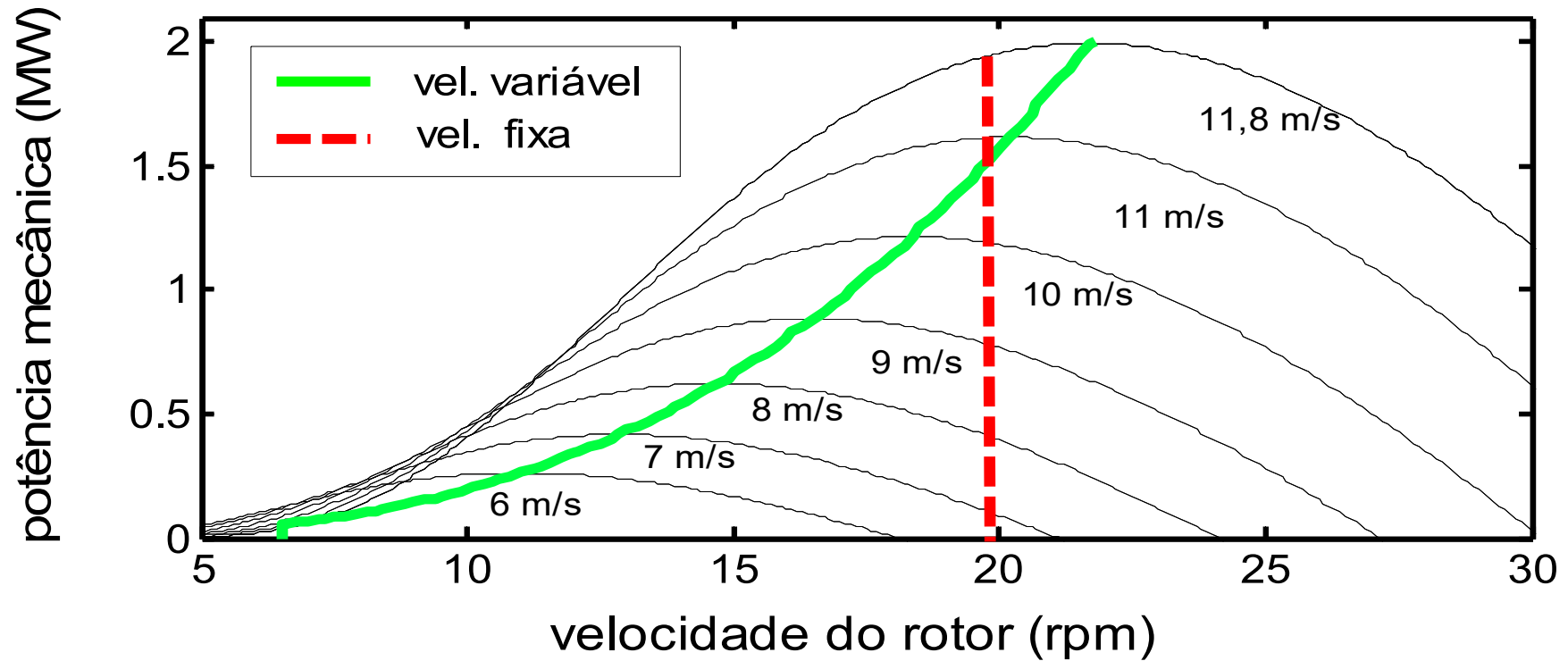
Coeficiente de Potência ou de Performance



Curva de potência genérica de turbinas eólicas de velocidade variável



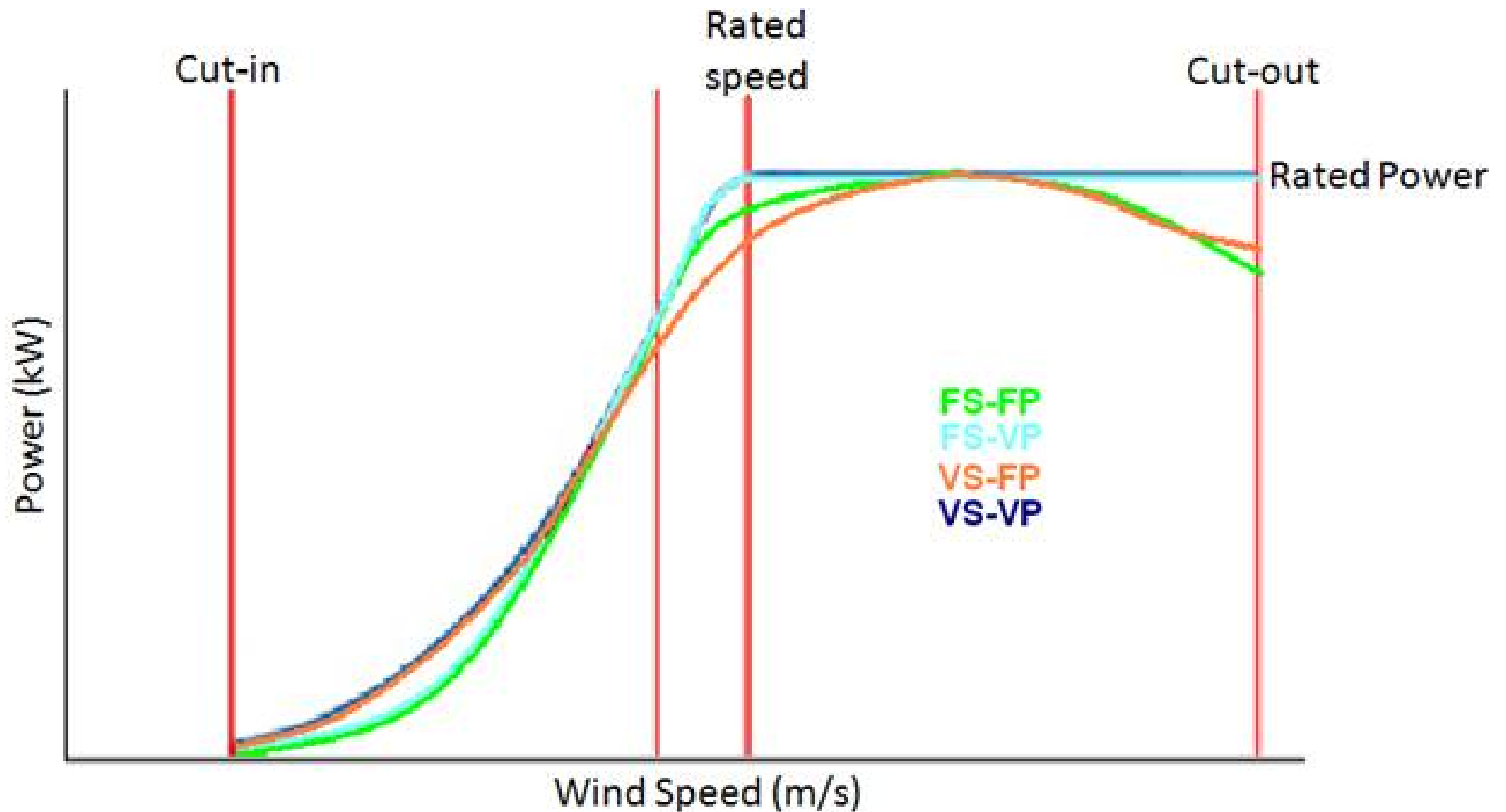
Operação com Velocidade Variável



Comparação entre a potência mecânica para operação com velocidade fixa e variável.

Curva de potência de uma turbina eólica

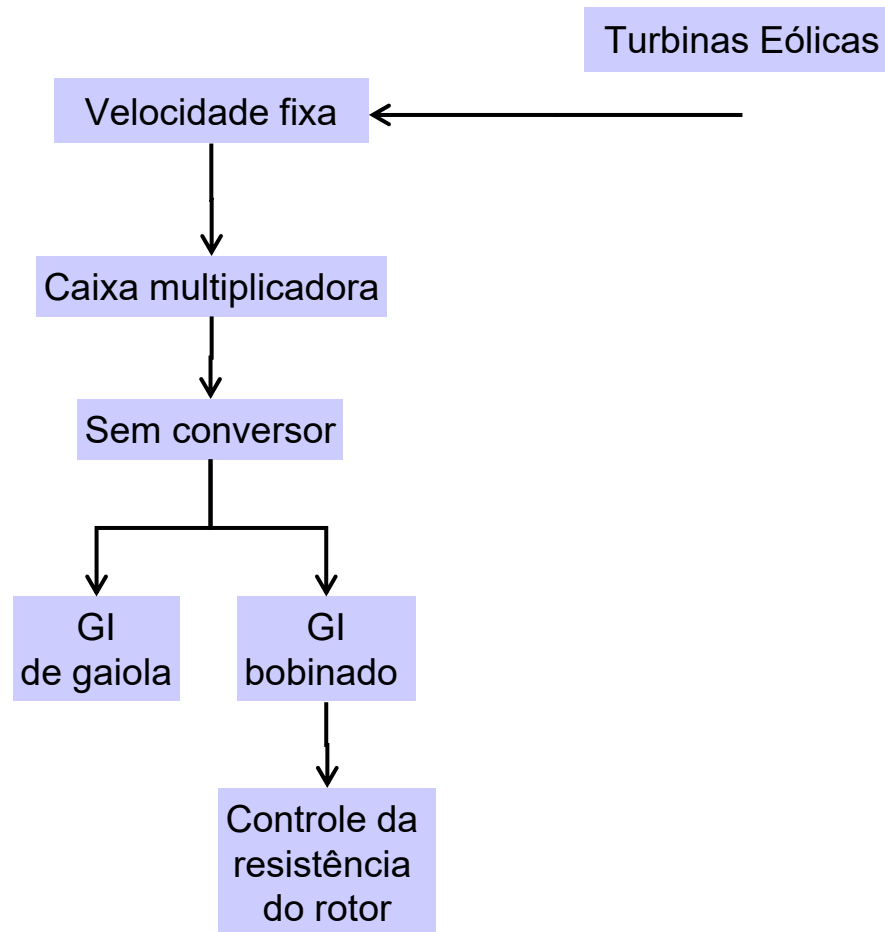
A curva de potência para diferentes tipos de turbina



Tipos de turbinas

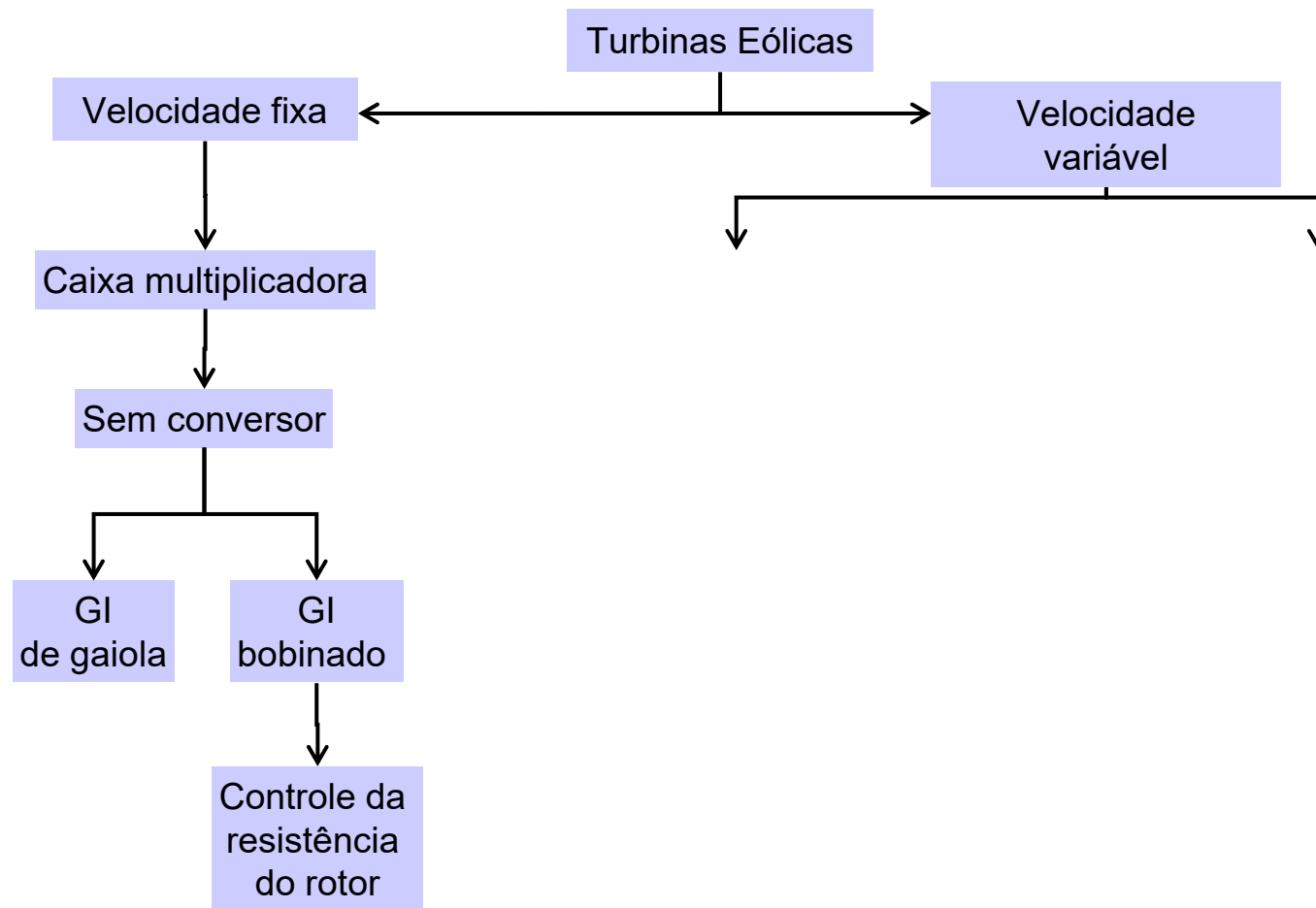
Classificação (velocidade fixa/variável)

Tipos de turbinas eólicas de médio/grande porte.



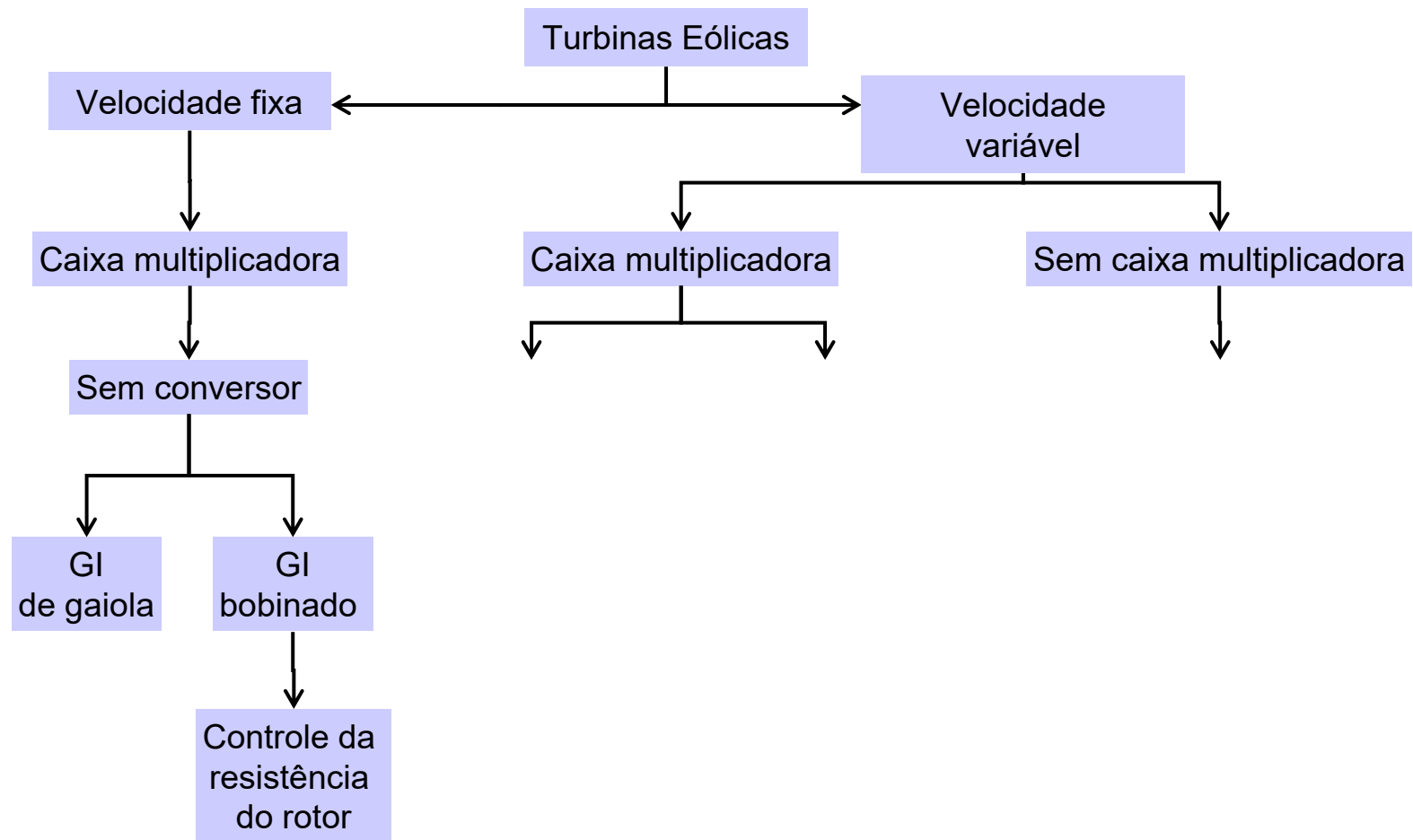
Classificação (velocidade fixa/variável)

Tipos de turbinas eólicas de médio/grande porte.



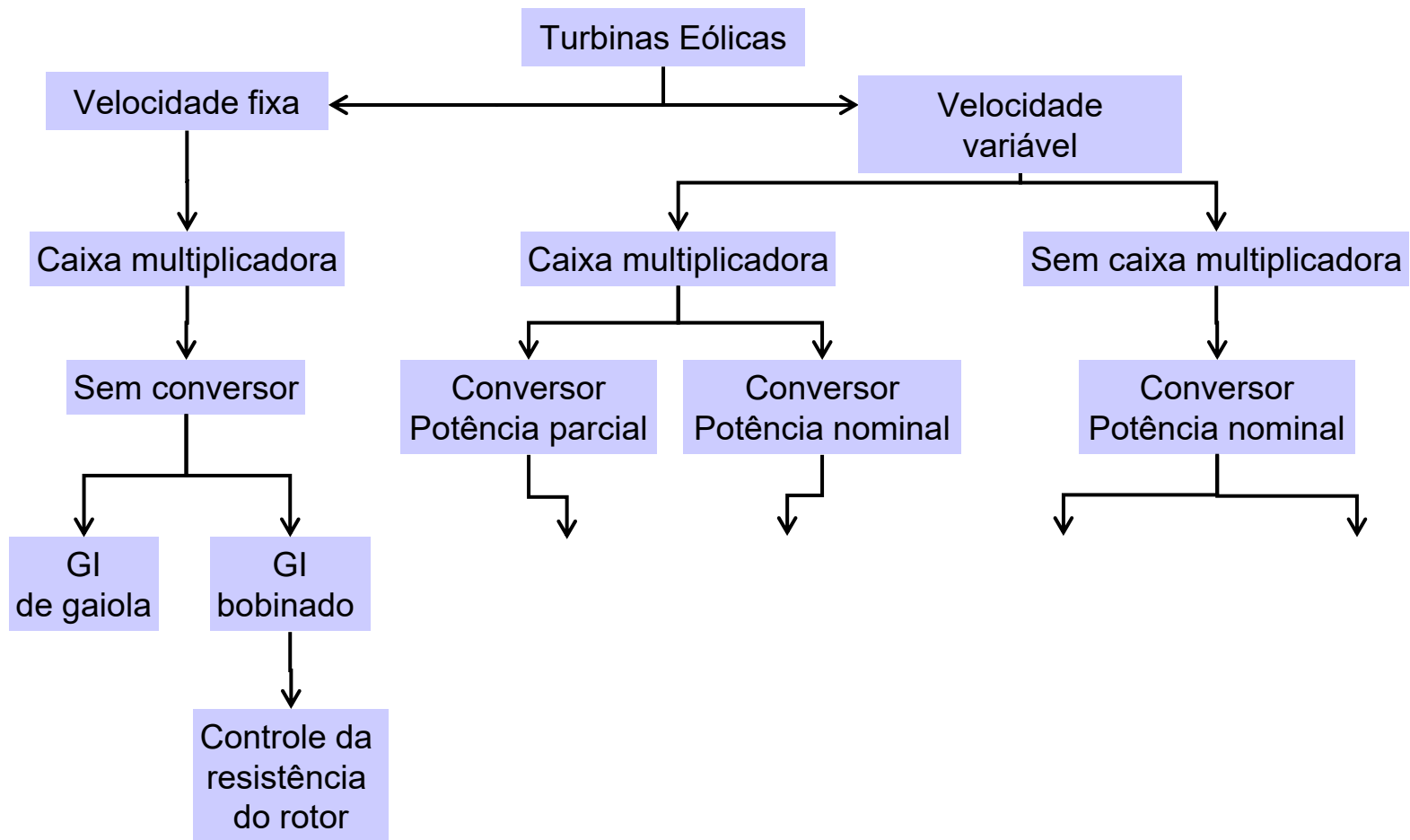
Classificação (velocidade fixa/variável)

Tipos de turbinas eólicas de médio/grande porte.



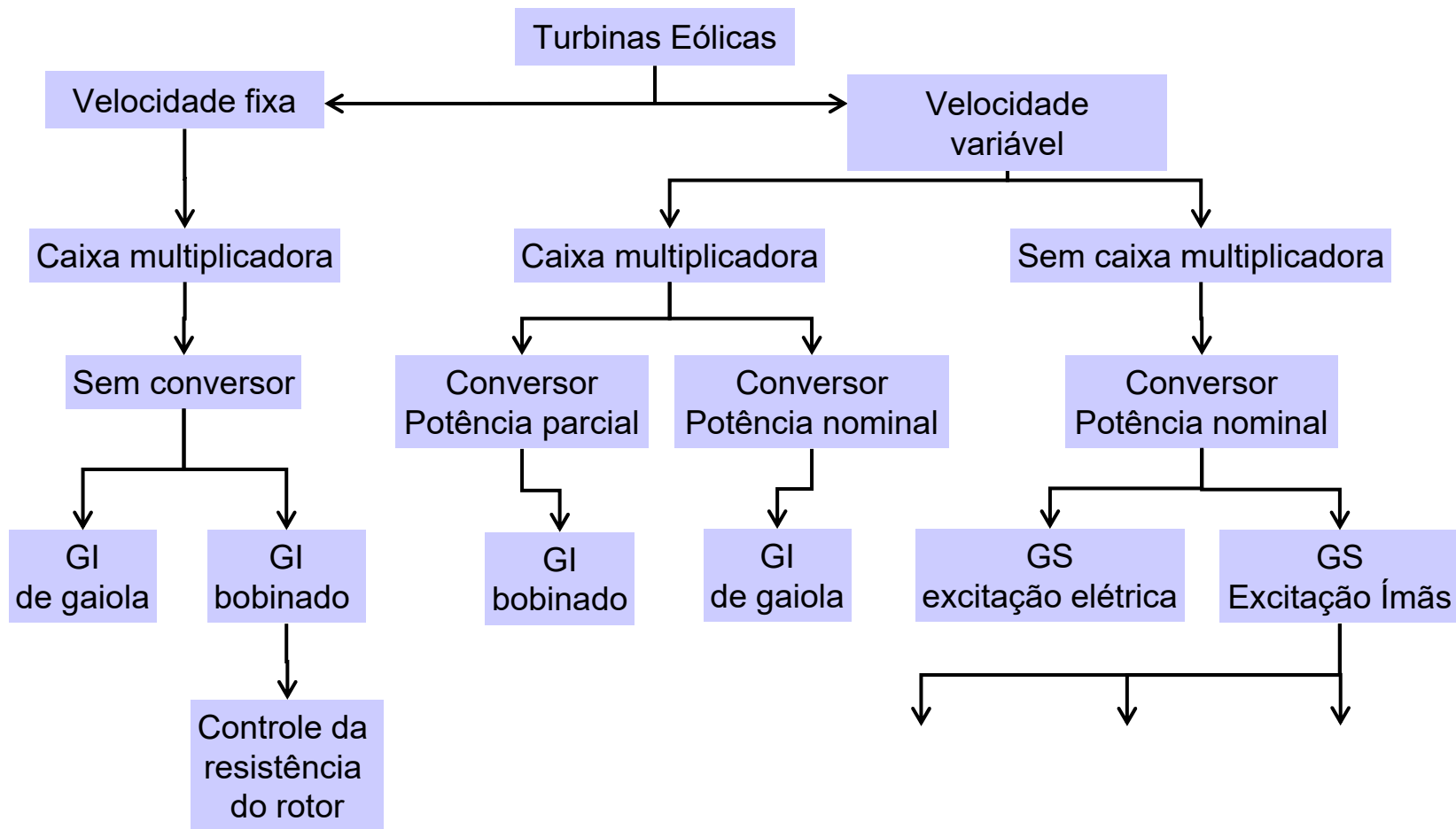
Classificação (velocidade fixa/variável)

Tipos de turbinas eólicas de médio/grande porte.



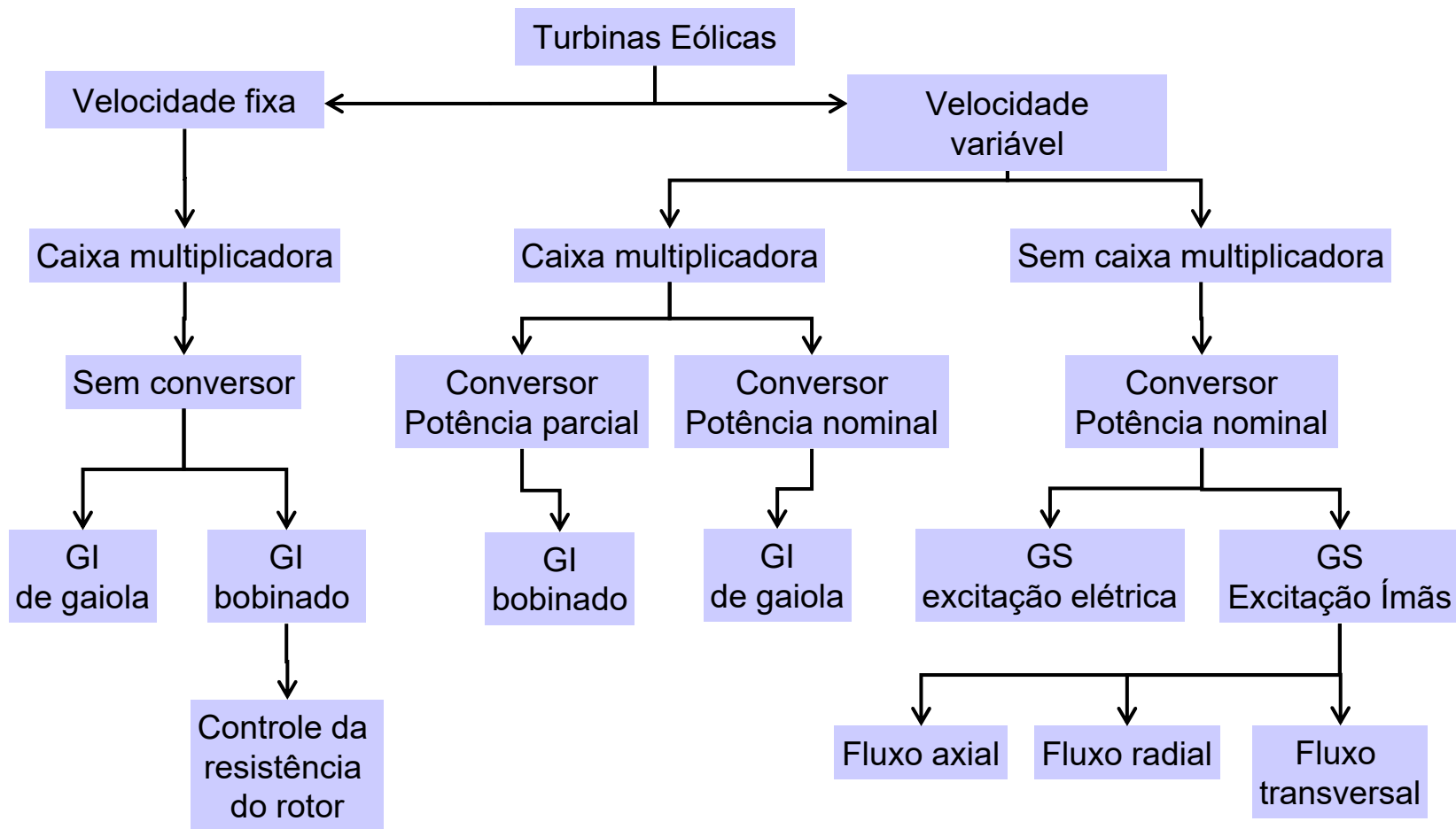
Classificação (velocidade fixa/variável)

Tipos de turbinas eólicas de médio/grande porte.

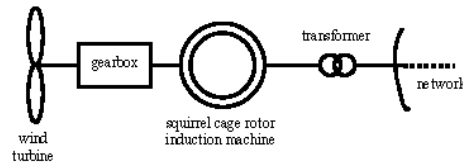


Classificação (velocidade fixa/variável)

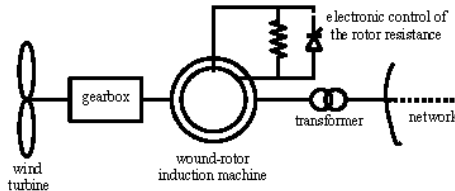
Tipos de turbinas eólicas de médio/grande porte.



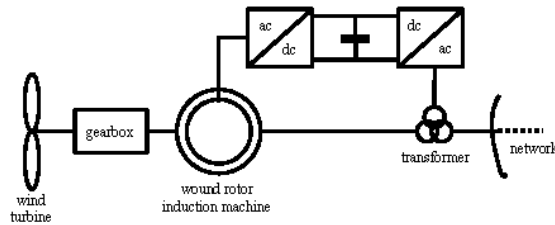
Classificação (velocidade fixa e variável)



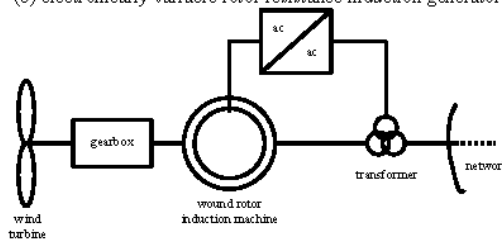
(a) direct grid-connected induction generator



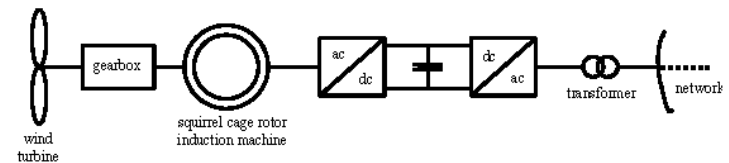
(b) electronically variable rotor resistance induction generator



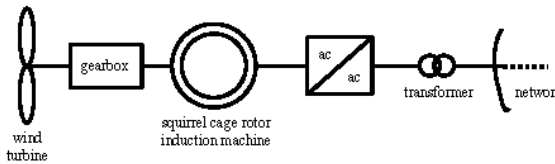
(c) double-fed induction generator



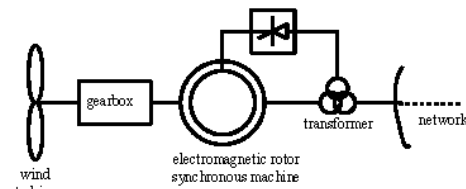
(d) double-fed induction generator



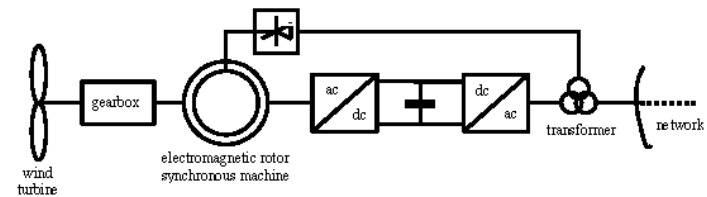
(e) back-to-back converter grid-connected induction generator



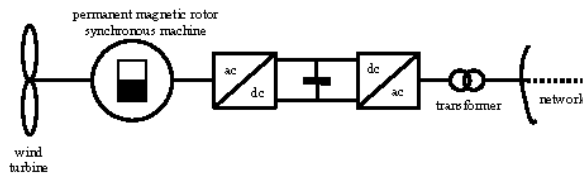
(f) ac/ac converter grid-connected induction generator



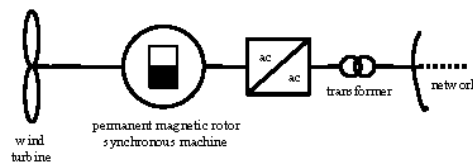
(g) direct grid-connected synchronous generator



(h) back-to-back ac/dc converter grid-connected synchronous generator



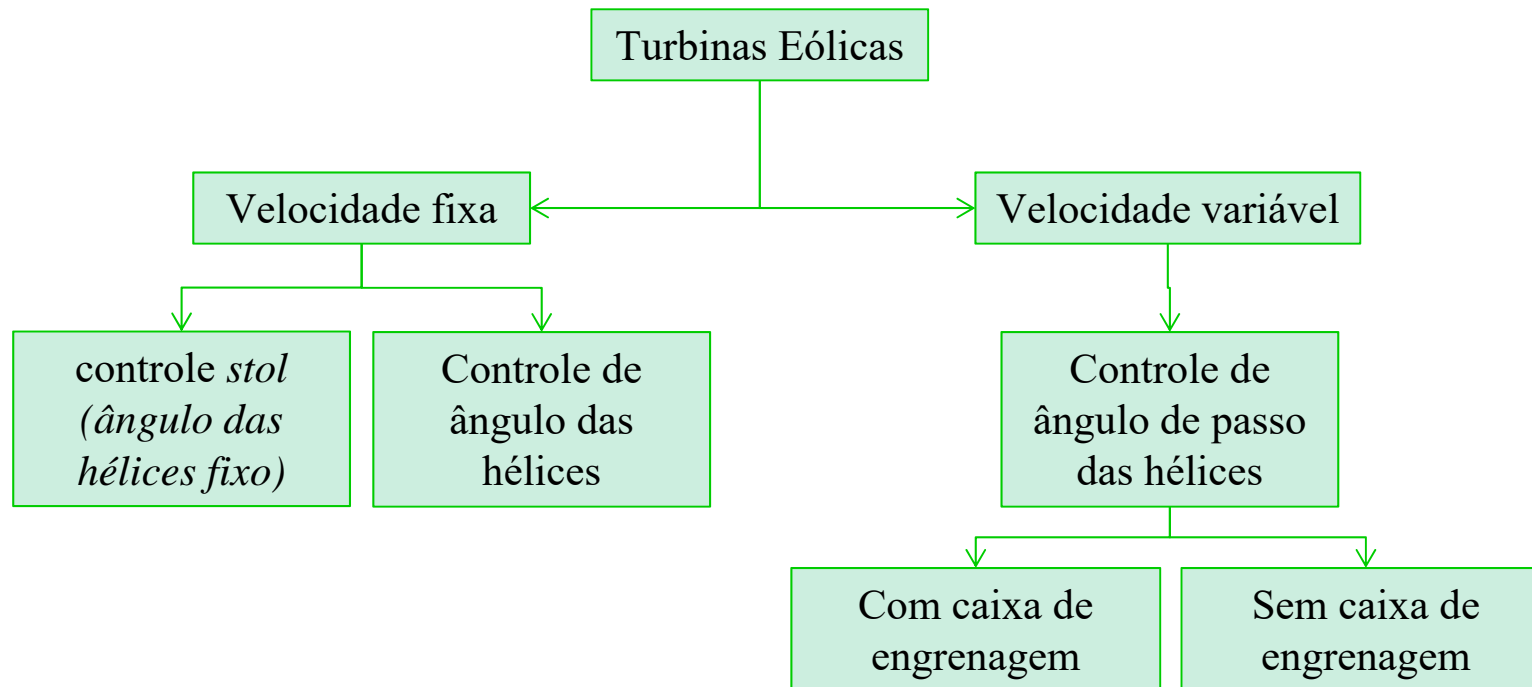
(i) back-to-back ac/dc converter grid-connected synchronous generator



(j) ac/ac converter grid-connected synchronous generator

Tipos de Turbinas de Eixo Horizontal (simplificação)

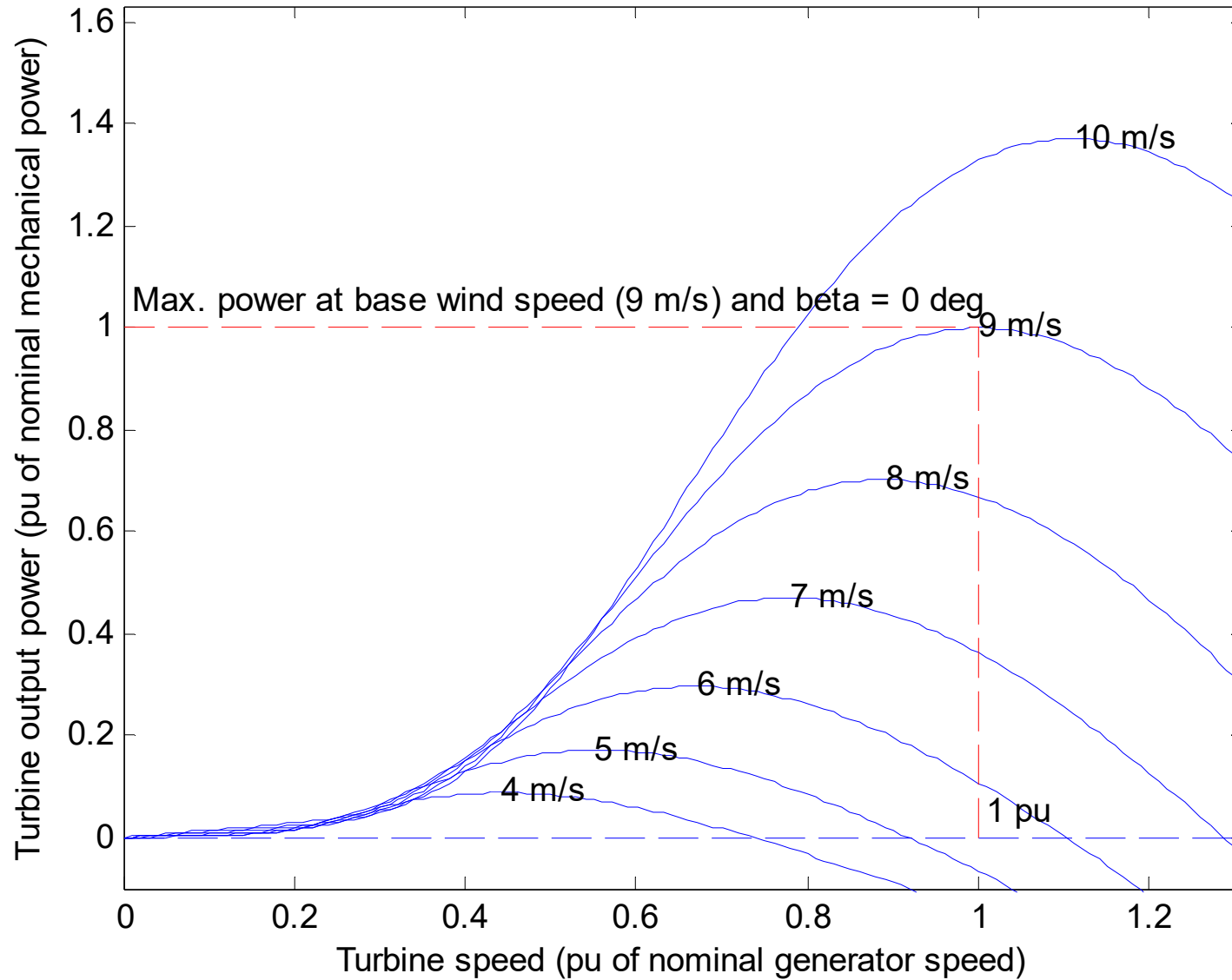
Tipos de turbinas eólicas de médio/grande porte.



As turbinas mais modernas são de velocidade variável, pois são mais eficientes.

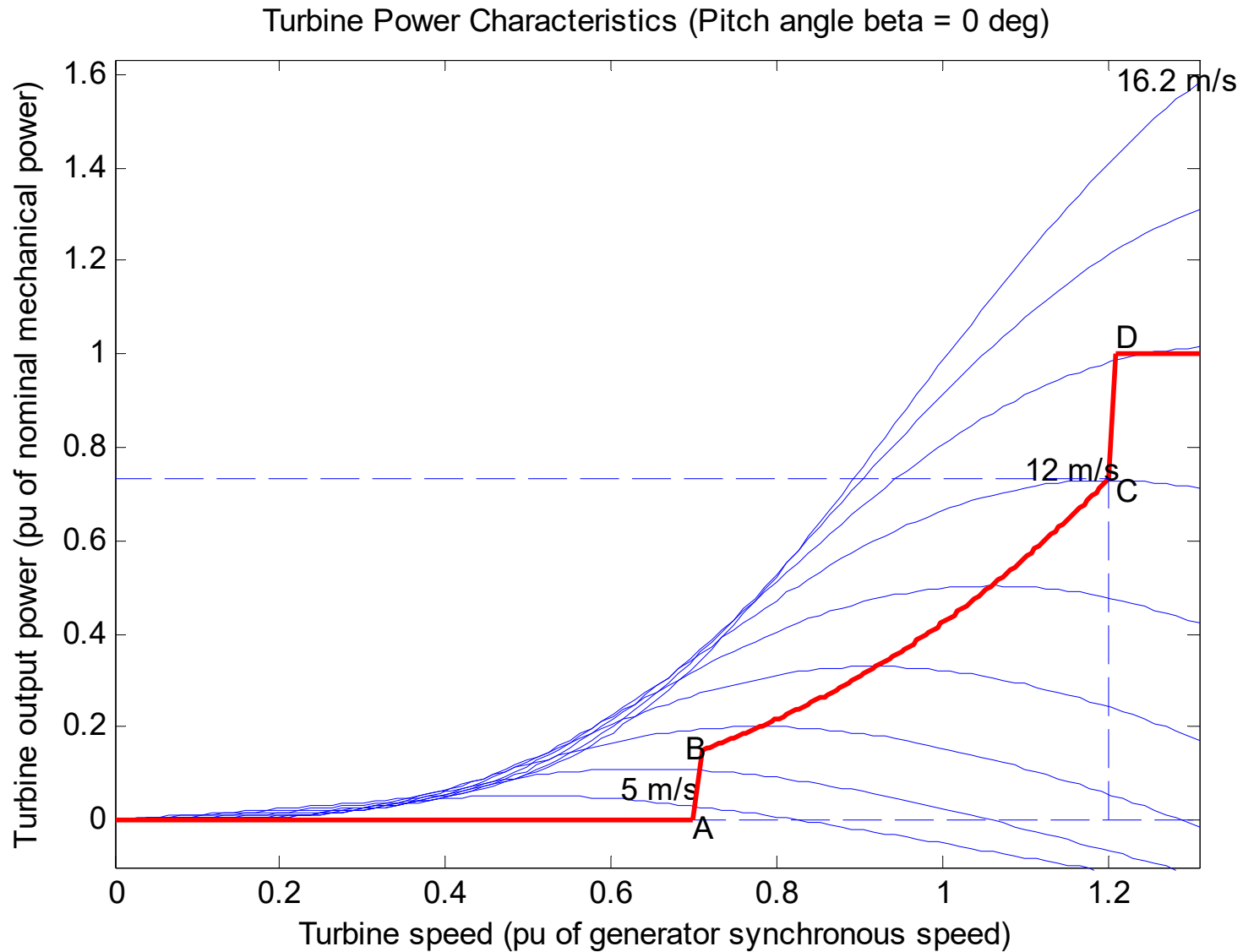
Características de turbina com velocidade fixa

Turbine Power Characteristics (Pitch angle $\beta = 0$ deg)



Fonte: Wind Turbine Model - Matlab/Simulink toolbox SimPowerSystem

Características de turbina com velocidade variável

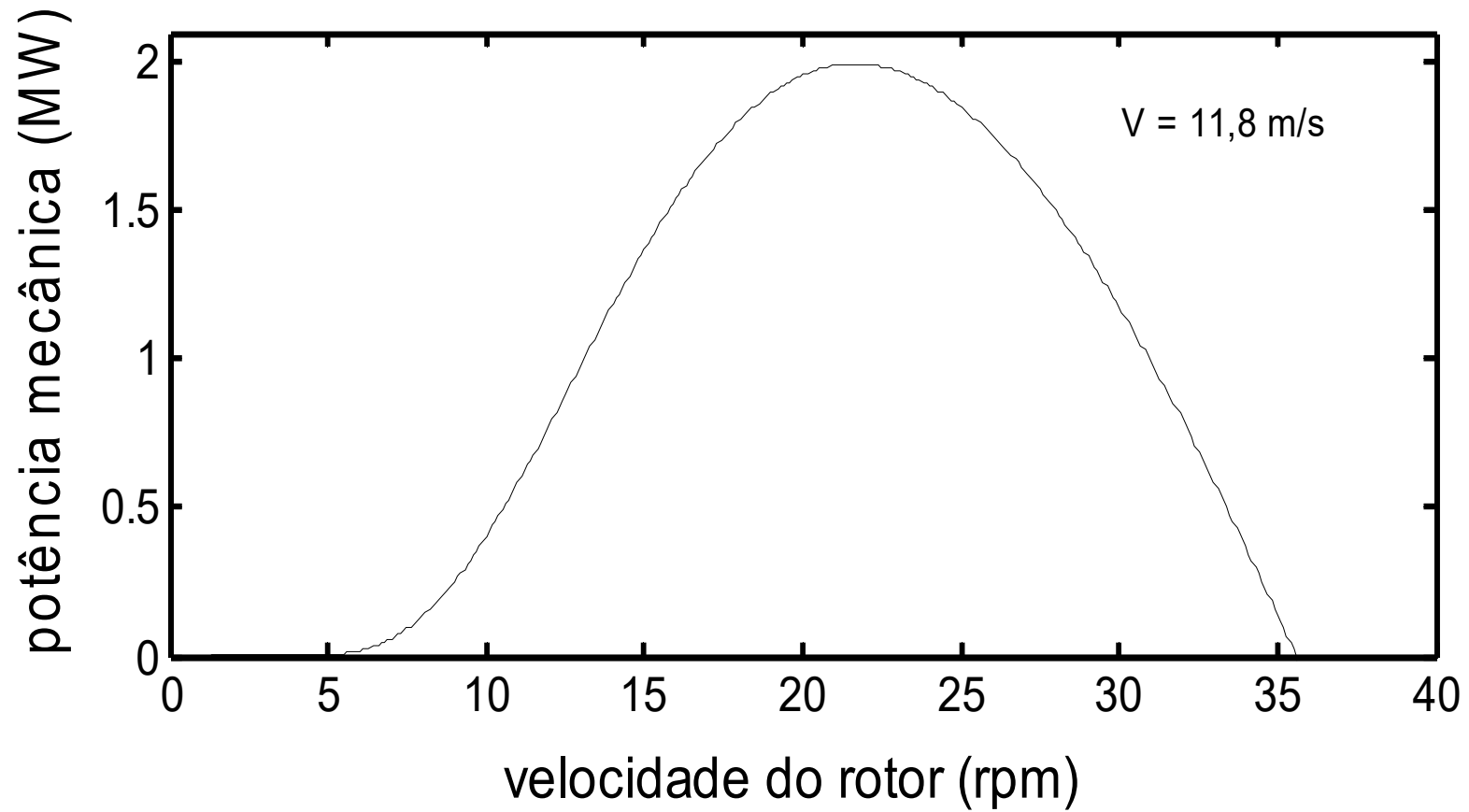


Fonte: Wind Turbine Model - Matlab/Simulink toolbox SimPowerSystem

Controle de potência

Controle de Potência

Potência mecânica para diferentes velocidades de operação do rotor.



Controle de Potência

Tipos de controle de potência utilizados em turbinas eólicas:

- **Controle Estol (Stall Control)**: as hélices são fixas ao cubo do rotor da turbina, porém são projetadas aerodinamicamente de forma a limitar a potência extraída para ventos com velocidades acima da nominal



© 1998 www.WINDPOWER.dk

Velocidade do vento abaixo da nominal



© 1998 www.WINDPOWER.dk

Velocidade do vento acima da nominal

Controle de Potência

Tipos de controle de potência utilizados em turbinas eólicas:

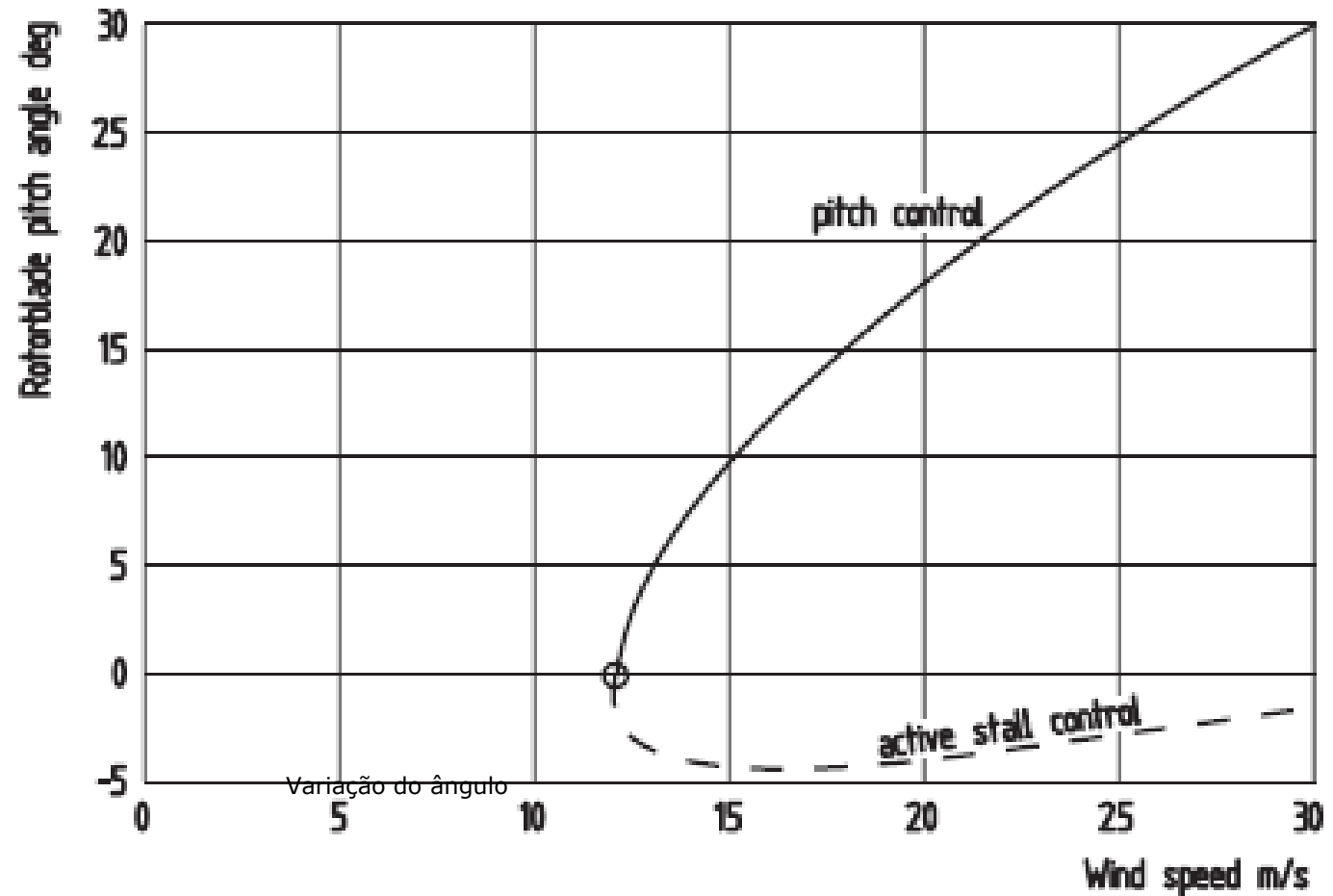
- **Controle de Passo (*Pitch Control*)**: ângulo de passo é variado de forma a diminuir o ângulo de ataque e reduzir a potência extraída do vento



Controle de Potência

Tipos de controle de potência utilizados em turbinas eólicas:

- **Controle Estol Ativo (Active Stall Control)**: ângulo de passo é variado de forma a provocar a ocorrência do fenômeno estol, ou seja, embora o ângulo de ataque aumente, a potência extraída do vento diminui devido ao projeto aerodinâmico

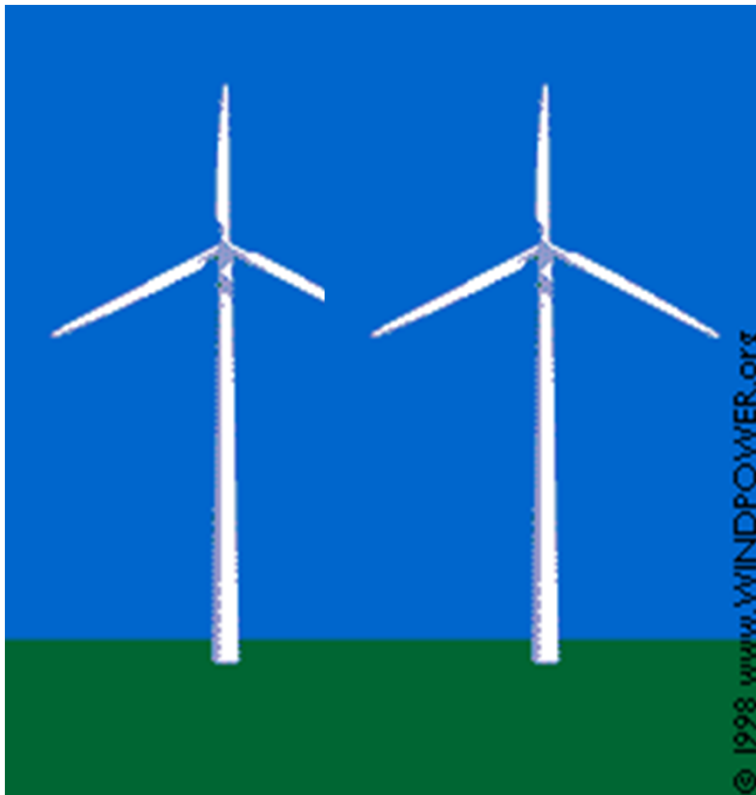


Fonte: Danish Wind Industry Association (windpower.org) e Erich Hau, "Windkraftanlagen" (título em alemão), Springer, Berlin, 4 ed., 2008.

Controle de Potência

Tipos de controle de potência utilizados em turbinas eólicas:

- **Controle de Guinada (Yaw Control)**: este controle gira a turbina eólica na direção do vento

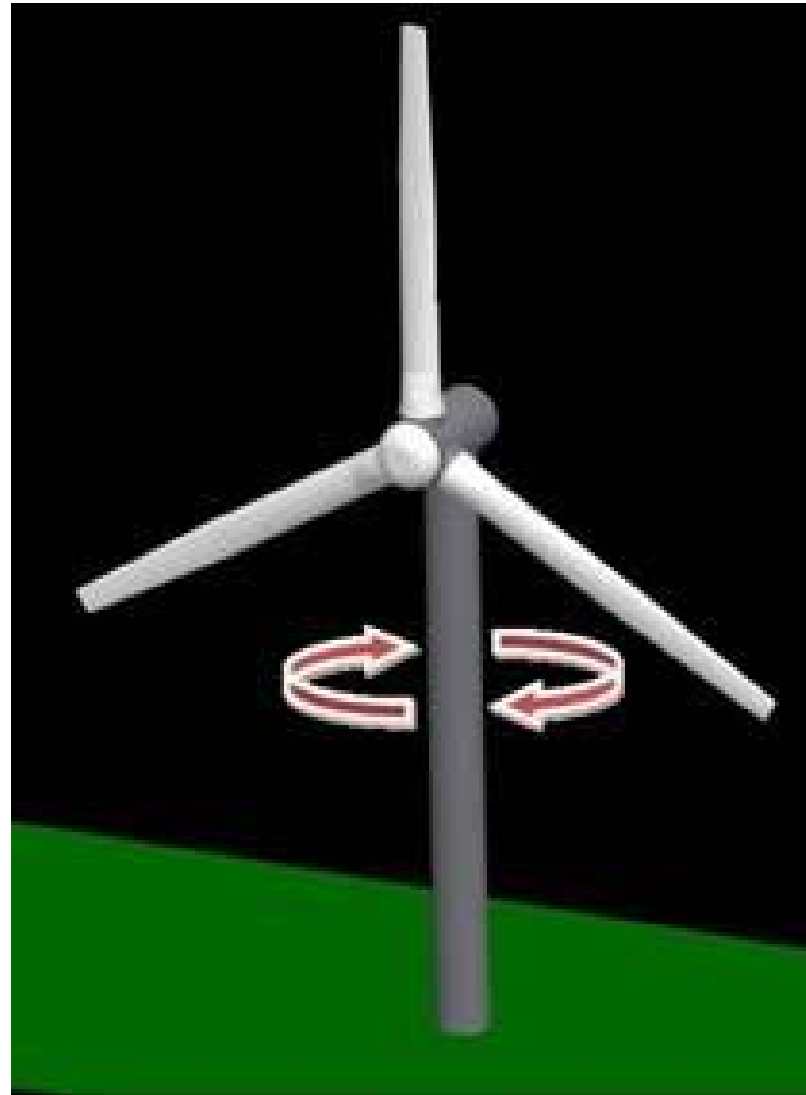


© 1998 www.WINDPOWER.org

Controle de guinada

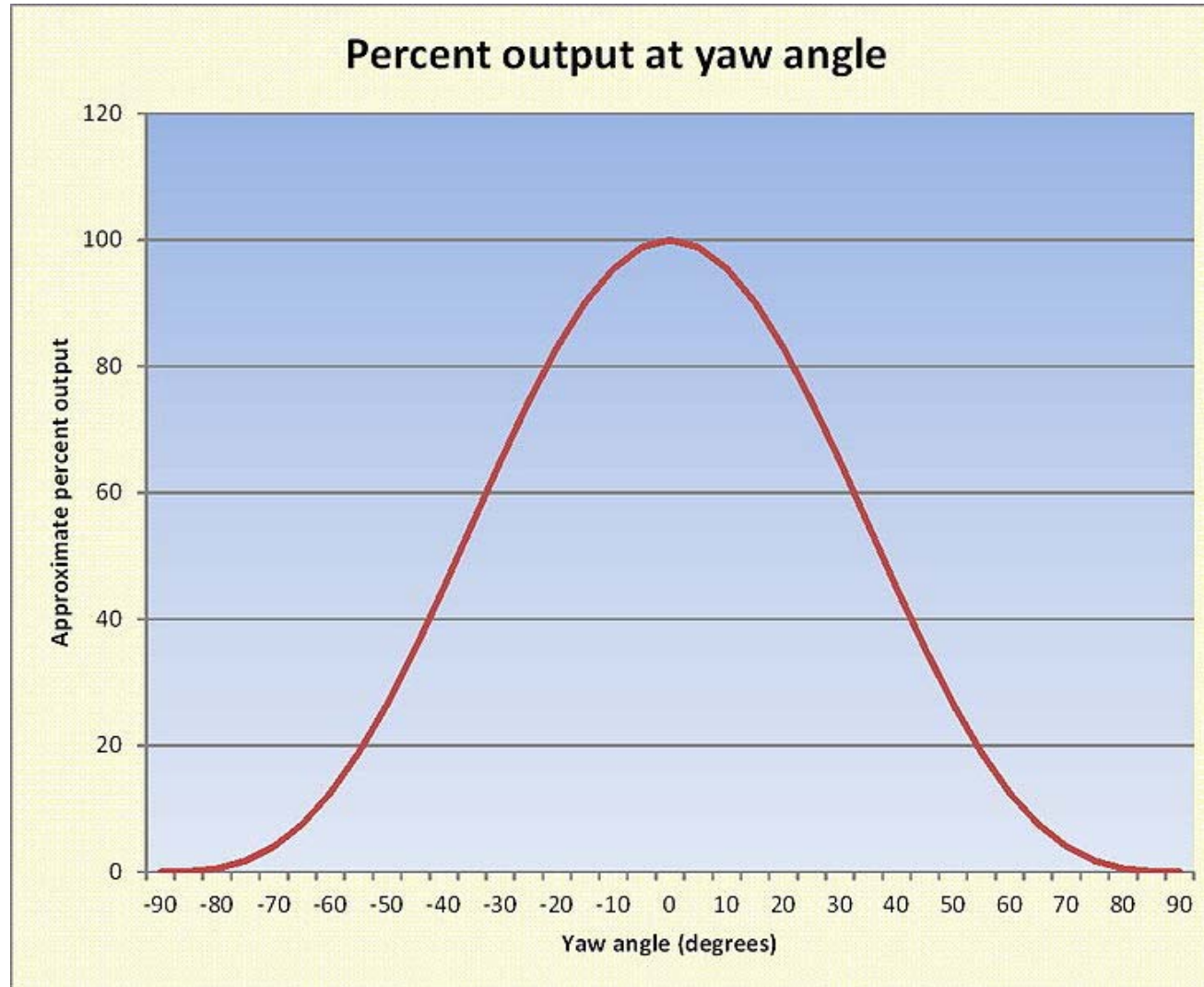
Curva de potência de uma turbina eólica

Ajuste de posicionamento da turbina (*Yaw adjustment*)



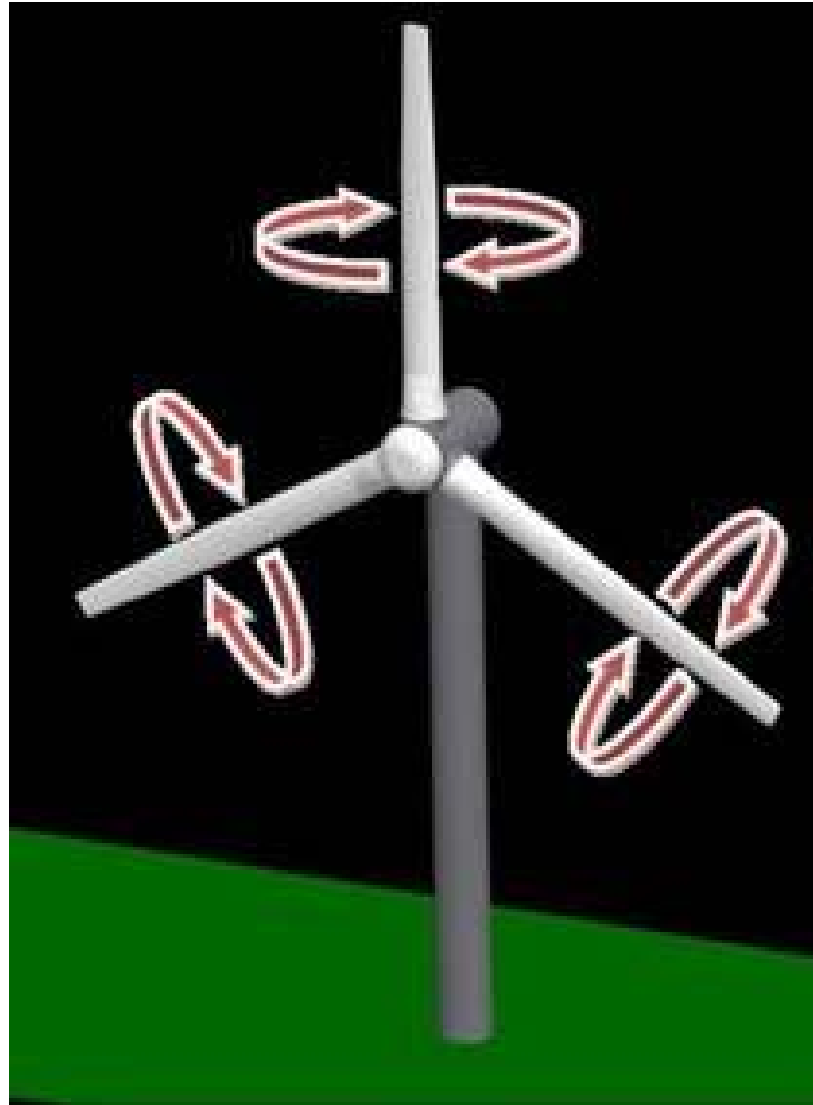
Controle de Potência

Controle de Guinada (Yaw Control):



Curva de potência de uma turbina eólica

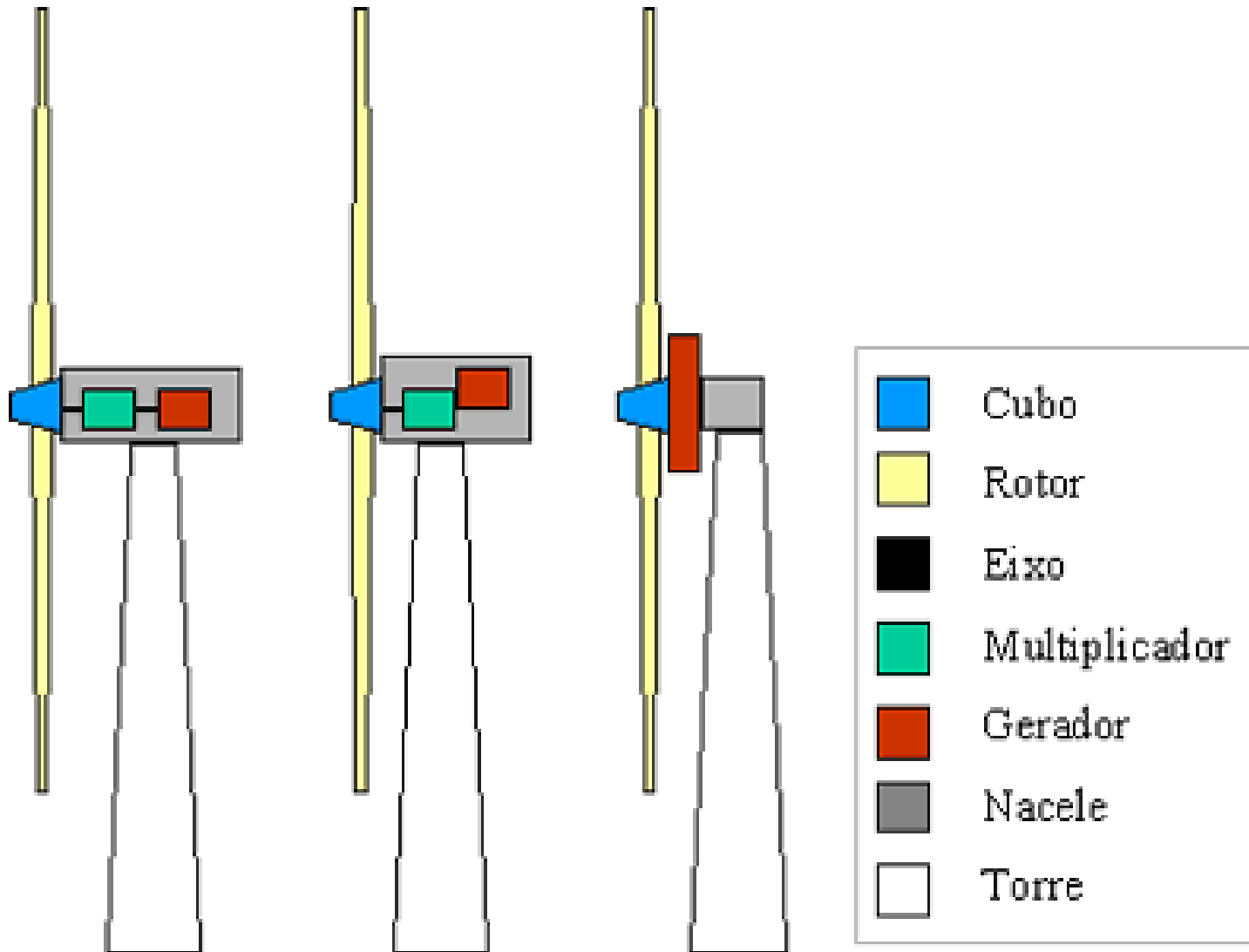
Ajuste de ângulo das pás (*pitch adjustment*)



Configurações

Multiplicador de Velocidade

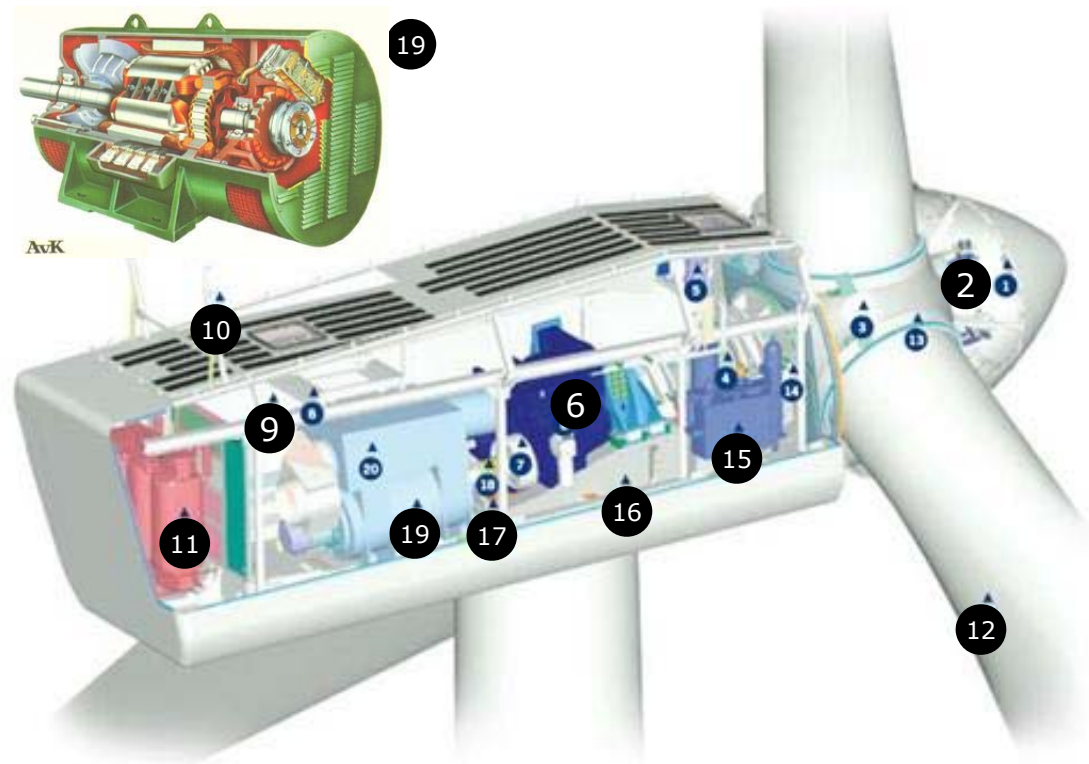
Comparação entre turbinas com e sem multiplicador de velocidade.



Multiplicador de Velocidade

Turbina eólica com multiplicador de velocidade.

- 2. Controle pitch
- 6. Caixa multiplicadora
- 9. Controladores e Inversores
- 10. Sensores de direção e velocidade do vento
- 11. Transformador de alta tensão
- 12. Pás
- 15. Sistema hidráulico
- 16. Plataforma da nacele
- 17. Motores de posicionamento
- 19. Gerador de indução (assíncrono)



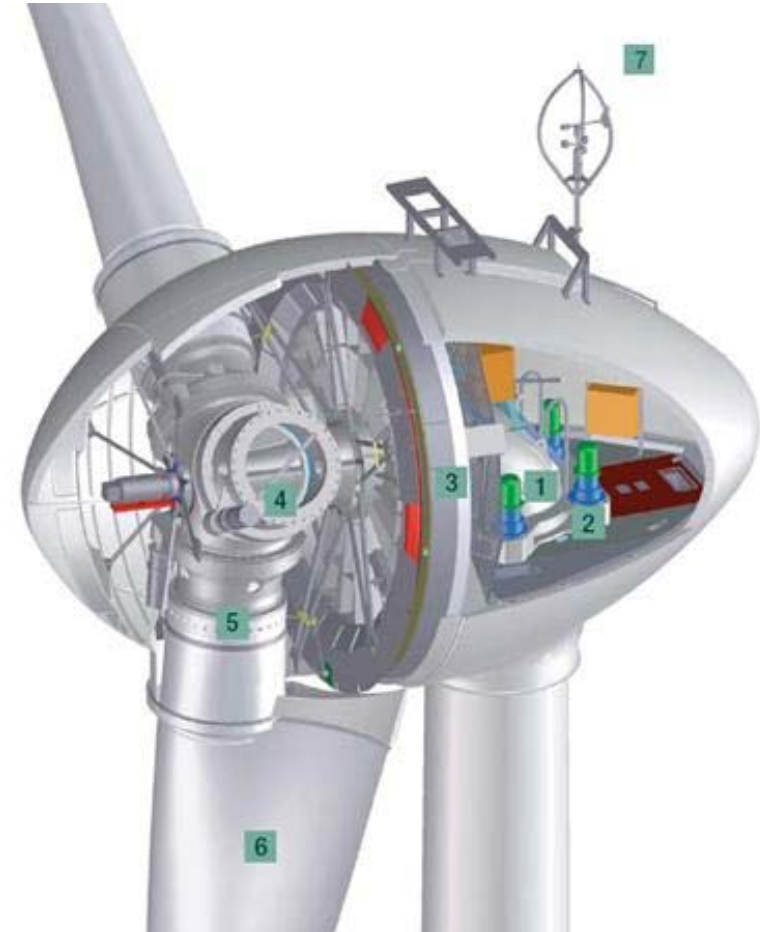
Multiplicador de Velocidade

Turbina eólica **sem** multiplicador de velocidade.

1. Apoio principal da nacele
2. Motores de orientação da nacele
3. Gerador síncrono em anel (multipolos)
4. Fixador das pás ao eixo
5. Cubo do rotor
6. Pás
7. Sensores de direção e velocidade do vento



3. Gerador síncrono



Vista do interior da nacele de uma turbina eólica
(Fonte: Enercon, 2006)

Fonte: CRESEB – Tutorial Energia Eólica

Conjunto Turbina-Gerador

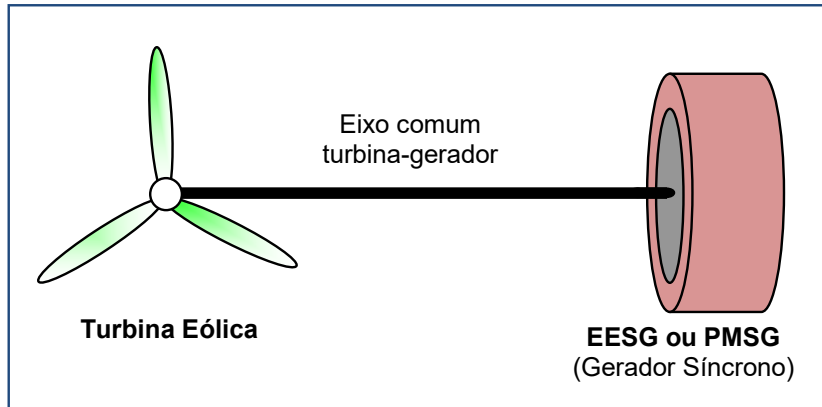


Figura 1 - Desenho esquemático para geradores síncronos.

Wobben - Impsa

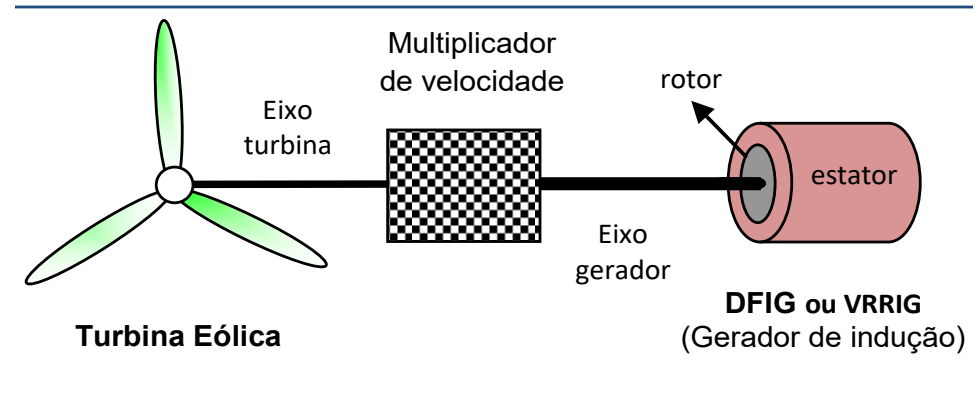


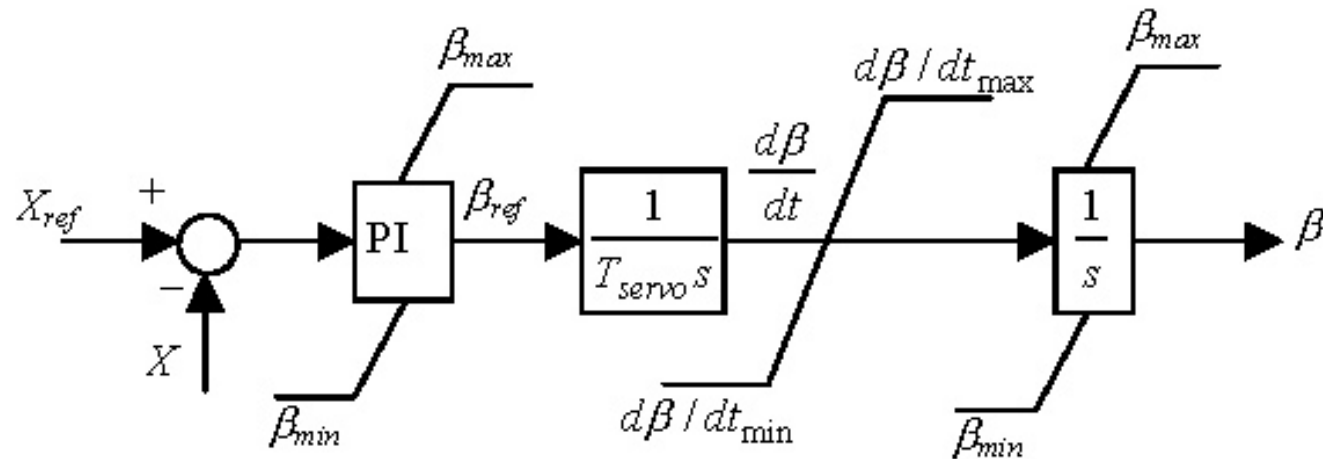
Figura 2 – Desenho esquemático para geradores de indução.

Vestas - Suzlon - Siemens - GE - Fuhrlander

**Controle de ângulo das pás e
estabilidade:**

Turbinas de velocidade fixa

Controle genérico de ângulo de passo



Xref e X podem ser:

- potência elétrica (P_e),
- velocidade do rotor (ω_r),
- uma combinação entre potência elétrica e tensão terminal (P_e/V_t^2).

Controle genérico de ângulo de passo

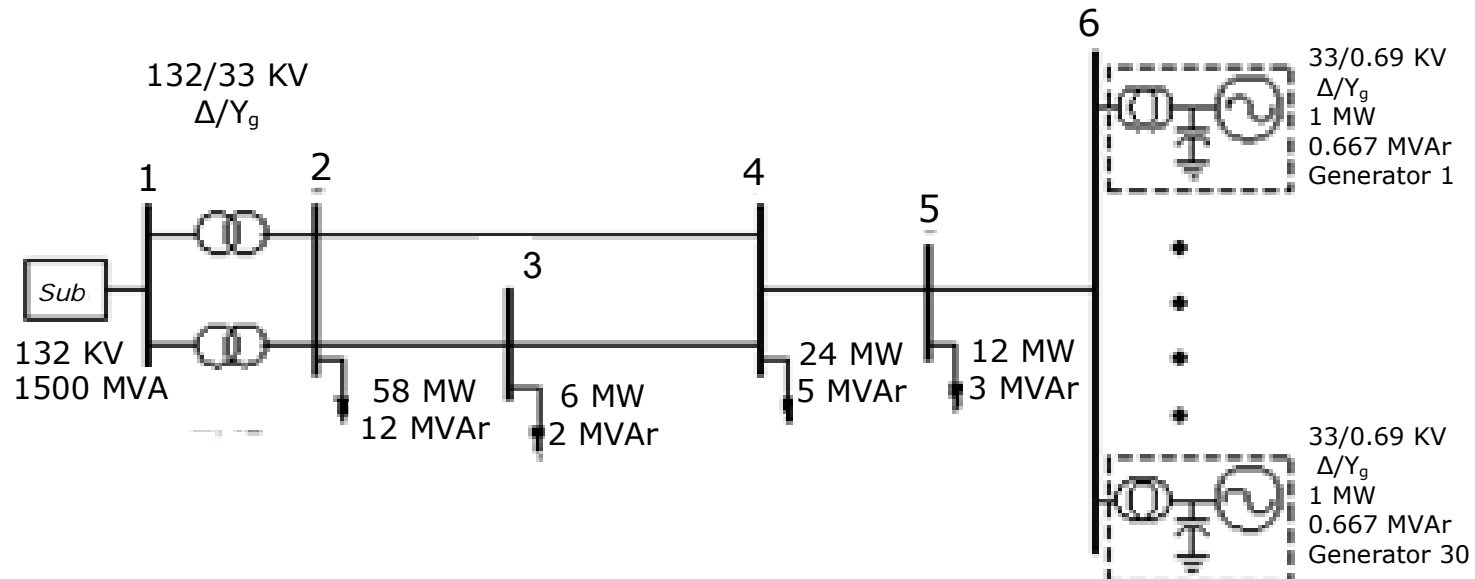


Fig. 6 Single-line diagram of the distribution network.

Controle genérico de ângulo de passo

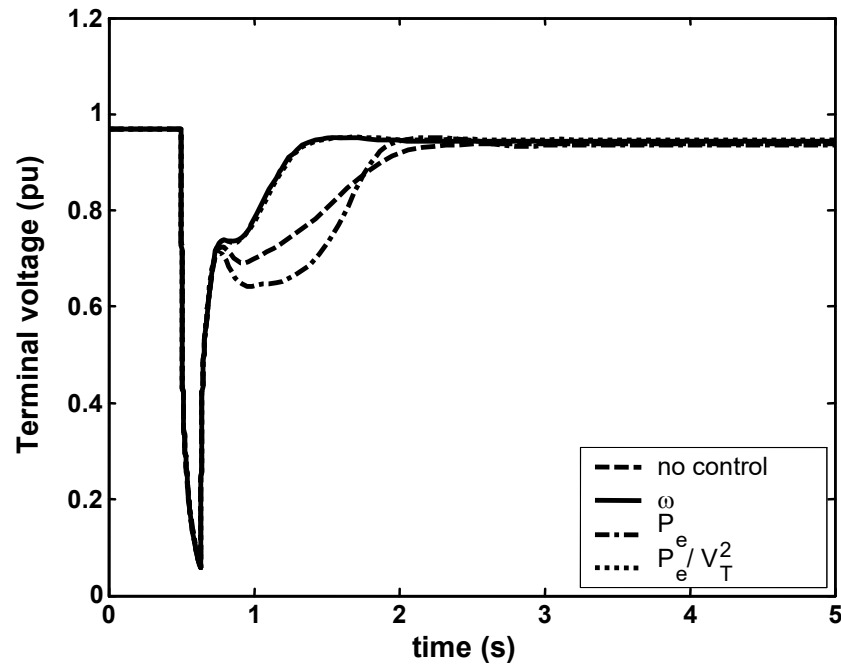


Fig. 17 Terminal voltage of SCIG for 135 ms fault.

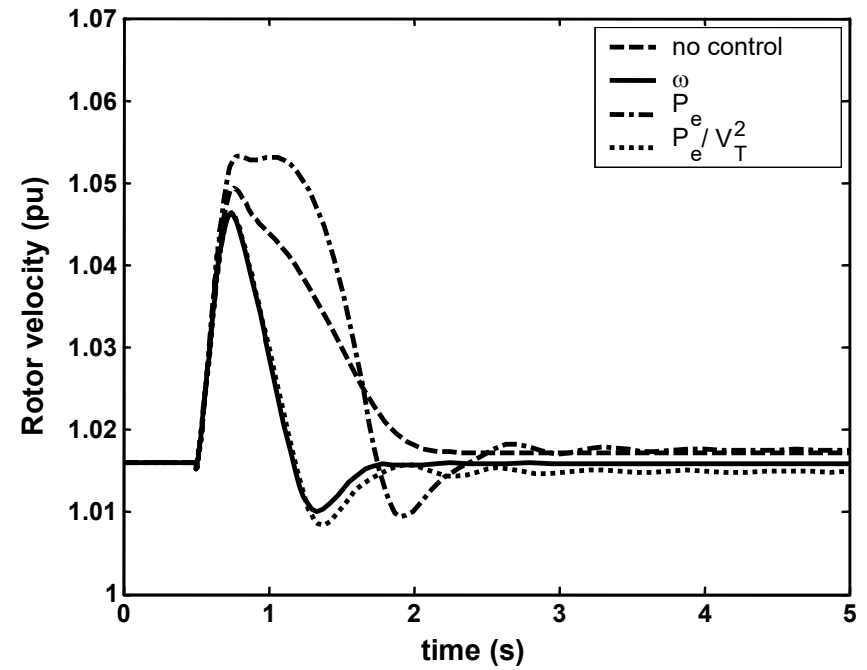


Fig. 19 Rotor velocity of SCIG for 135 ms fault.

Controle genérico de ângulo de passo

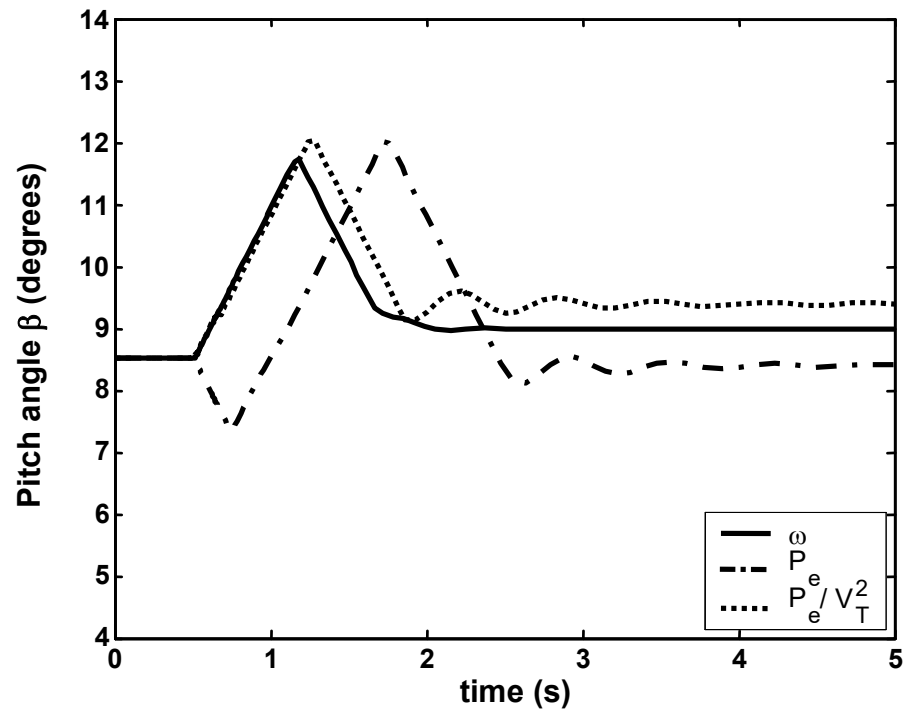


Fig. 20 Pitch angle of SCIG for 135 ms fault.

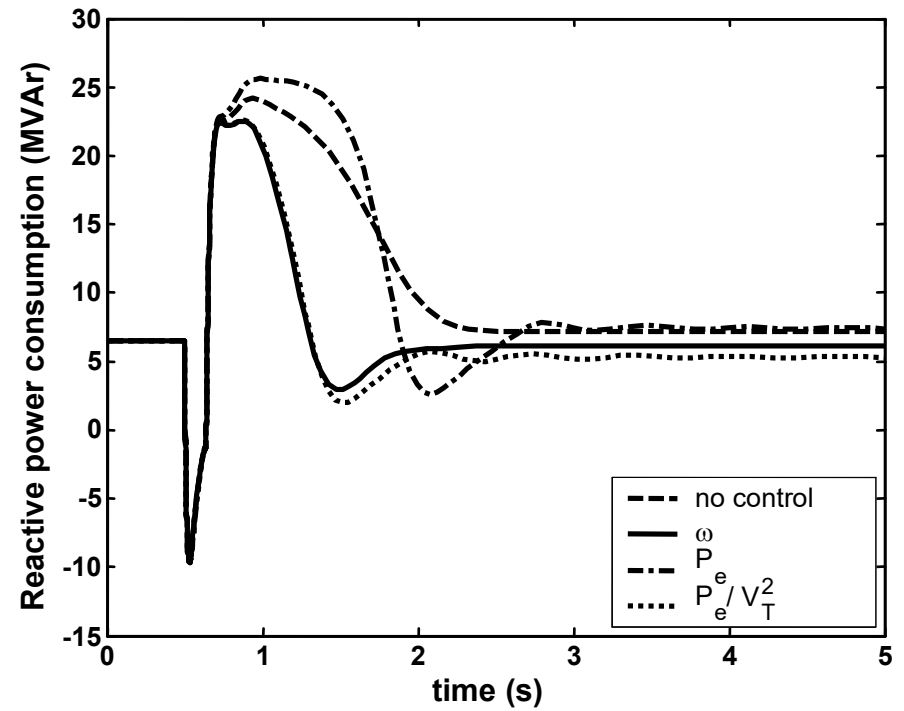


Fig. 21 Reactive power consumption of bar 6.

Diagrama elétrico: Turbinas de velocidade variável

Tipos de Conversores Eletrônicos de Potência

Conversor na potência nominal

Wobben - Impsa - Siemens

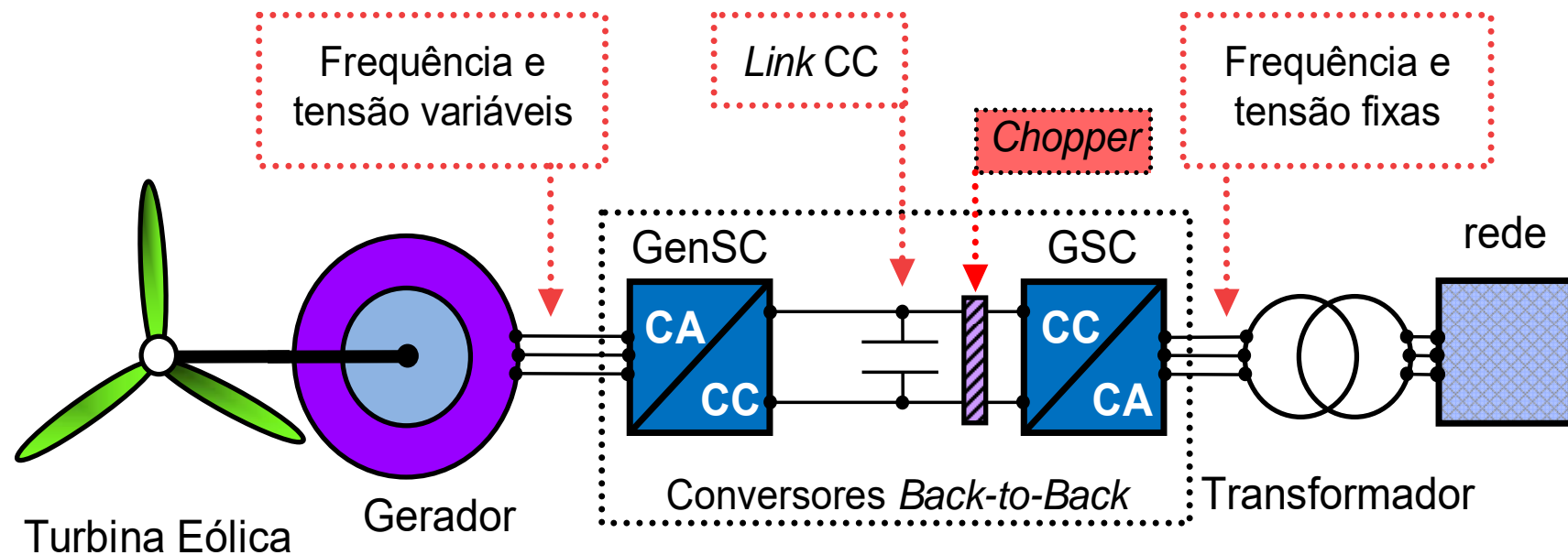


Figura 3 - Diagrama esquemático com conversor na potência nominal .

Tipos de Conversores Eletrônicos de Potência

Conversor na potência parcial

Vestas, Gamesa, Suslon, Furlander

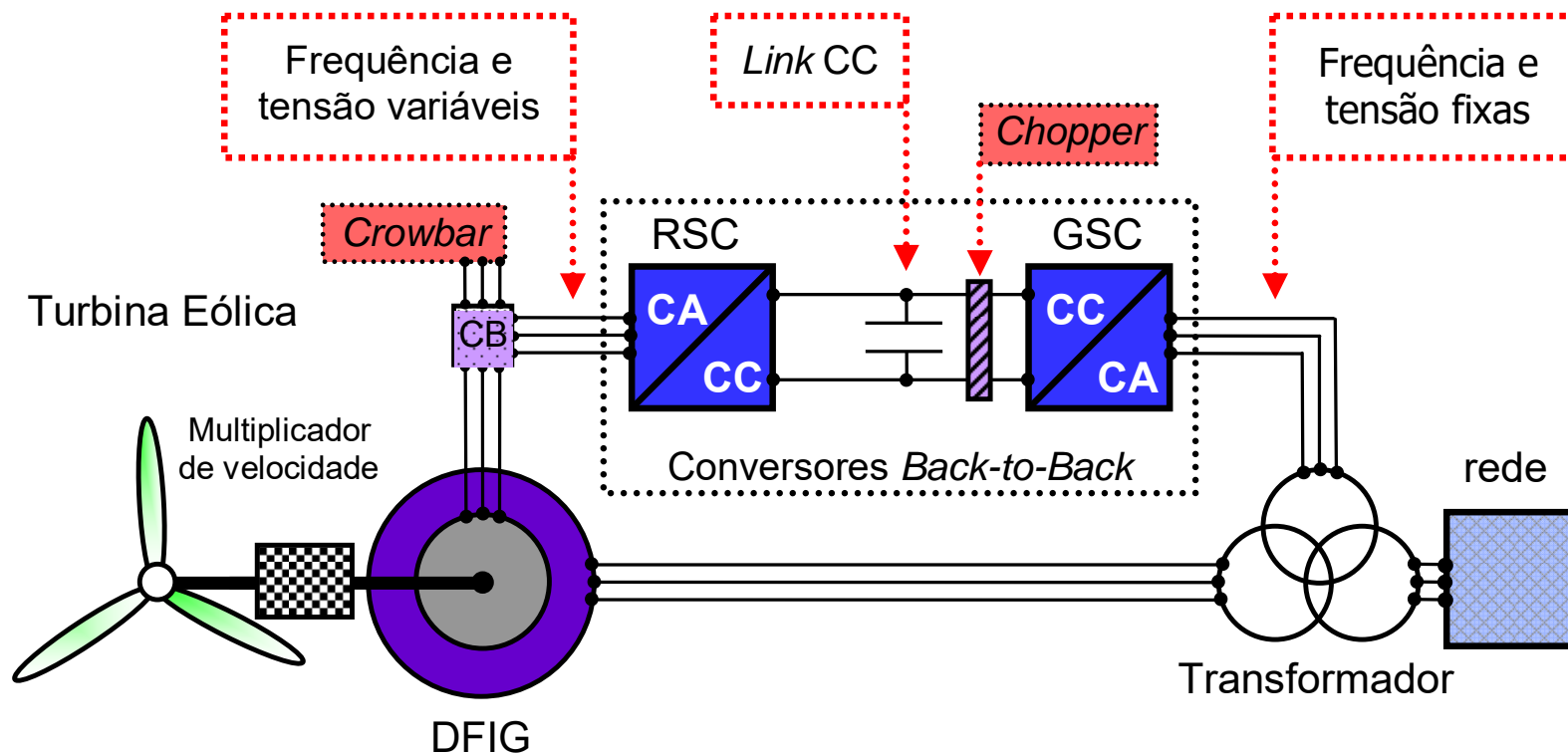


Diagrama esquemático com conversor na potência parcial .