

Tecnologias de Operação e Controle de Aerogeradores

Eng. Antonio Carlos de Barros Neiva

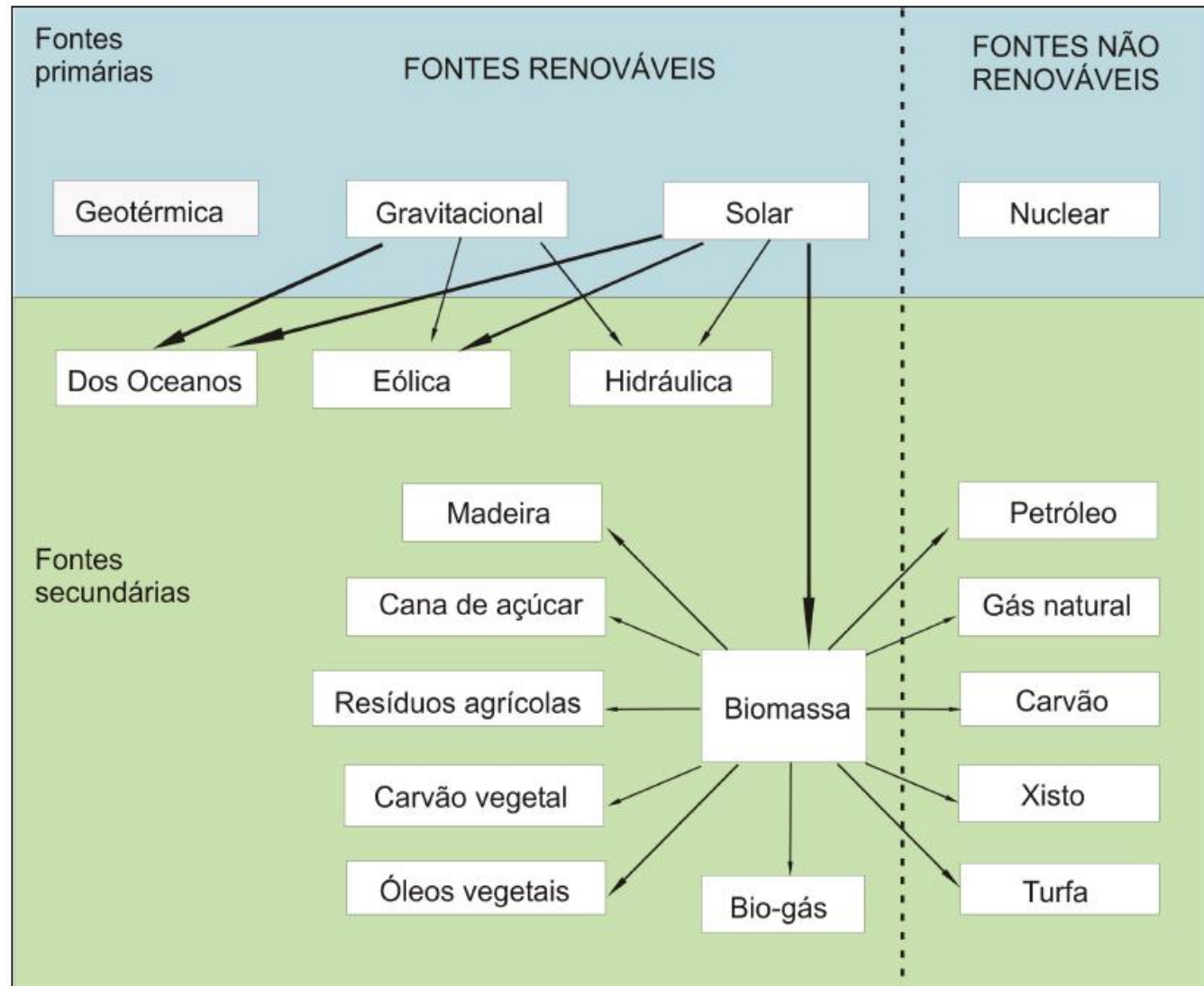
MSc., MBA

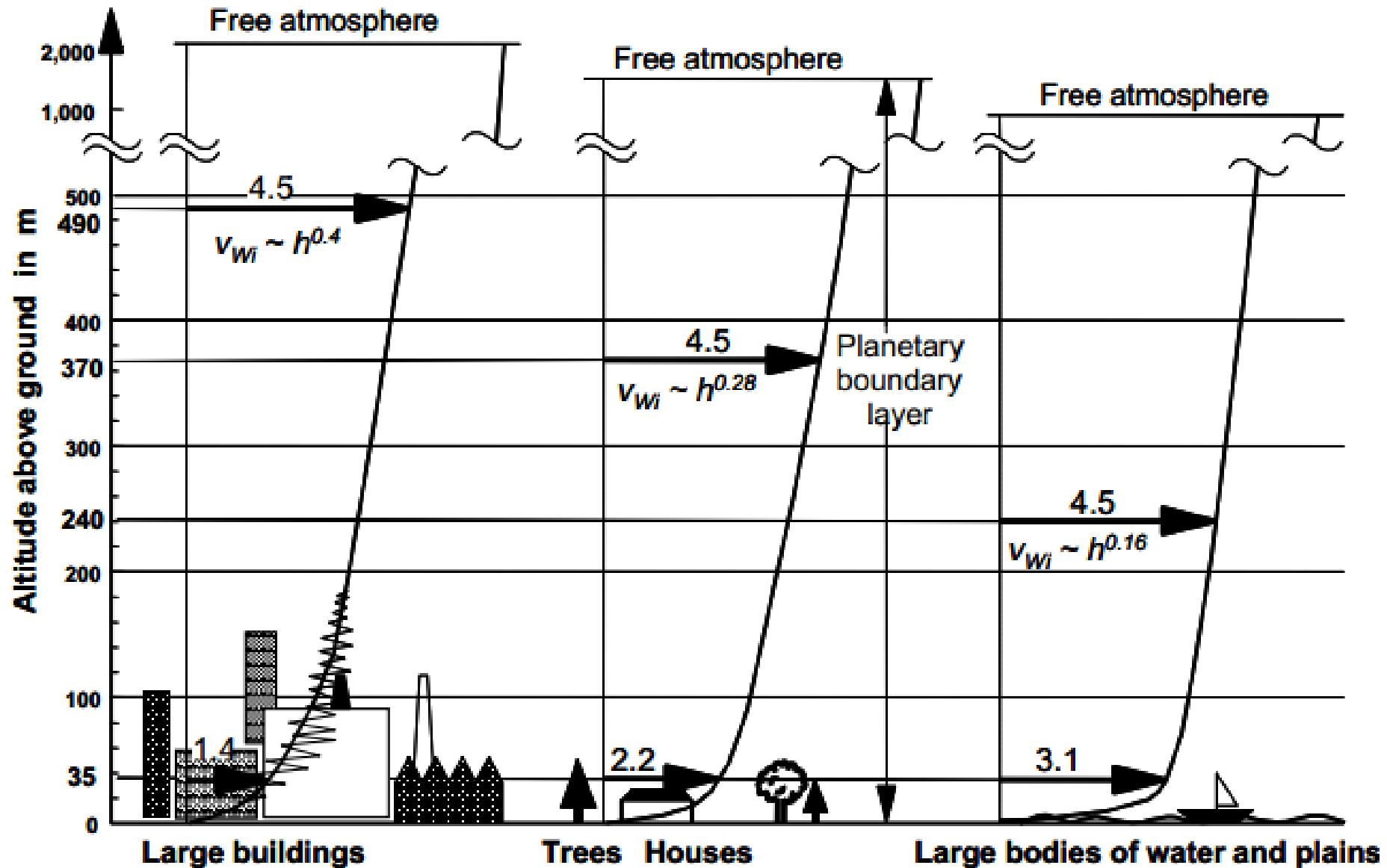
a.neiva@gmail.com

Sumário

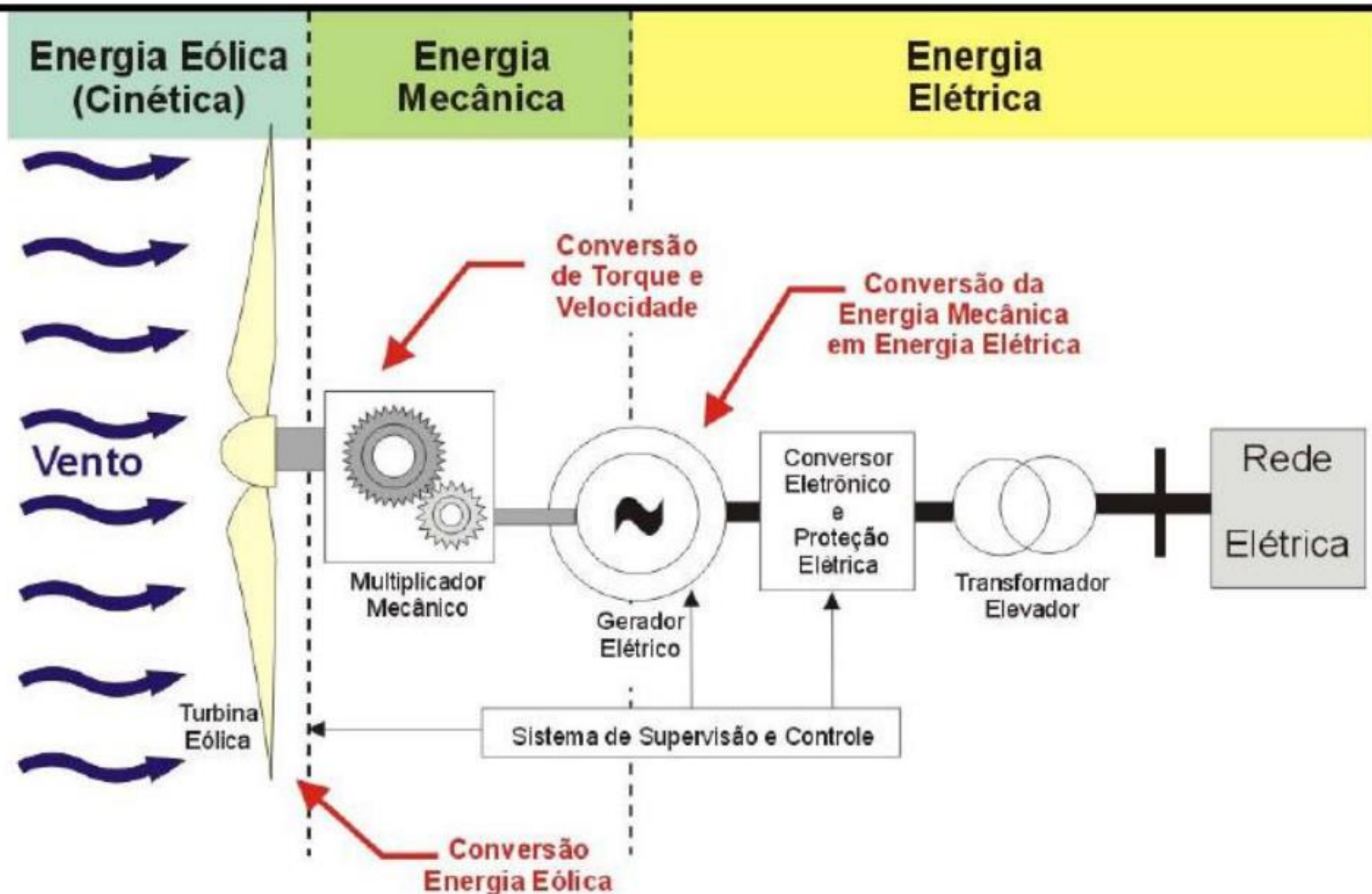
- Fundamentos de energia eólica
- Aerodinâmica aplicada
- Geradores e sistemas acessórios
- Sistemas de controle
- Aerogeradores de Pequeno porte

Diagrama de Ennio (Ignacio, 2007)

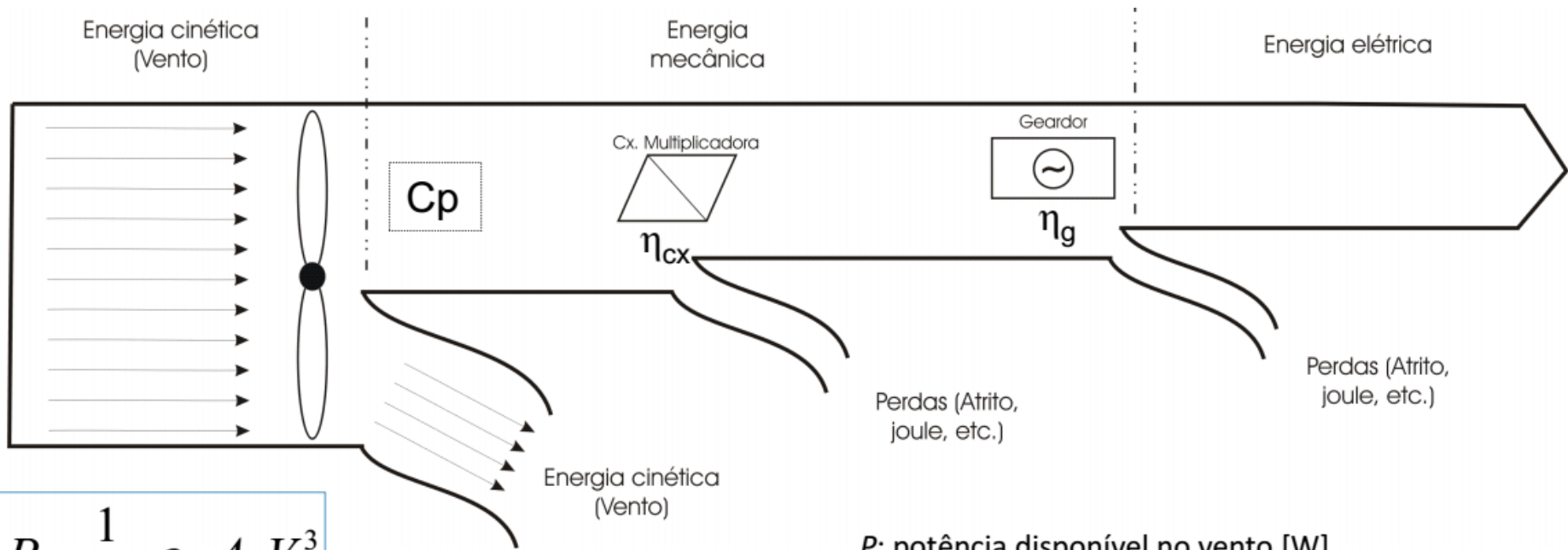




Princípio de um Aerogerador



Princípio de um Aerogerador



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

$$P_{tm\acute{a}x} = C_{p_{m\acute{a}x}} \cdot P = 0,593 \cdot P$$

$$P_e = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \cdot C_p \cdot \eta_{cx} \cdot \eta_g$$

Onde $C_p \leq C_{p_{tm\acute{a}x}}$

P : potência disponível no vento [W]

ρ : massa específica do ar [kg/m^3]

A : área da seção transversal varrida pelo rotor da turbina [m^2]

V : velocidade do vento livre antes da turbina [m/s]

$P_{tm\acute{a}x}$: potência máxima que pode ser extraída por uma turbina ideal [W]

$C_{p_{tm\acute{a}x}}$: coeficiente de Betz (0,593)

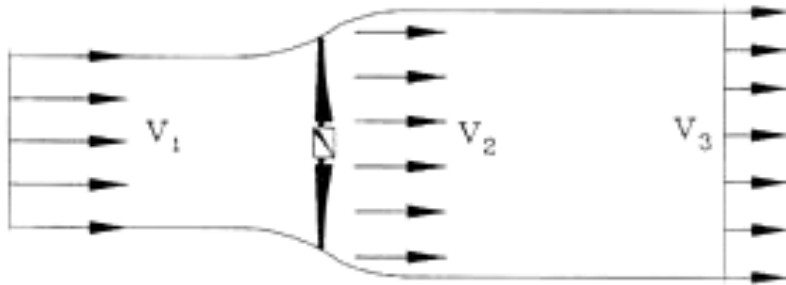
P_e : potência elétrica na saída do aerogerador [W]

C_p : coeficiente de potência da turbina

η_{cx} : eficiência da caixa multiplicadora

η_g : eficiência do gerador elétrico

Energia e Potência Extraída do Vento



$$\dot{E}_{ex} = \frac{1}{2} \dot{m}(v_1^2 - v_3^2)$$

$$\rho v_1 A_1 = \rho v_2 A_2 = \rho v_3 A_3$$

Pelo teorema de Rankine-Froude

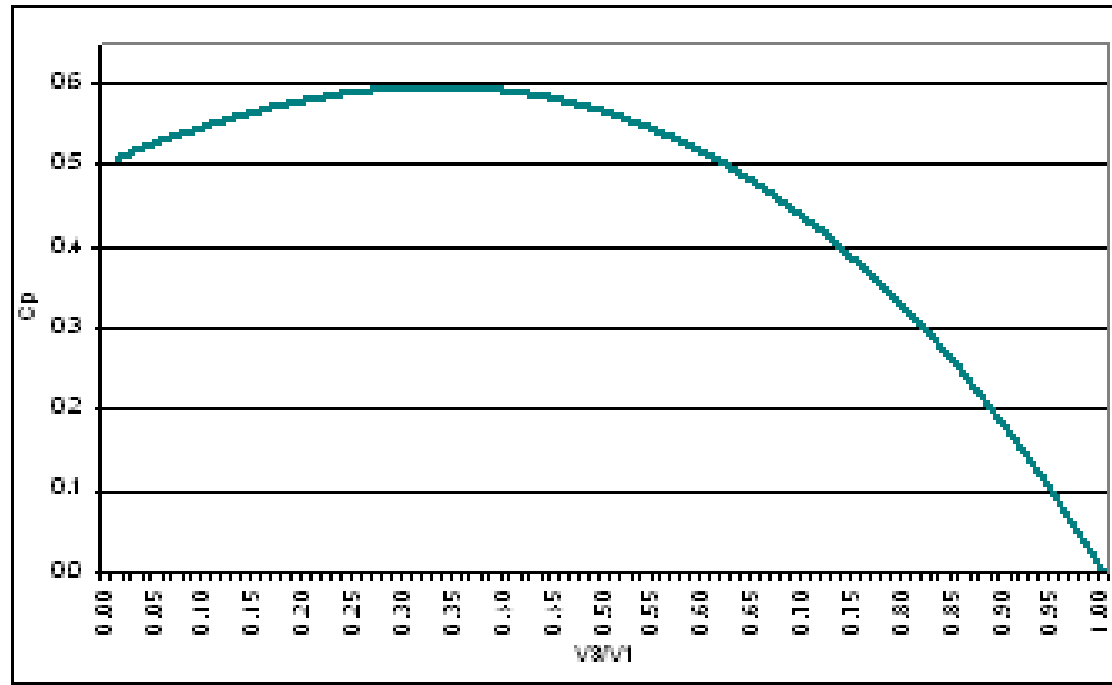
$$v_2 = \frac{v_1 + v_3}{2}$$

$$\dot{E}_{ex} = \frac{1}{2} \rho A v_1^3 \left\{ \frac{1}{2} \left[1 + \frac{v_3}{v_1} \right] \left[1 - \left(\frac{v_3}{v_1} \right)^2 \right] \right\}$$

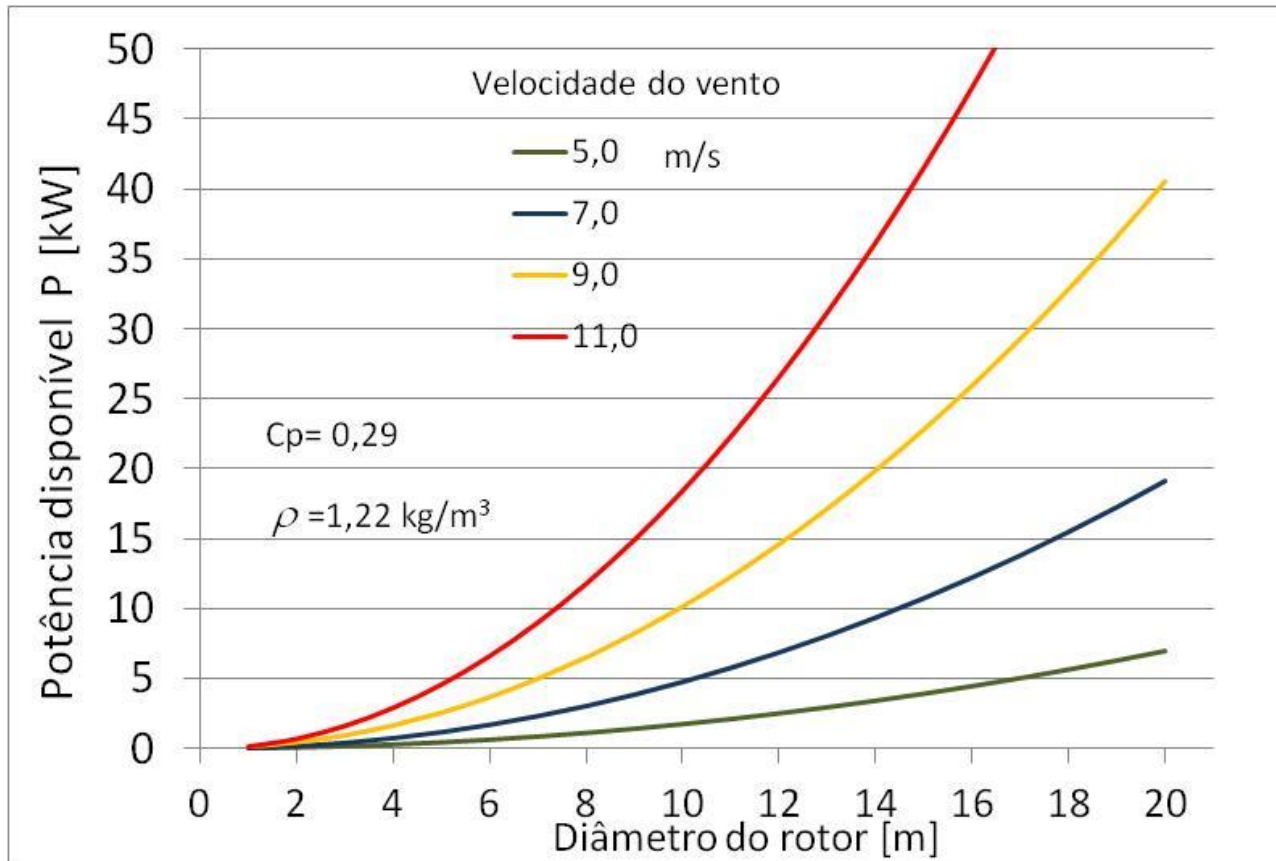
$$\text{Potência do Vento} = \frac{1}{2} \rho A v_1^3$$

$$C_p = \left\{ \frac{1}{2} \left[1 + \frac{v_3}{v_1} \right] \left[1 - \left(\frac{v_3}{v_1} \right)^2 \right] \right\}$$

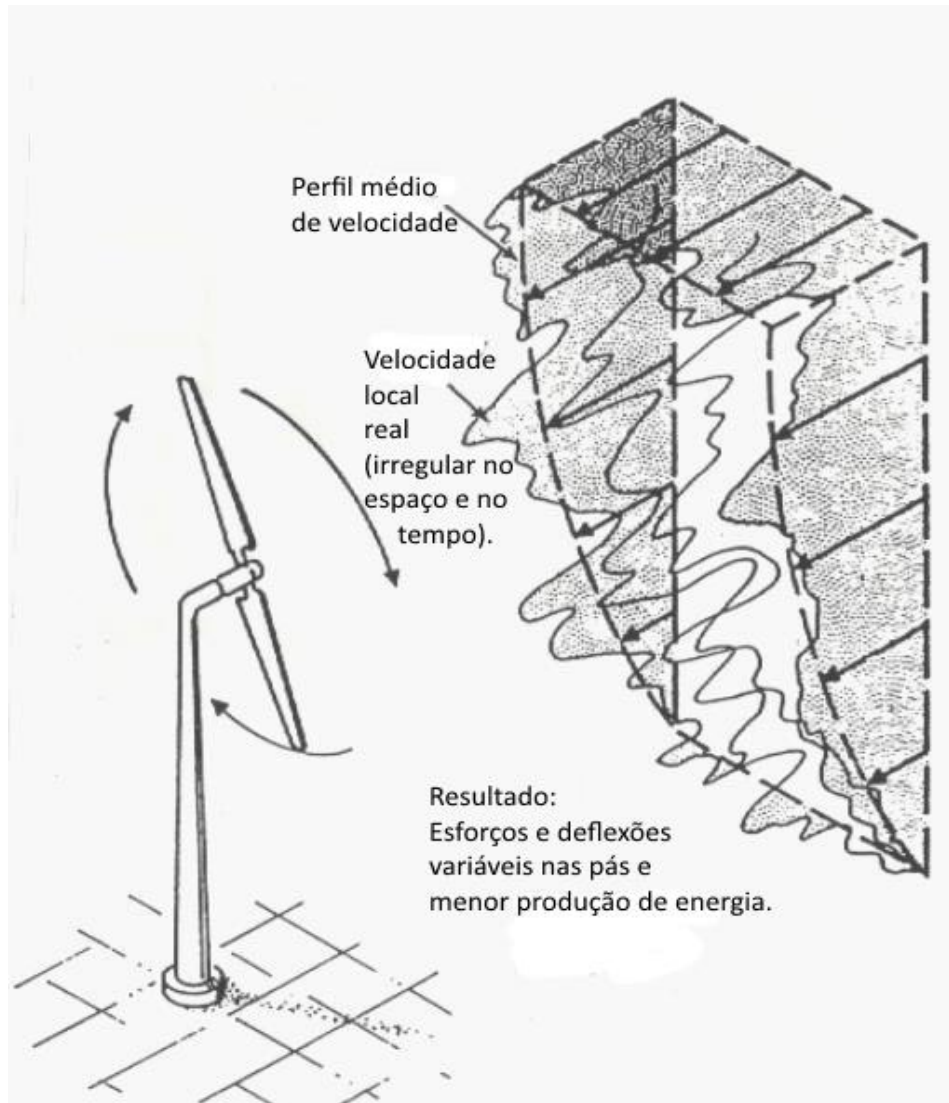
$$C_{p_{Betz}} = \frac{16}{27} = 0.59 \text{ onde } v_3/v_1 = 1/3$$



Relação entre Potência e Diâmetro para 4 velocidades de vento



Perfil de velocidade e turbulência



(Cranfield, *apud* Castro, 2003)

Variação da velocidade em função da altura

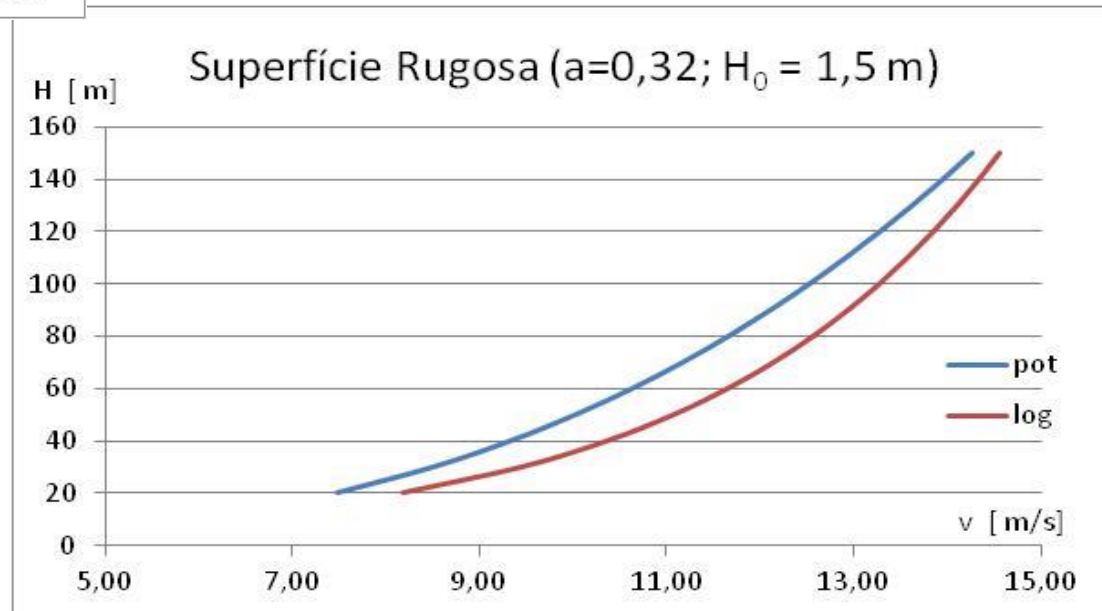
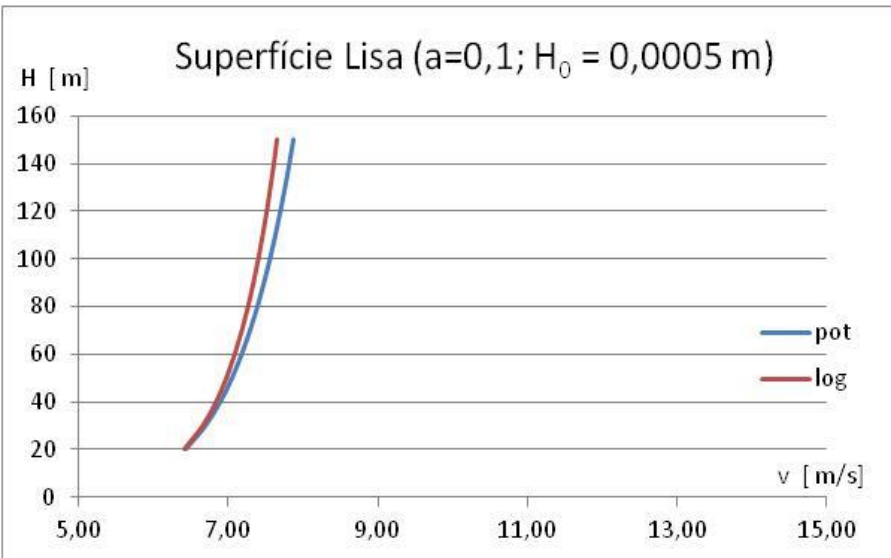
- Equação logarítmica ou potencial
- Influência da turbulência convectiva (não considerada)

$$\frac{v(H)}{v(H_r)} = \frac{\ln\left(\frac{H}{H_0}\right)}{\ln\left(\frac{H_r}{H_0}\right)}$$

$$\frac{v(H)}{v(H_r)} = \left(\frac{H}{H_r}\right)^\alpha$$

<i>Tipo de Terreno</i>	<i>H₀(m)</i>	<i>a</i>
<i>Gelo ou Lama plana</i>	10 ⁻⁵ a 3.10 ⁻⁵	
<i>Mar Calmo</i>	2. 10 ⁻⁴ a 3.10 ⁻⁴	
<i>Areia</i>	2.10 ⁻⁴ a 10 ⁻³	0,10
<i>Neve</i>	10 ⁻³ a 6.10 ⁻³	
<i>Gramma Baixa</i>	10 ⁻³ a 10 ⁻²	0,13
<i>Estepe</i>	10 ⁻² a 4.10 ⁻²	
<i>Gramma Alta</i>	4.10 ⁻² a 4.10 ⁻¹ .	0,19
<i>Floresta</i>	10 ⁻¹ a 1	
<i>Subúrbio</i>	1 a 2	0,32
<i>Cidade</i>	1 a 4	

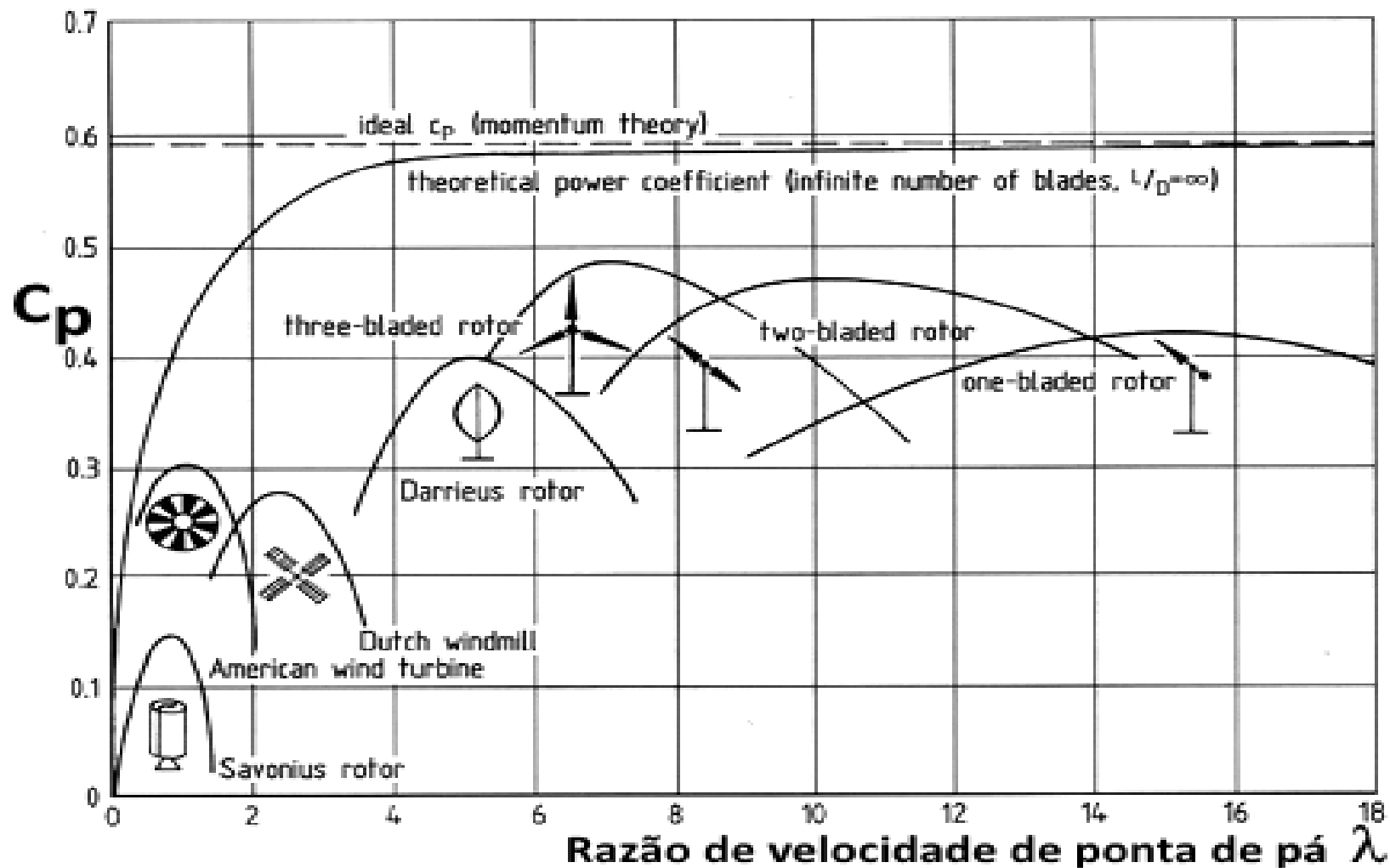
Simulações



Aerogeradores de eixo vertical



Tipos de Aerogeradores



Normas e Etiquetagem

- *International Electrotechnical Commission* Série IEC 61400 (25)
- 3 normas já foram traduzidas para o português e adotadas pela ABNT:
- ABNT NBR IEC 61400-1:2008 - Requisitos de projeto
- ABNT NBR IEC 61400-21:2010 - Medição e avaliação das características da qualidade da energia de aerogeradores conectados à rede
- ABNT NBR IEC 61400- 12-1:2012 - Medições do desempenho de potência de aerogeradores



REQUISITOS DE AVALIAÇÃO DA CONFORMIDADE PARA AEROGERADORES

- Estabelece critérios para o Programa de Avaliação da Conformidade para Aerogeradores com foco no desempenho, através do mecanismo de certificação, atendendo aos requisitos especificados nas normas técnicas IEC 61400-11 e ABNT NBR IEC 61400-12-1
- Institui no âmbito do Sistema Brasileiro de Avaliação da Conformidade – SBAC, a certificação voluntária para Aerogeradores, a qual deverá ser realizada por Organismo de Certificação de Produto – OCP, estabelecido no país e acreditado pelo Inmetro consoante os Requisitos ora aprovados.



REQUISITOS DE AVALIAÇÃO DA CONFORMIDADE PARA AEROGERADORES

- **Modelo de Certificação 4 - Ensaio de tipo seguido de verificação através de ensaio em amostras retiradas no comércio ou no fabricante (aplicável somente para aerogeradores de potência nominal até 100 kW)**
- **Modelo de Certificação 5 - Ensaio de tipo, avaliação e aprovação do Sistema de Gestão da Qualidade do fabricante, acompanhamento através de auditorias no fabricante (aplicável para aerogeradores de qualquer potência nominal).**



REQUISITOS DE AVALIAÇÃO DA CONFORMIDADE PARA AEROGERADORES

 INMETRO		ENERGIA Aerogeradores Fabricante Marca Modelo		
Mais eficiente  Menos eficiente				
Coeficiente de potência 0,XX	 72 dB	Potência nominal XX kW		
 PROGRAMA BRASILEIRO DE ETIQUETAGEM		Desempenho 		
Instruções de instalação e recomendações de uso, leia o Manual do aparelho				
2014/XYZ				

Fator de Capacidade

- Conceito aplicado a qualquer sistema de geração de energia elétrica
- No caso Eólico, depende da eficiência da máquina, do regime de ventos e de disponibilidade (paradas de manutenção)

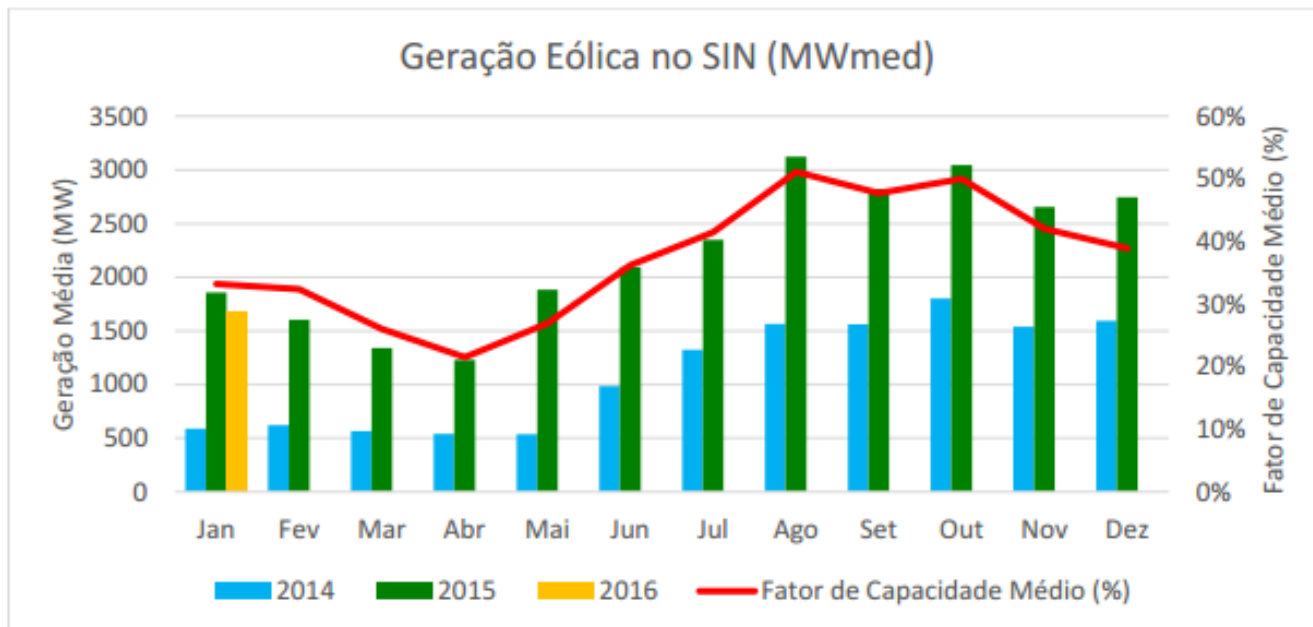
$$F_C = \frac{E_p}{P[kW] \cdot \text{horas do dia} \cdot \text{dias por ano}}$$

$$F_C = \frac{E_p}{P[kW] \cdot 24 \cdot 365} = \frac{E_p}{P[kW] \cdot 81760}$$

Fator de Capacidade

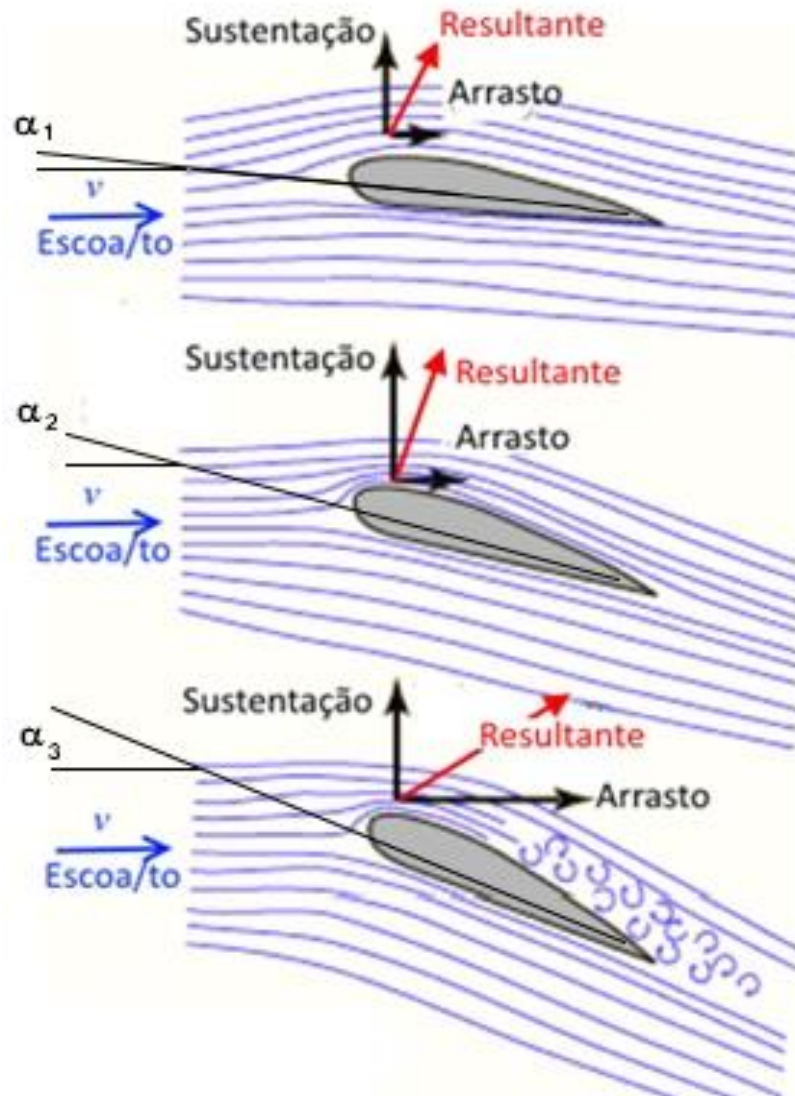
- Eólica bate novo recorde de geração e de potência instalada em 2015: $F_c=52\%$ em 09/15 e pico de geração instantânea em nov. com 10% de toda energia injetada no SIN (*Agência CanalEnergia*)

Fator de Capacidade

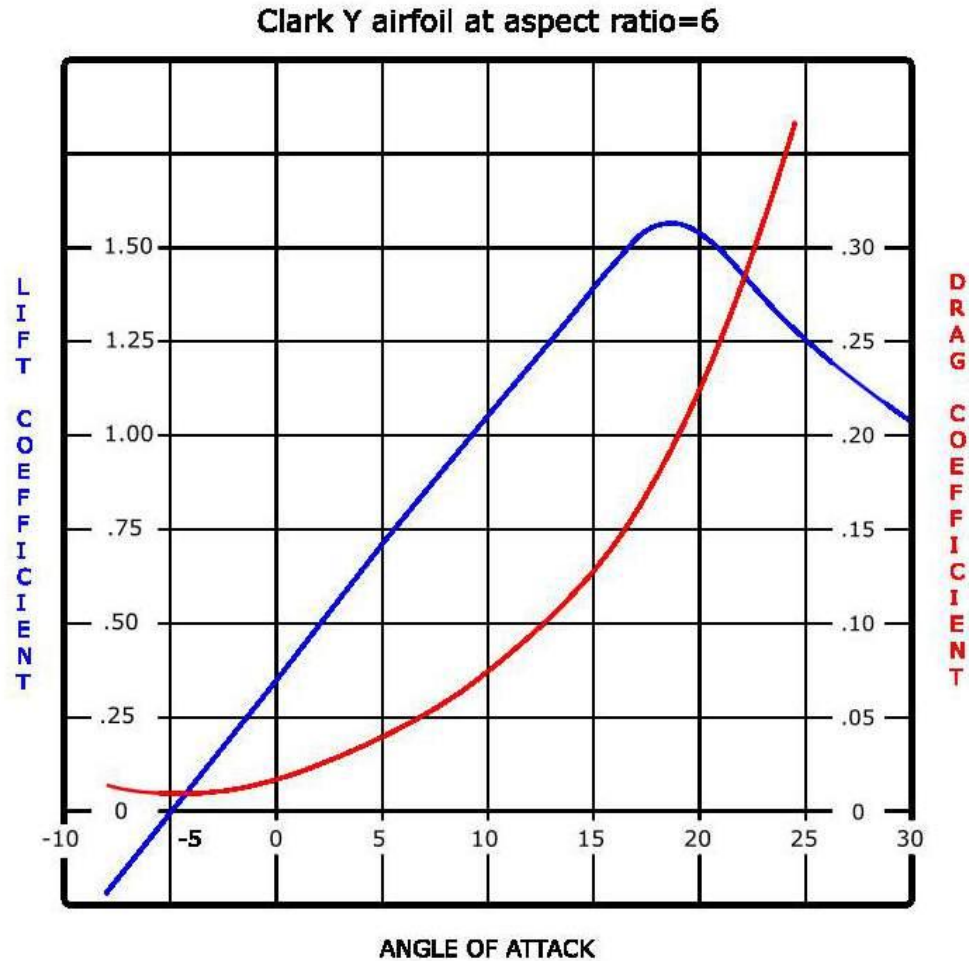


- Fundamentos de energia eólica
- **Aerodinâmica aplicada**
- Geradores e sistemas acessórios
- Sistemas de controle
- Aerogeradores de Pequeno porte

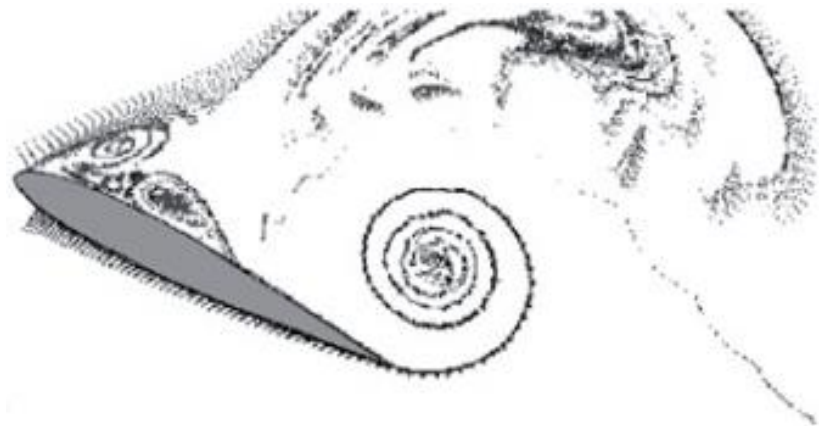
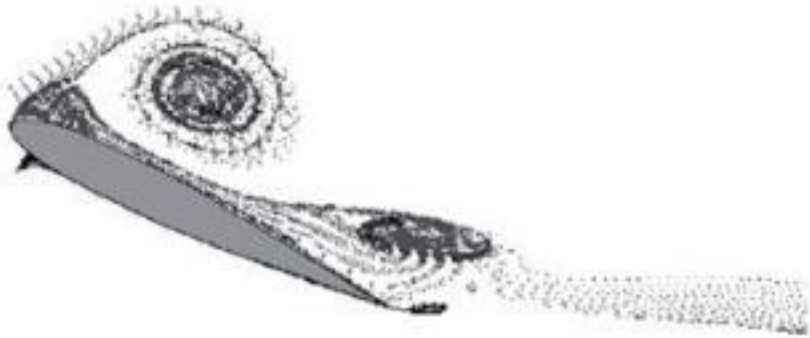
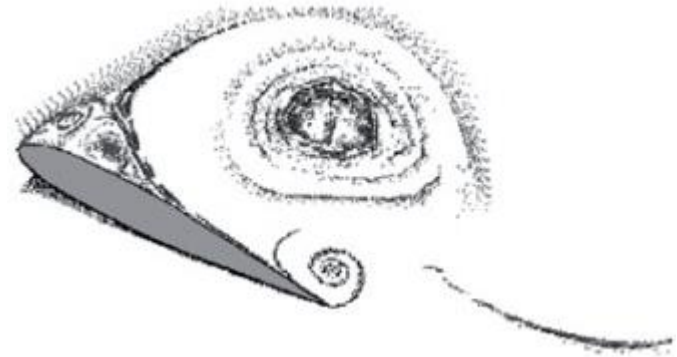
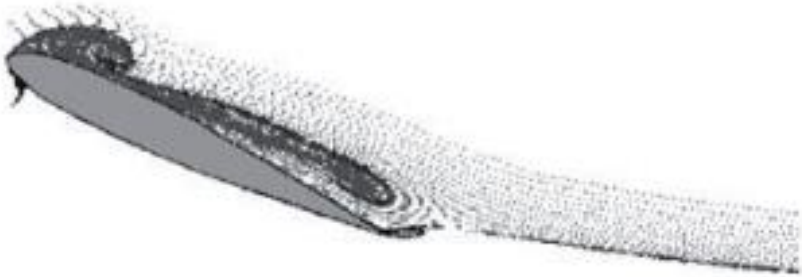
Forças de sustentação e arrasto



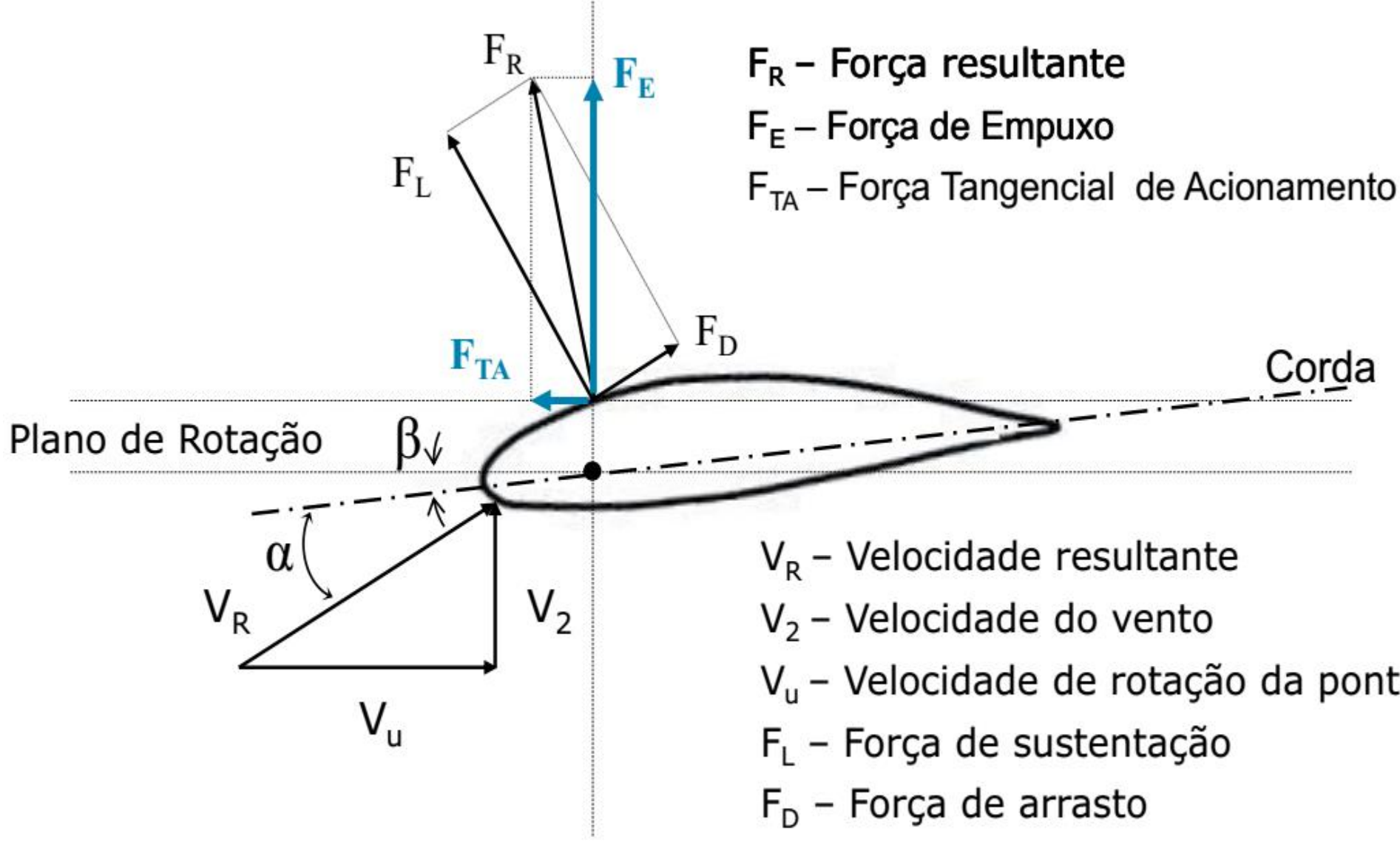
Curvas de sustentação e arrasto



Estol



• Forças aerodinâmicas atuantes na pá



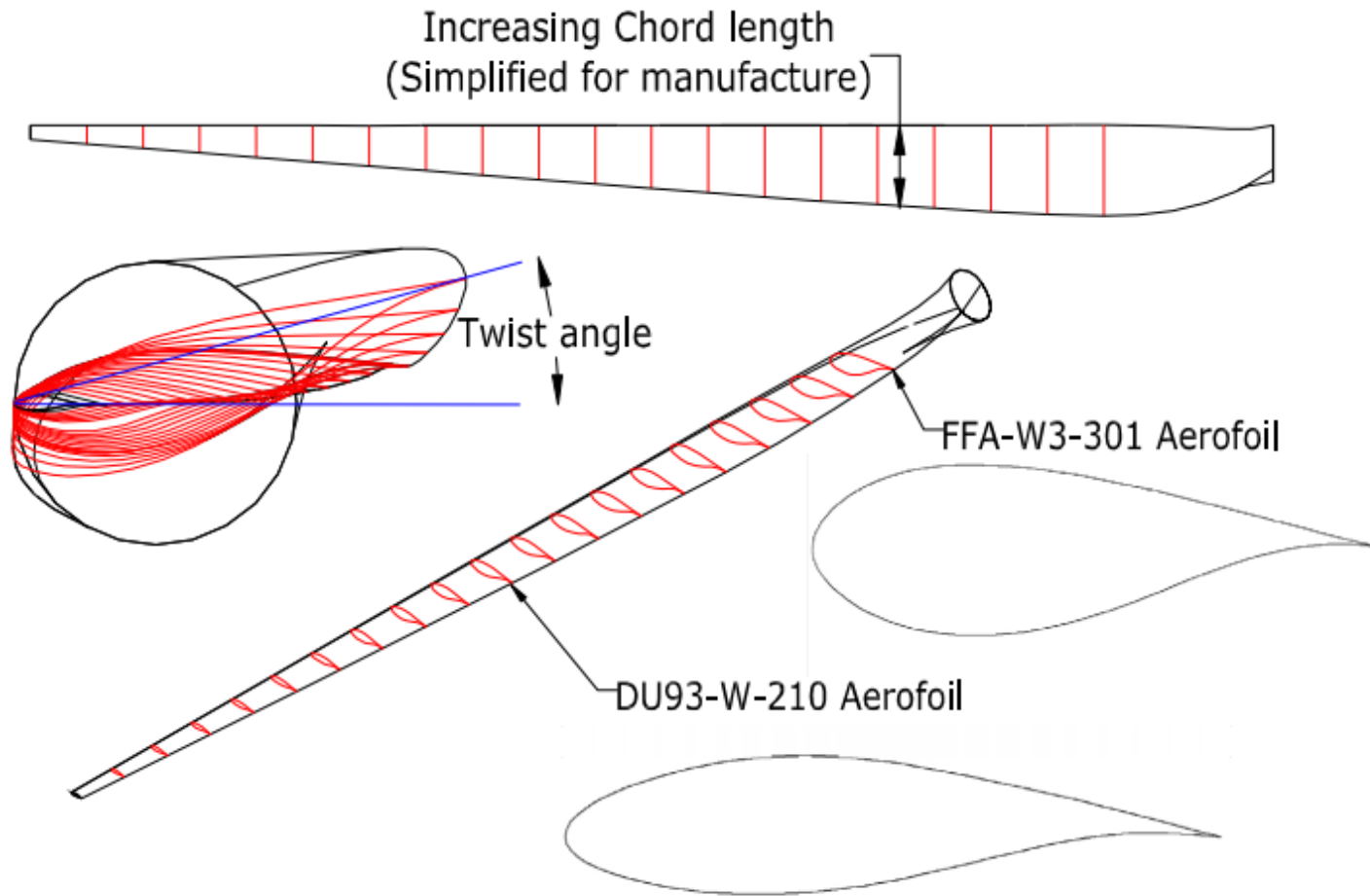
F_R – Força resultante
 F_E – Força de Empuxo
 F_{TA} – Força Tangencial de Acionamento

V_R – Velocidade resultante
 V_2 – Velocidade do vento
 V_u – Velocidade de rotação da ponta
 F_L – Força de sustentação
 F_D – Força de arrasto

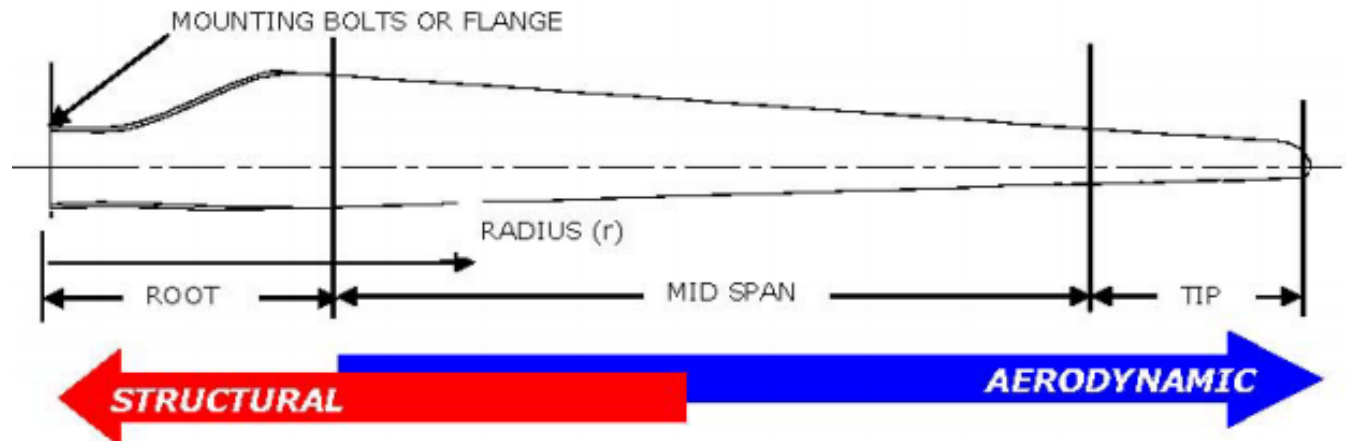
α – Ângulo de ataque

β – Ângulo de passo

Torção e perfil da pá



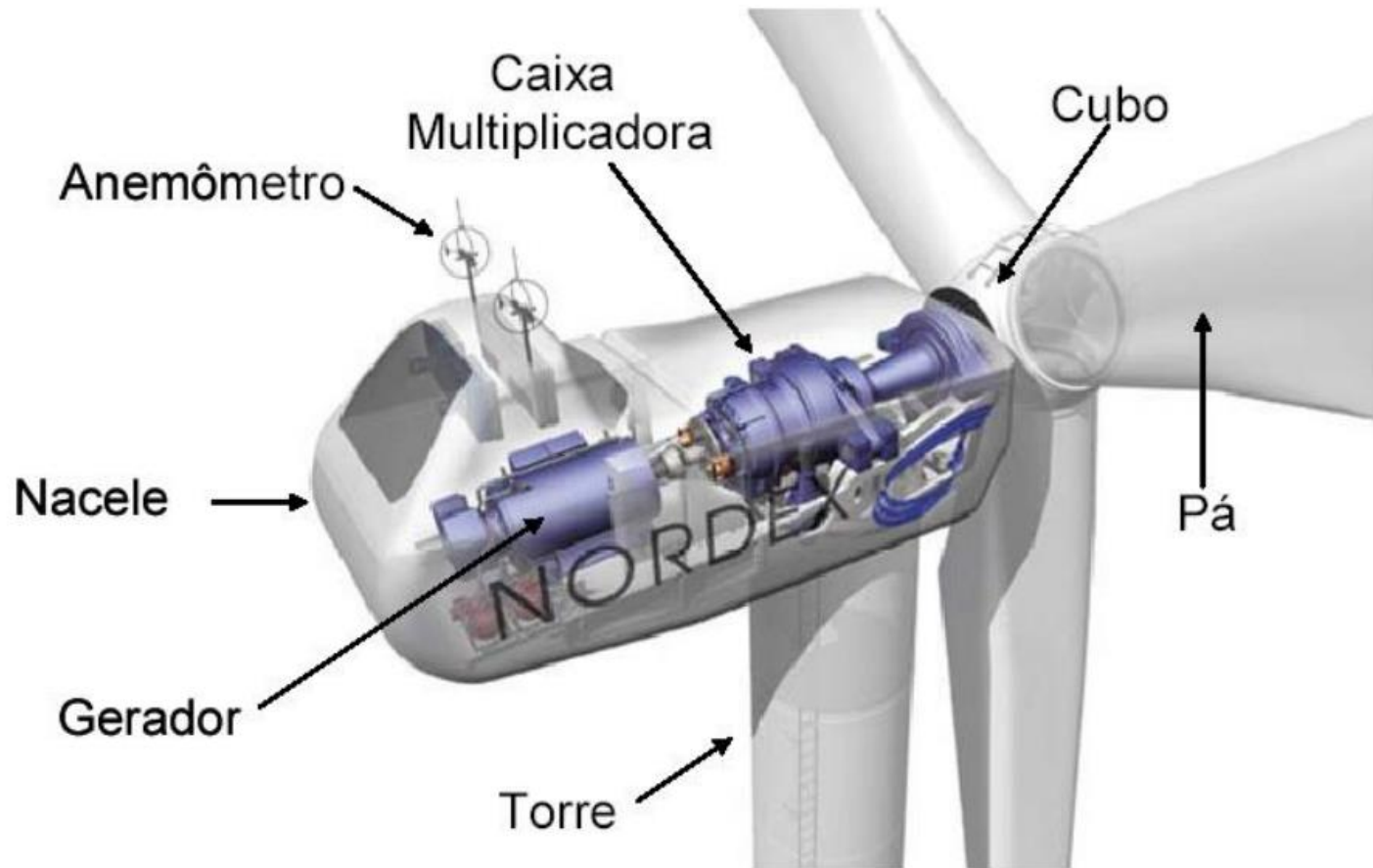
Aerodinâmica e estrutura



- Fundamentos de energia eólica
- Aerodinâmica aplicada
- **Geradores e sistemas acessórios**
- Sistemas de controle
- Aerogeradores de Pequeno porte

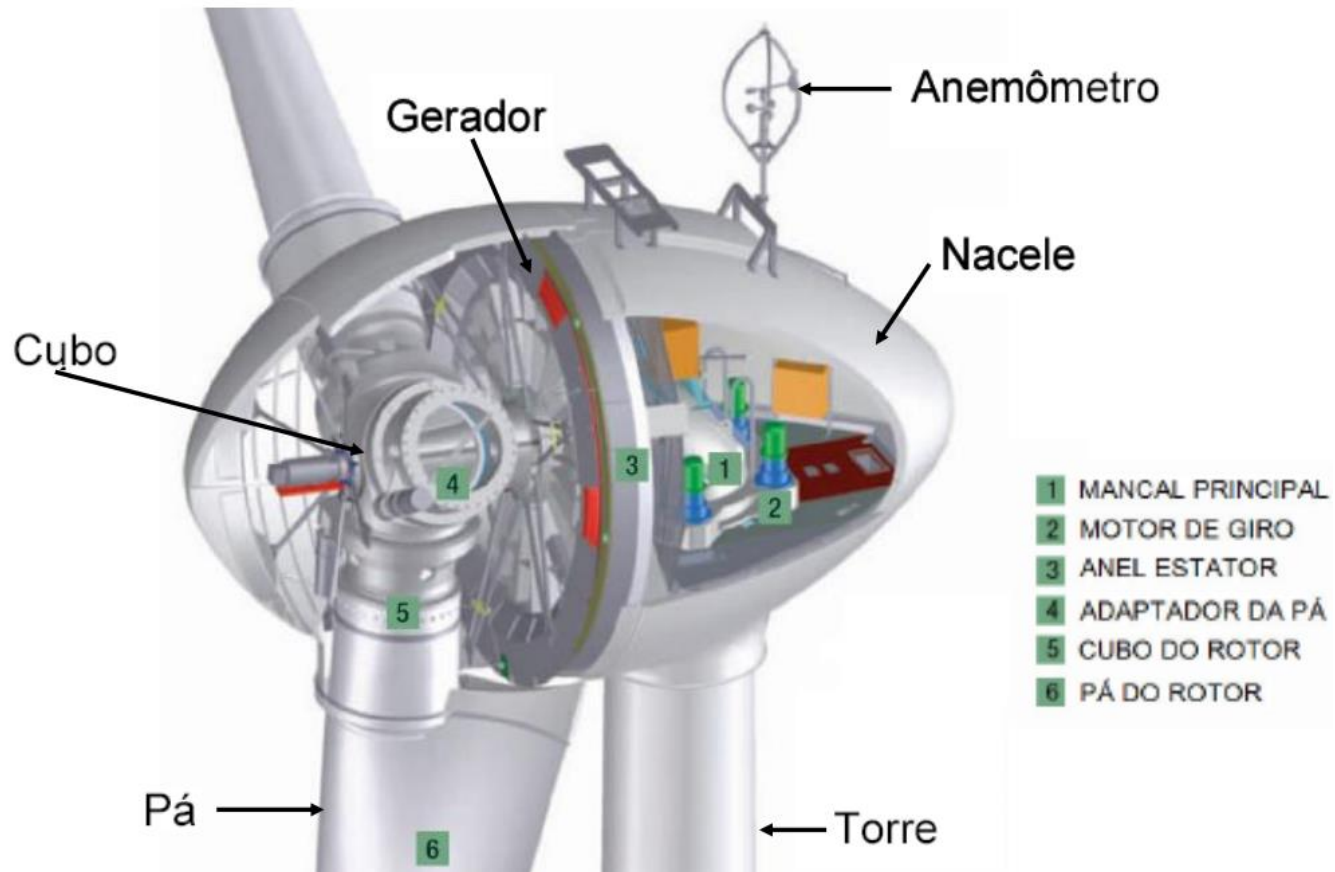
Componentes principais

Com Caixa Multiplicadora



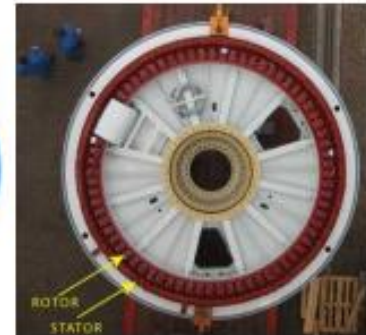
Componentes principais

Sem Caixa Multiplicadora



Geradores de energia

- **Gerador Síncrono**
- **Gerador Assíncrono ou de Indução**
 - Gaiola de Esquilo
 - Duplamente Alimentado (DFIG)



Gerador assíncrono ou de indução

- **Gerador de indução com rotor de gaiola**
 - Aerogeradores de velocidade constante
 - Menor eficiência energética
 - Simplicidade de projeto que viabilizou o desenvolvimento da geração eólica no mundo
 - Conexão sólida à rede elétrica
 - Flutuações de potência por operação contínua ou chaveada
- **Gerador de indução duplamente alimentado (DFIG – *Doubly Fed Induction Generator*)**
 - Aerogeradores de velocidade variável
 - Máxima eficiência energética
 - Tecnologia mais complexa e custo mais elevado
 - Conexão indireta com a rede elétrica por meio de conversores eletrônicos
 - Amortece variações de tensão
 - Amortecimento de transitórios mecânicos

Gerador Assíncrono

- Muito comuns na indústria eólica mundial de grande porte
- Relativamente baratos quando comparados com geradores síncronos
- Tem bobinas no rotor, e para sua excitação é necessário o uso de escovas pra transmissão da energia
- Desgaste das escovas=> manutenção, sendo esta manutenção uma desvantagem deste tipo de gerador, principalmente para sistemas de pequeno porte.

Gerador Síncrono

- **Princípios de funcionamento**

- Possui excitação própria
 - Externa: alimentação por anéis e escovas deslizante
 - Interna: colocada na ponta do eixo com retificador, sem escovas (*brushless*)
- Rotor com bobinas de campo (sapatas polares)
- Utilizado com e sem eletrônica de potência
- Utilizado com e sem caixa multiplicadora

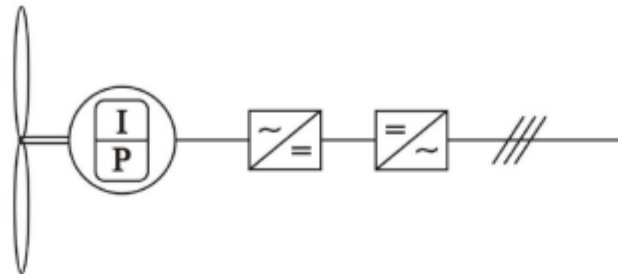
$$\omega_r = \frac{60 \cdot f}{n_{pp}}$$

ω_r - velocidade angular

f - frequência da rede

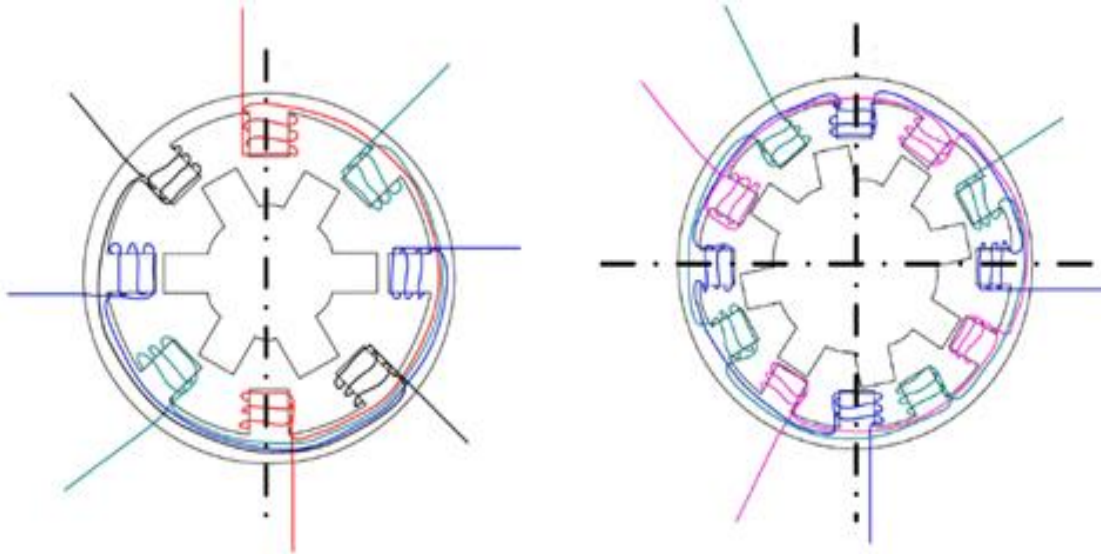
n_{pp} - nº de pares de pólos

Gerador Síncrono de ímãs permanentes



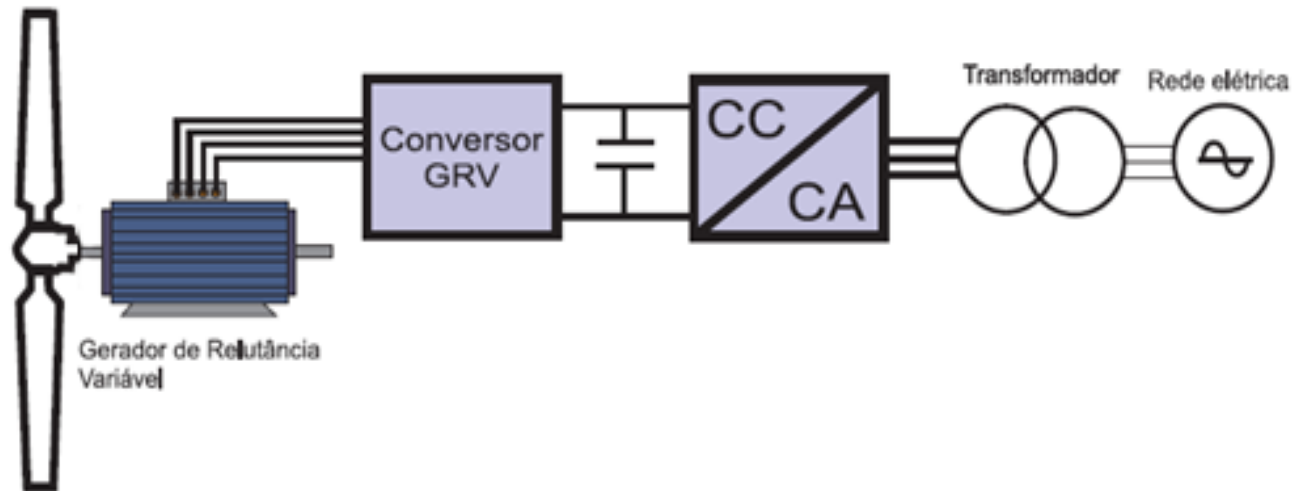
- Excitação com ímãs permanentes
- Sem caixa multiplicadora e gerador com elevado número de pólos
- Conexão por meio de inversor, com geração de harmônicos associada
- Velocidade variável
- Conexão flexível
- Os fabricante de aerogeradores GE, IMPSA e Alstom tem usado essa tecnologia em alguns modelos da classe megawatt

Gerador de relutância variável



Configurações típicas do GRV: (a) 4 fases 8/6 e (b) 3 fases 12/8

Gerador de relutância variável

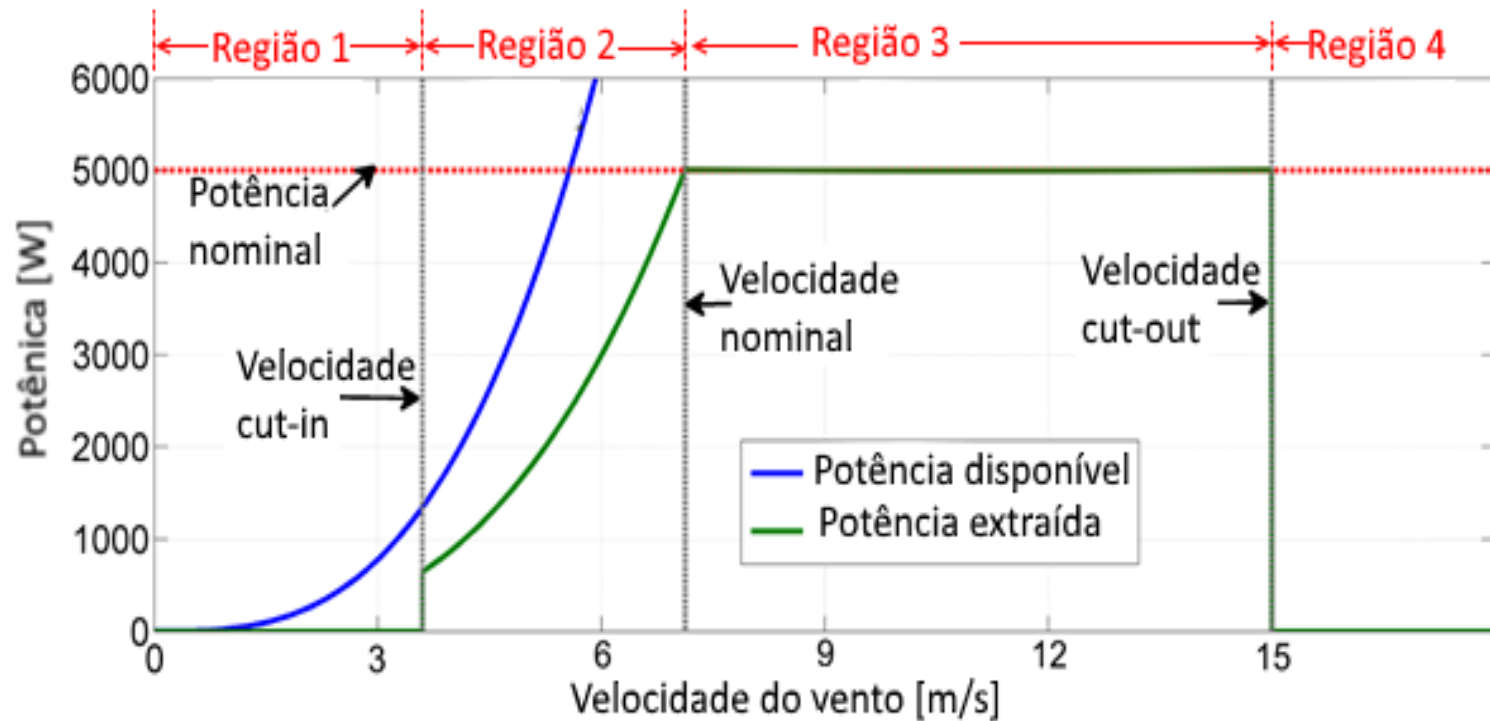


Caixas de engrenagens



- Fundamentos de energia eólica
- Aerodinâmica aplicada
- Geradores e sistemas acessórios
- **Sistemas de controle**
- Aerogeradores de Pequeno porte

Sistemas de controle



Objetivos do sistema de controle

- Otimizar potencia gerada através do controle de rotação e do controle de passo;
- Garantir a segurança, principalmente em função de fatores meteorológicos adversos – Ventos extremos – possível causador de sobrevelocidade;
- Garantir a qualidade da energia gerada (frequência e voltagem)
- Procedimentos de partida e parada do equipamento;
- Torção dos cabos que se conectam à nacele;
- Alinhamento do rotor ao vento incidente.

Controle da rotação

- **Velocidade Constante**

- Gerador diretamente conectado à rede
- $\lambda \neq$ Constante
- Menor custo

- **Velocidade Variável**

- Gerador desacoplado eletricamente da rede
- $\lambda \approx$ Constante
- Controle mais complexo

$$\lambda = \frac{\omega \cdot R}{V}$$

λ – razão de velocidade de ponta

ω – velocidade angular da pá da turbina [rad/s]

R – raio do rotor da turbina [m]

V – velocidade do vento incidente na turbina [m/s]

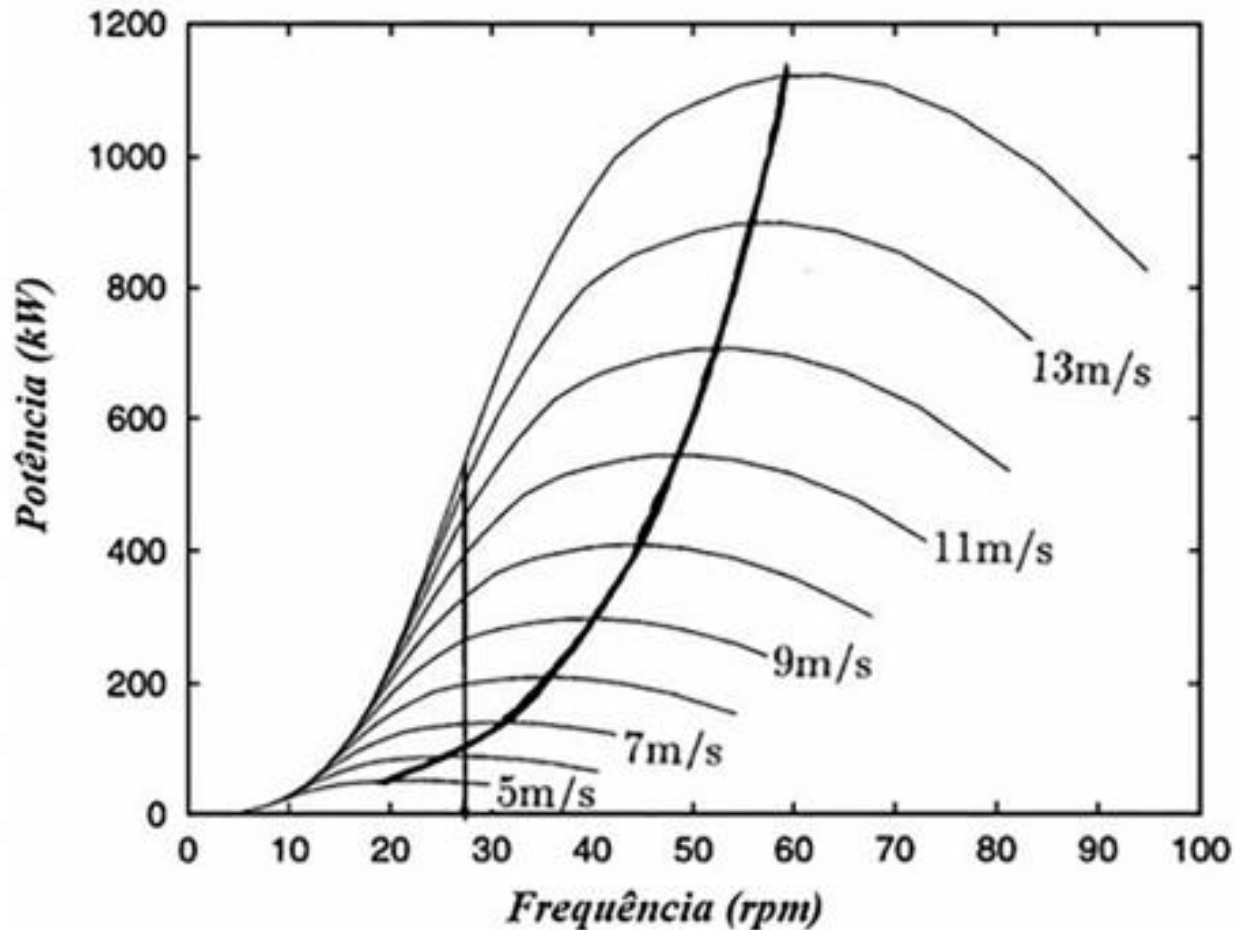
Rotação constante

- $\lambda \neq$ constante, o coeficiente de potência (C_p) é máximo para uma velocidade de vento
- Gerador síncrono = Vel. Cte (pequeno porte)
- Gerador de Indução \approx Vel. Cte
 - Duplamente alimentado
 - Variação do número de pólos (dois estágios)
- Dois geradores
- Controle por *Estol*
- Operação mais simples, a regulação da velocidade do rotor é feita pela rede elétrica
- Projetos de custo mais baixo
- Apresenta flutuação na potência de saída

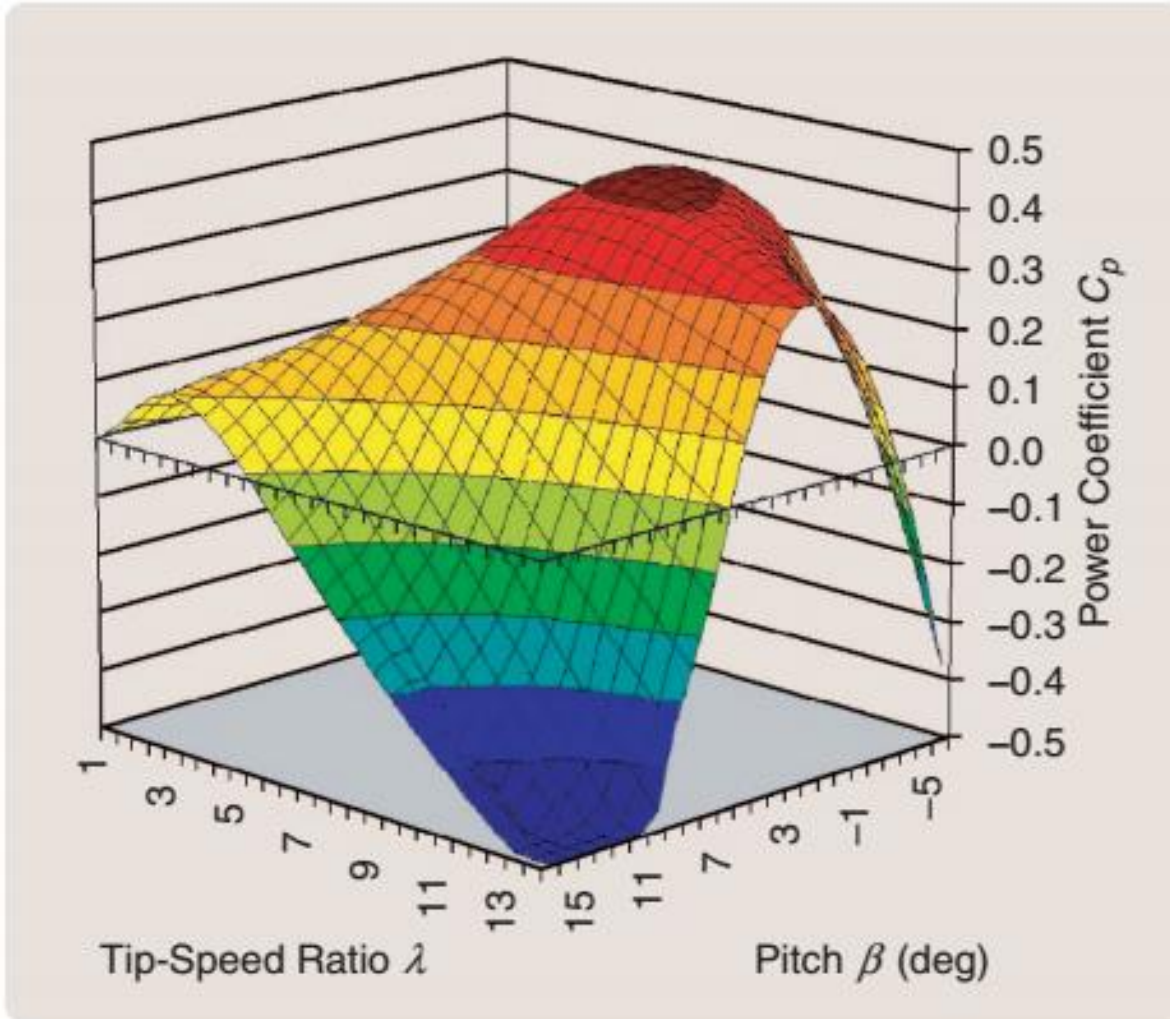
Rotação variável

- $\lambda \approx$ constante, para diversas velocidades do vento, otimiza o desempenho aerodinâmico da turbina sempre procurando C_p máximo em função da condição do vento
- Velocidade varia entre 40% e 100% da nominal
- Controle de passo
- Gerador de indução duplamente alimentado
- Gerador síncrono (multipólos)
- Maior extração de energia
- Flutuação de potência pequena em relação a nominal
- Menor carga no rotor devido a rajadas de vento
- Ruído reduzido

Curvas para otimizar rotação MPPT



Curvas para otimizar rotação MPPT



- Controle de passo e rotação

Controle de passo da pá

- É um sistema de controle ativo, que precisa de um sinal do gerador de potência
- Quando a potência nominal do gerador é ultrapassada, as pás do rotor são giradas em torno do seu eixo longitudinal, mudando o ângulo de passo e assim reduzindo as forças aerodinâmicas atuantes

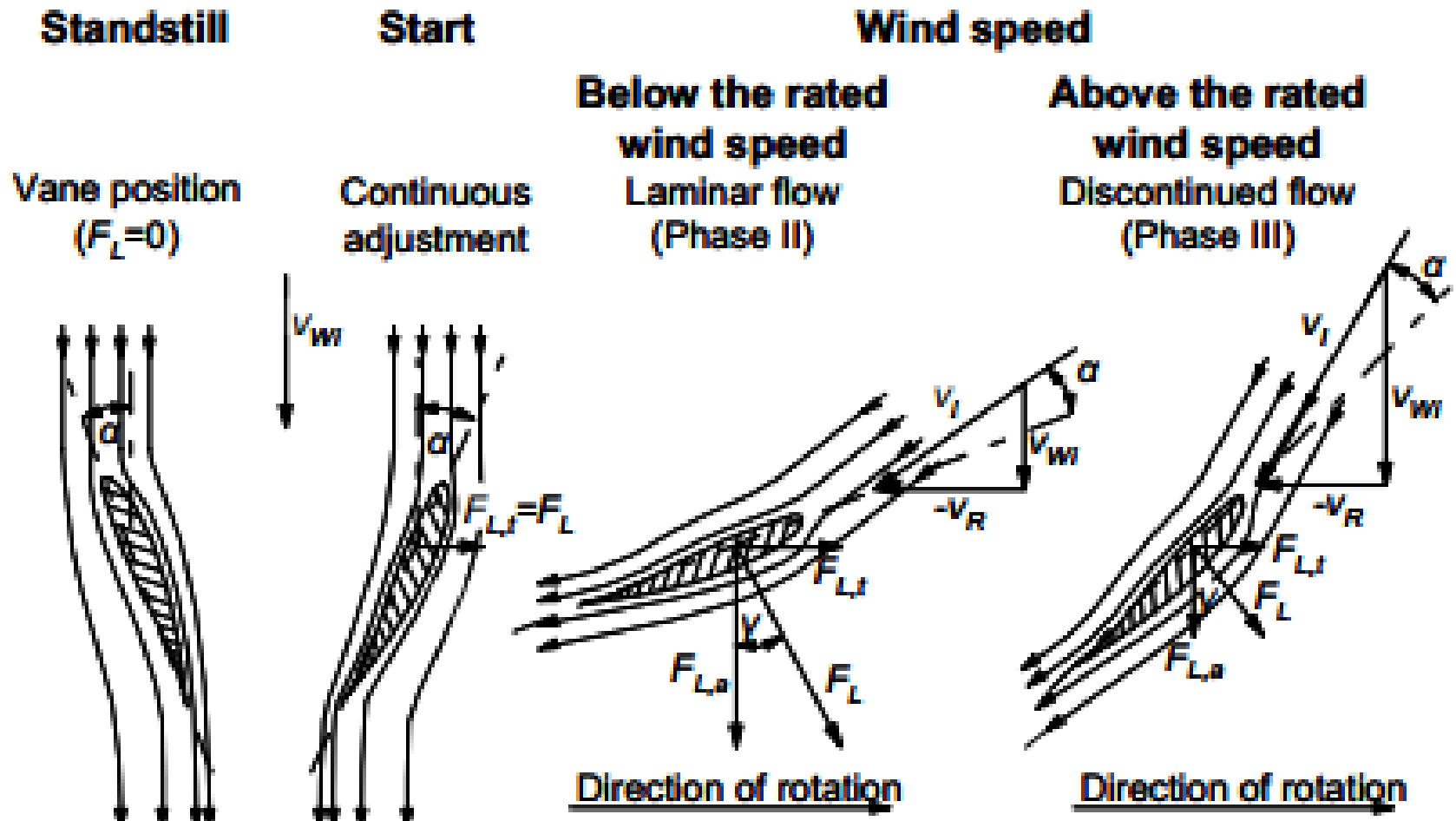
Controle de passo da pá
com um único atuador



Controle de passo da pá
com atuador individual

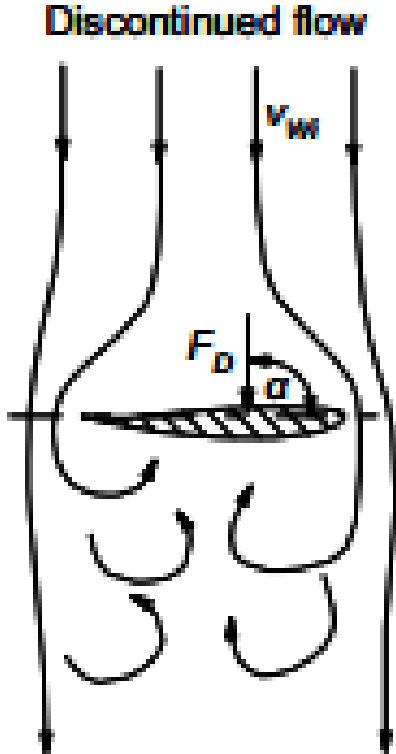


Controle de passo



Controle por estol – passo fixo

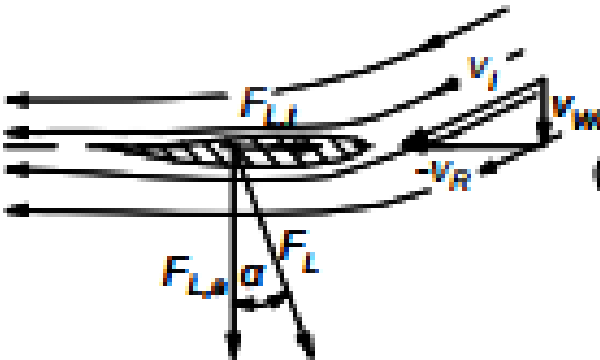
Standstill



Wind speed

Below the rated wind speed

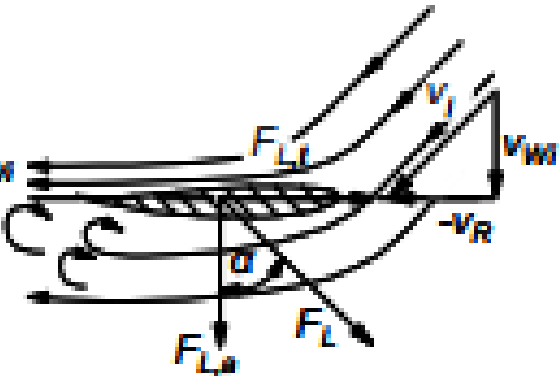
Laminar flow (Phase II)



Direction of rotation

Above the rated wind speed

Discontinued flow (Phase III)



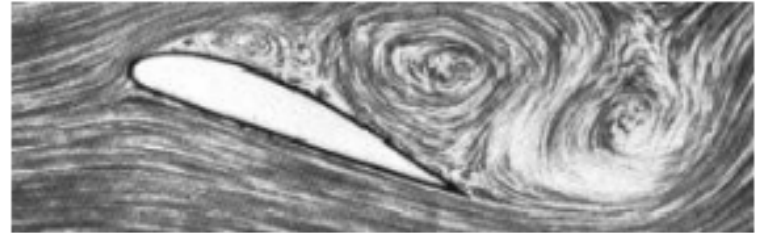
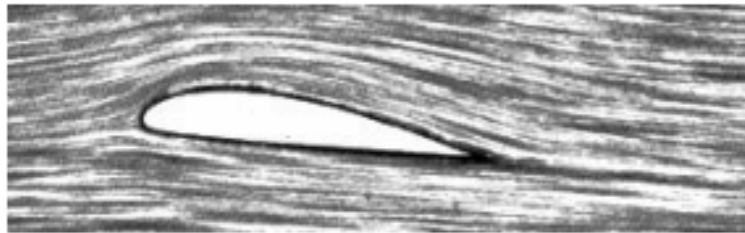
Direction of rotation

Controle de Estol

- Vantagens:
 - Aerogerador mais simples devido à inexistência de sistema de controle de passo
 - Estrutura de cubo do rotor simples
 - Manutenção reduzida devido ao menor número de peças móveis
 - Menor custo
- Desvantagem:
 - Redução da potência fornecida pelo gerador após a velocidade nominal
 - Maior complexidade do projeto aerodinâmico da pá

Controle de estol ativo

- Possui um sistema de variação de passo, ou seja, as pás giram em torno do seu eixo longitudinal
- Quando a potência nominal do aerogerador é ultrapassada, o controlador muda o ângulo de passo da pá na direção contrária do controle de passo, ou seja, aumenta o ângulo de ataque para provocar o estol e assim gerar perda de eficiência aerodinâmica



Controle de estol ativo

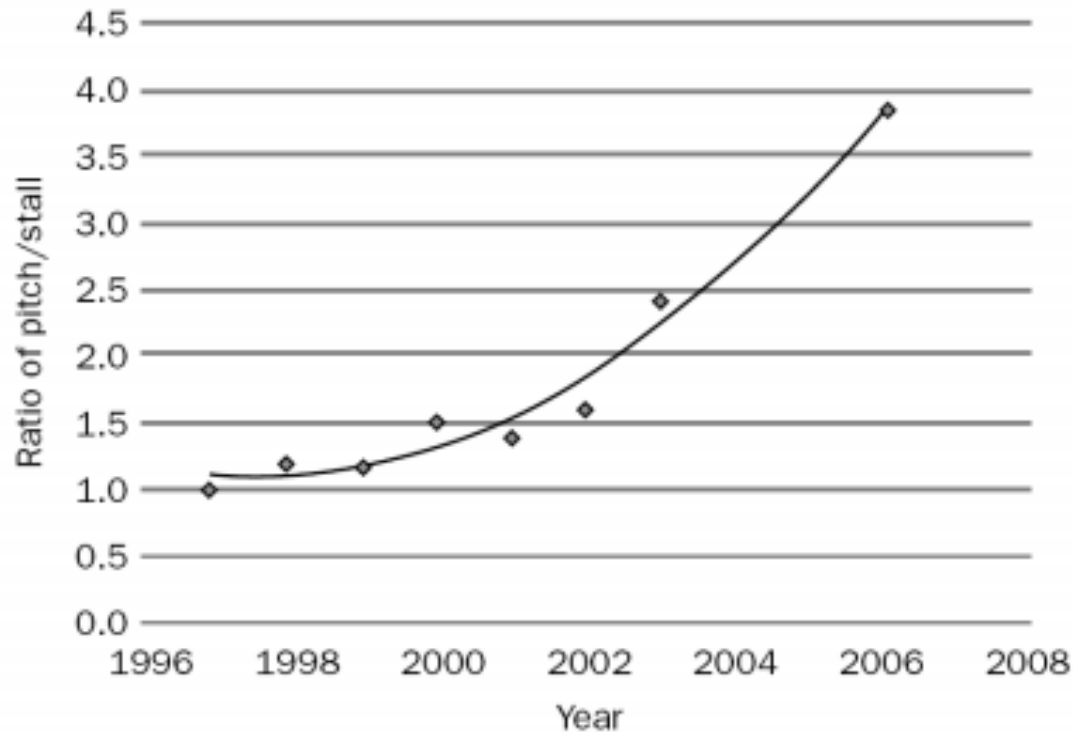
- Vantagens:
 - São necessárias pequenas mudanças no ângulo do passo para controlar a potência
 - Permite um controle de potência sob todas as condições de vento
 - Alcança a potência nominal mesmo sob condições de baixa densidade do ar
 - Construção mais simples do que as turbinas com controle de passo
- Desvantagens:
 - Maior complexidade no sistema de controle do aerogerador
 - Maior custo
 - Maior manutenção

Controle de passo

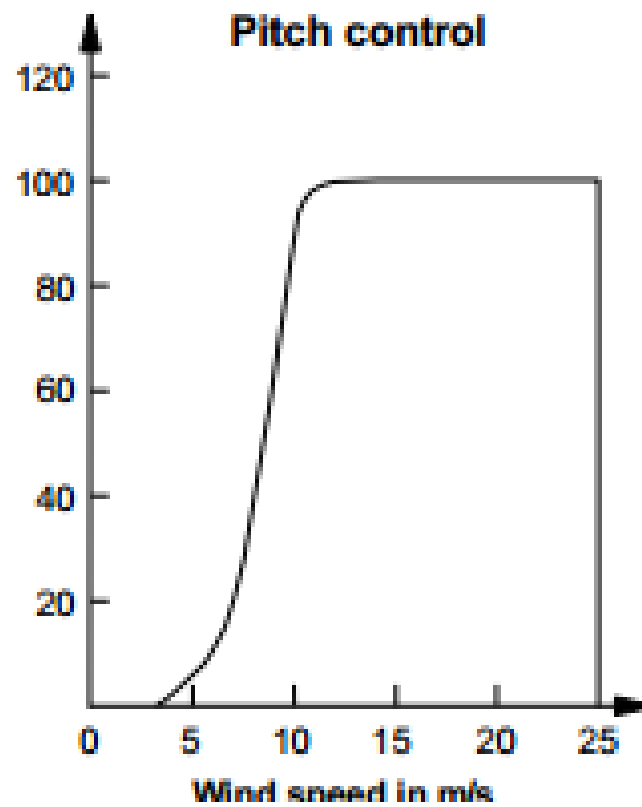
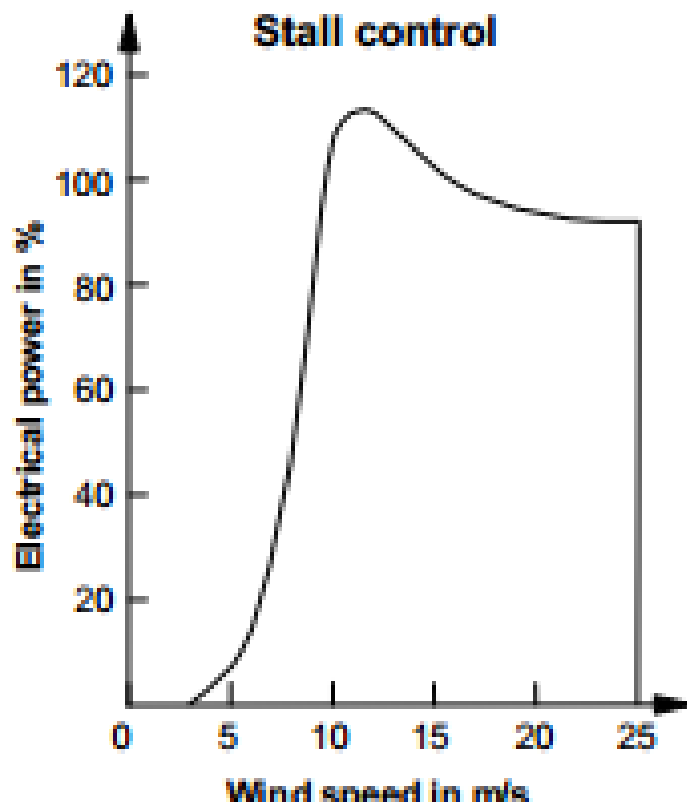
X

Controle de estol

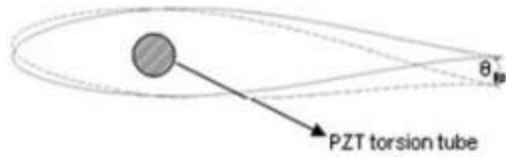
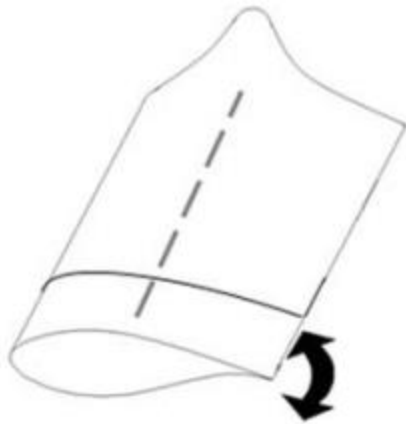
Razão entre controle de passo (*pitch*) e controle estol (*stall*) em modelos de aerogeradores de ≥ 1 MW



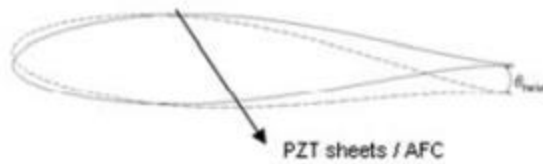
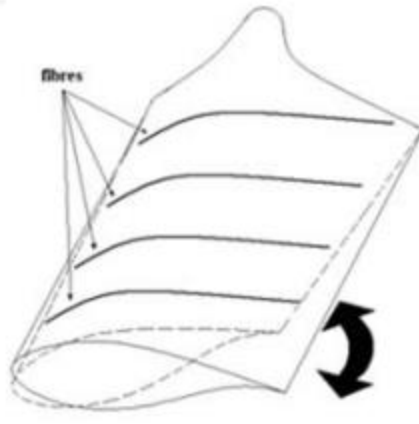
Source: Garrad Hassan



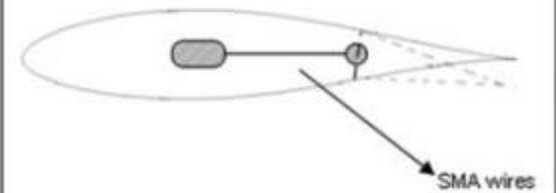
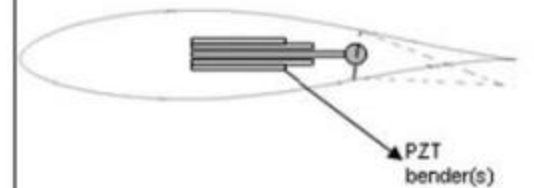
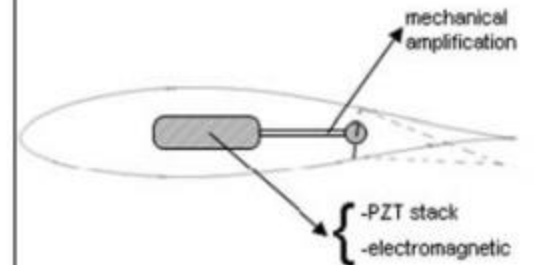
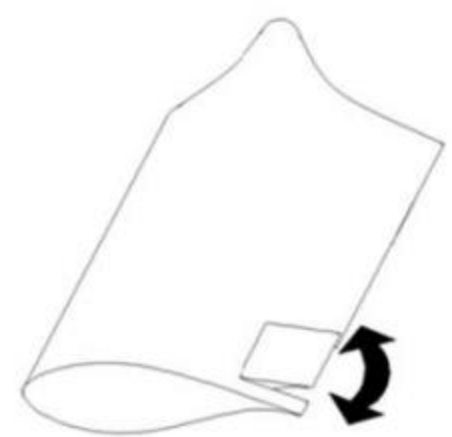
Active tip

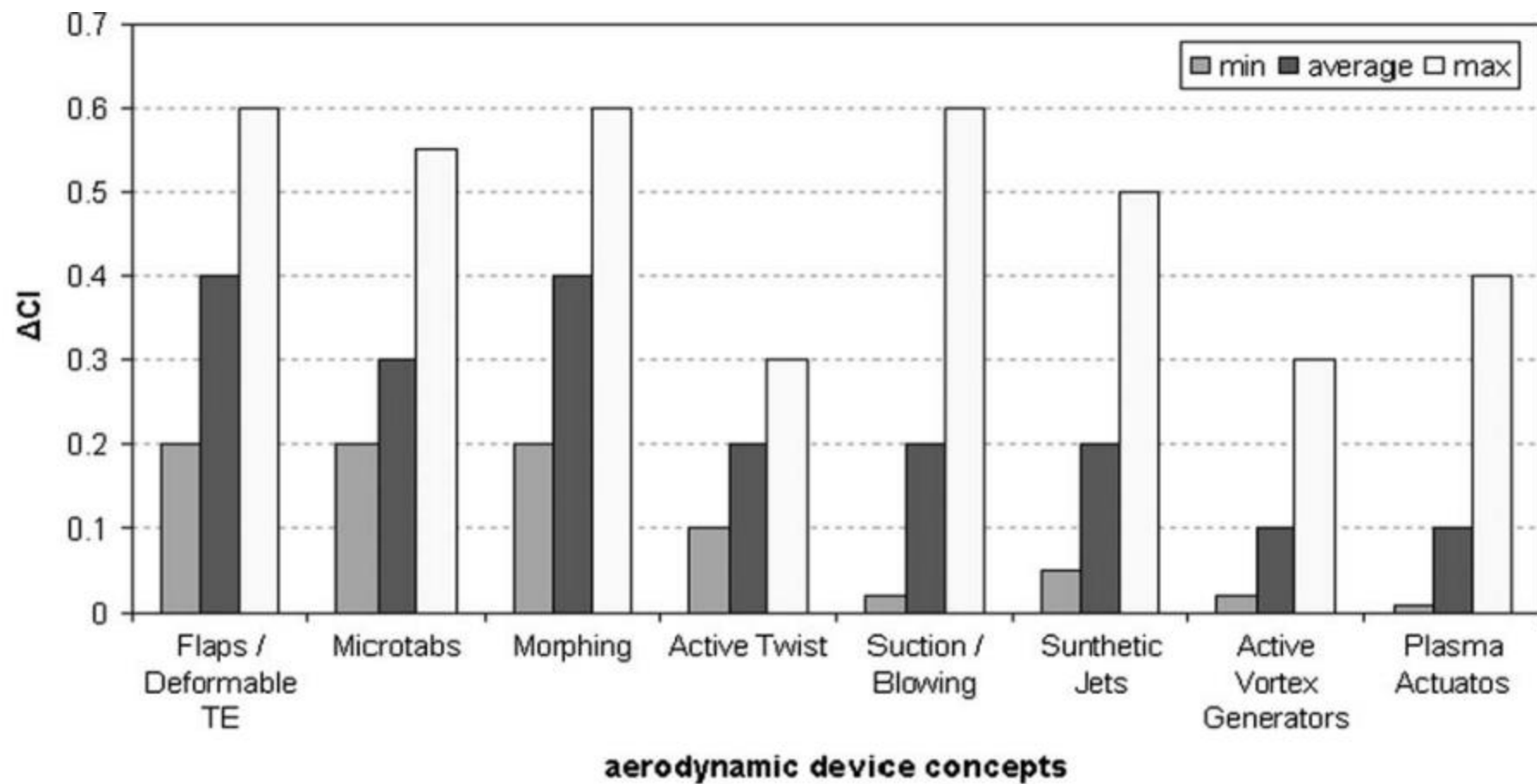


Active twist



Active flap





DESCRIÇÃO TÉCNICA	
POTÊNCIA	
Potência nominal	2.000 kW - 2.300 kW - 3.000 kW
Velocidade do vento nominal	12,5 m/s - 13,5 m/s - 16,5 m/s
Velocidade início de operação	2,5 m/s
Velocidade de parada	28 - 34 m/s (com opção "Storm Control")
ROTOR	
Diâmetro	82m
Área varrida pelas pás	5.281 m ²
Velocidade de rotação	Variável, 6-18 rpm
Fabricante	ENERCON
SISTEMA DE CONTROLE E PROTEÇÃO	
Limitação de potência	Controle de passo das pás
Controle de velocidade	Controle de passo das pás
Freio principal	Controle de passo das pás individuais
Sistema secundário de freio	Freio do rotor e trava do rotor
Controle de Azimute	6 motores elétricos
Fabricante do sistema de controle	ENERCON
Sistema SCADA	ENERCON SCADA
HOMOLOGAÇÃO	
Diretriz, Instrução, Classe	IEC IA - IEC IIA
Velocidade de Vento de Sobrevivência	70m/s - 59,5m/s

Fonte: ENERCON, 2010. [ENERCON Wind energy converters](#). Catálogo do fabricante.

Acesso em: 18/09/13)



Objetivos do sistema de controle

- Evitar danos mecânicos e elétricos à turbina
- Aumentar a eficiência do aerogerador







- Fundamentos de energia eólica
- Aerodinâmica aplicada
- Geradores e sistemas acessórios
- Sistemas de controle
- **Aerogeradores de Pequeno porte**

Porte dos aerogeradores



Pequeno Porte (≤ 10 kW)

- Residências
- Fazendas
- Aplicações Remotas



Intermediário (10-250 kW)

- Sistemas Híbridos
- Geração Distribuída



Grande Porte (≥ 250 kW)

- Usinas Eólicas
- Geração Distribuída

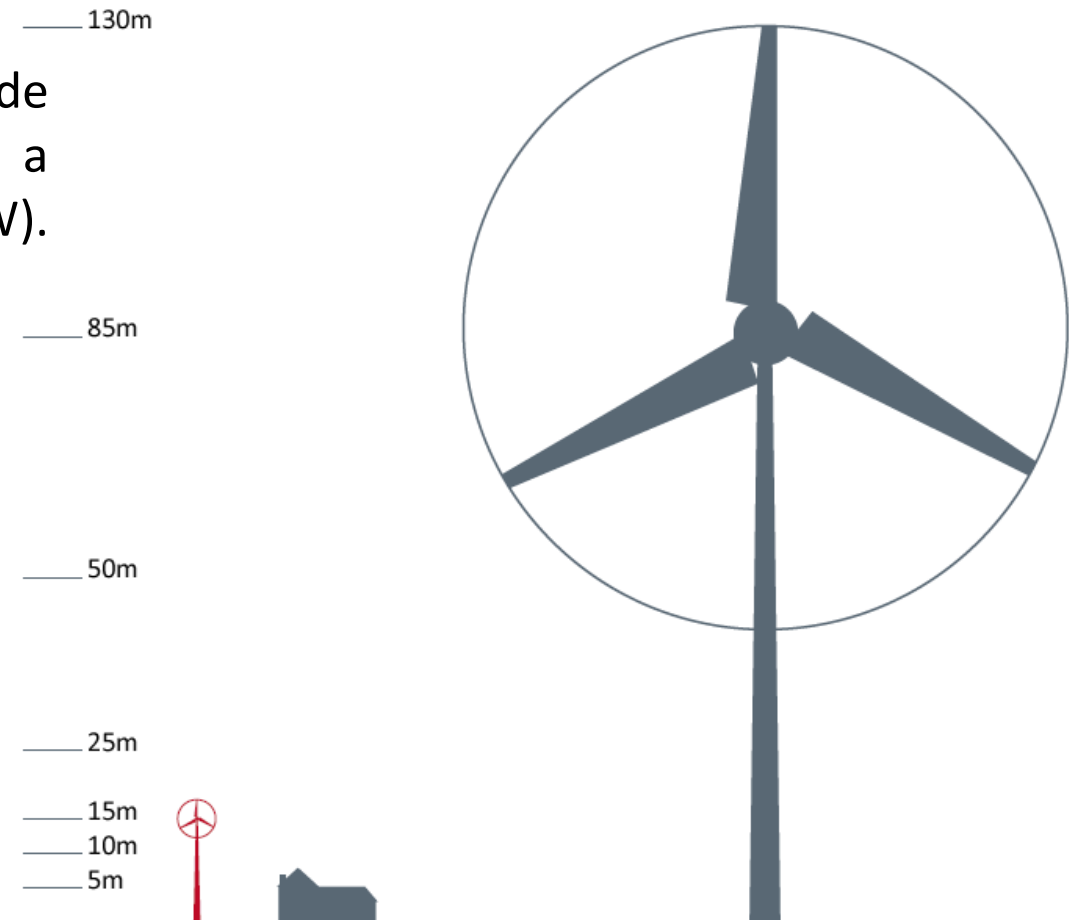
IEC 61400

Aerogerador de pequeno porte: área de varredura do rotor ≤ 200 m²

Dimensões de APP's

Aerogeradores de Pequeno Porte

Dimensões de um aerogerador de pequeno porte (~5 kW) em relação a um gerador de grande porte (~2 MW). Adaptado de (RENEWABLEUK, 2010)



Grandeza do “Pequeno Porte”

IEC 61400-2: *Design Requirements For Small Wind Turbines*: $A < 200\text{m}^2$ ou $\phi \sim < 16\text{m}$

$P < 10 \text{ kW a } 40 \text{ kW.}$

Segundo EWEA (2009) vários países definem como APP's aqueles com potência nominal abaixo de 100 kW.

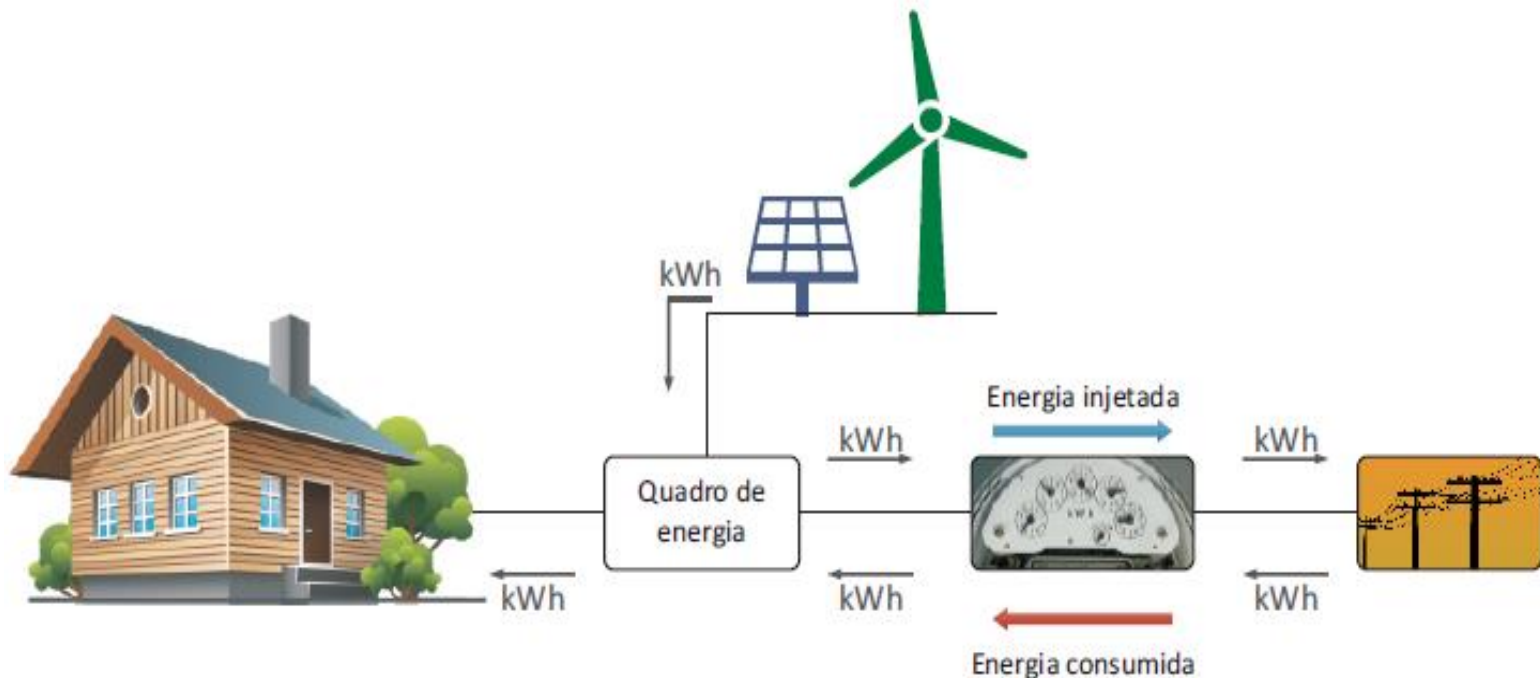
Várias instituições apresentam distintas definições do que é “pequeno porte”.

Normas para APP's

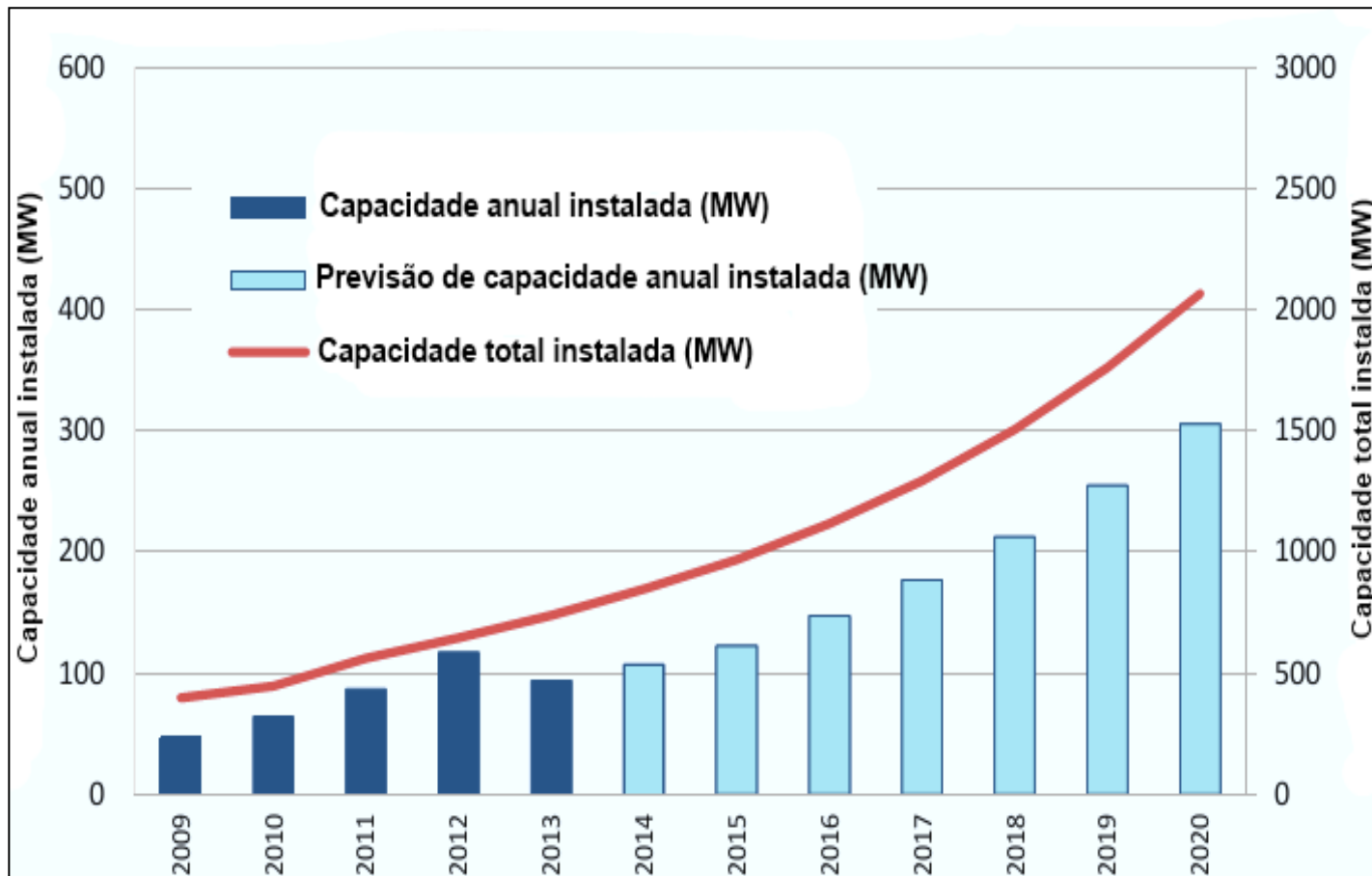
- Portaria INMETRO 168:2015 - Ensaio de tipo seguido de verificação através de ensaio , para aerogeradores de potência nominal até 100 kW
- AWEA Standard 9.1:2009 - AWEA Small Wind Turbine Performance and Safety Standard
- UL 6142:2012- Standard for Safety for Small Wind Turbine Safety

Incentivos aos APP's

- Geração Distribuída
- Resolução 482 da ANEEL: Sistema de compensação de energia

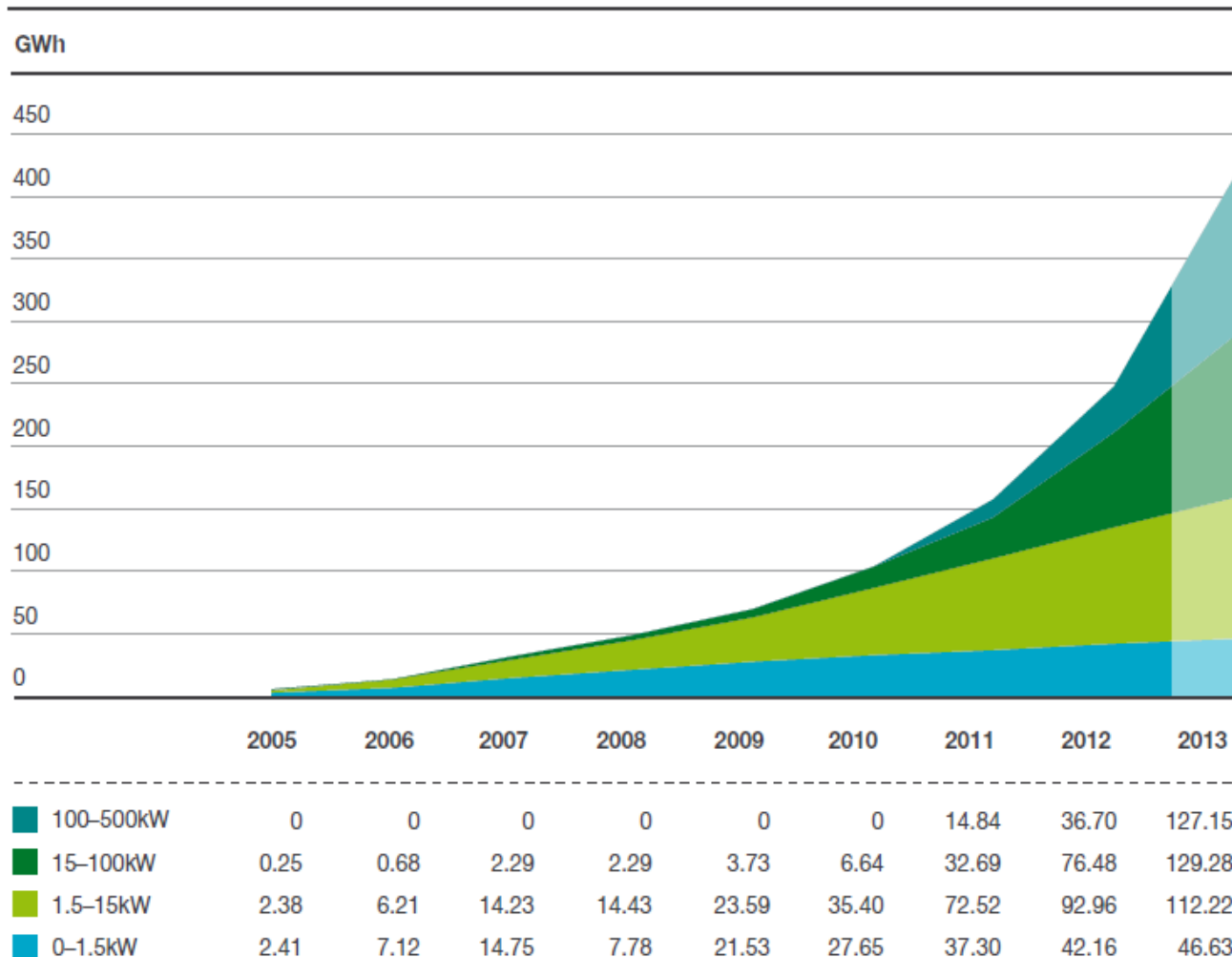


Capacidade mundial de produção de energia em APP. Fonte: WWEA 2015



Aerogeração de pequeno porte na Inglaterra em GWh

Fonte: Small and Medium Wind Market Report 2013 RUK



Análise de Investimento em APP's

- O investimento em energia limpa e renovável não deve ser feito somente considerando o retorno financeiro, mas também:
- Segurança Energética para Vida e Produção
- Previsibilidade independente da política
- Aspectos sociais de emprego e renda.
- Educação ambiental

Obrigado!

Eng. Antonio Carlos de Barros Neiva

MSc., MBA

a.neiva@gmail.com

(21)96917-0720