



Disciplina: Fontes Alternativas de Energia

Parte 2 – Energia Eólica

Prof. Alex Vilarindo Menezes

Cronograma

- 1. Evolução histórica**
- 2. O vento e suas características**
- 3. A energia eólica**
- 4. Turbinas eólicas**
- 5. Os aerogeradores**

Evolução histórica – Origem do moinho de vento

- ✓ Não é clara a data de um dispositivo identificado como eólico, havendo especulações contraditórias sobre a origem histórica dos moinhos de vento.
- ✓ Aponta-se a máquina pneumática e o órgão acionado pelo vento, por Heron de Alexandria há cerca de 2000 anos como as primeiras referências.

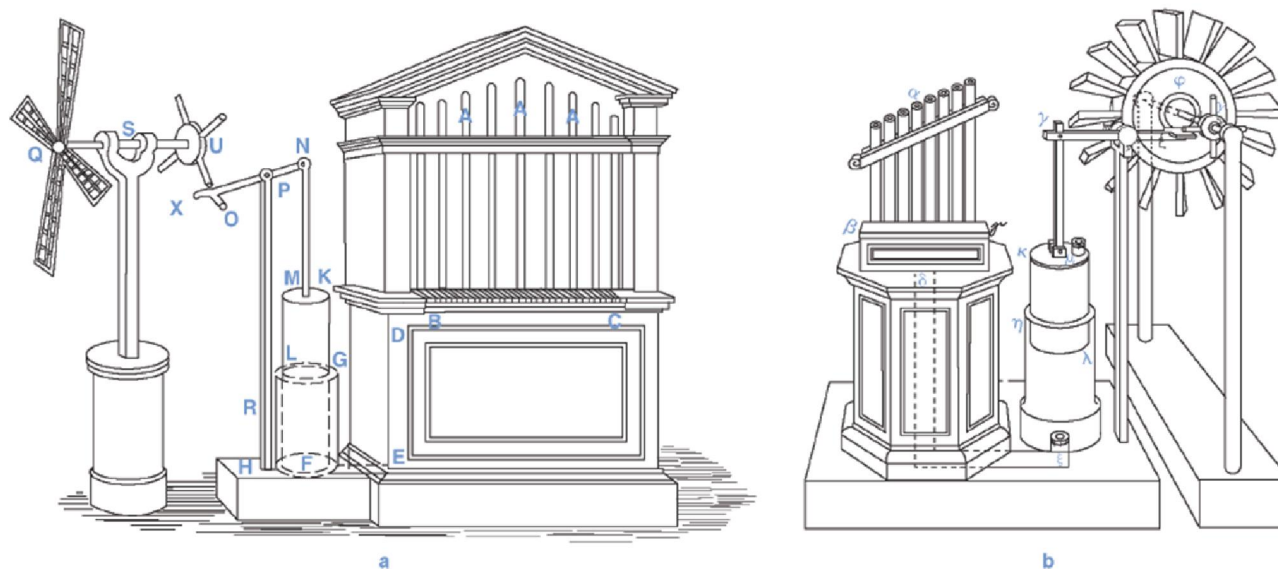


FIGURA 2.1 Ilustrações descritas por Heron de Alexandria provavelmente no primeiro século d.C. (a) e (b) mostram um eixo com quatro pás.
Fonte: Woodcroft, 1851.

Evolução histórica – Origem do moinho de vento

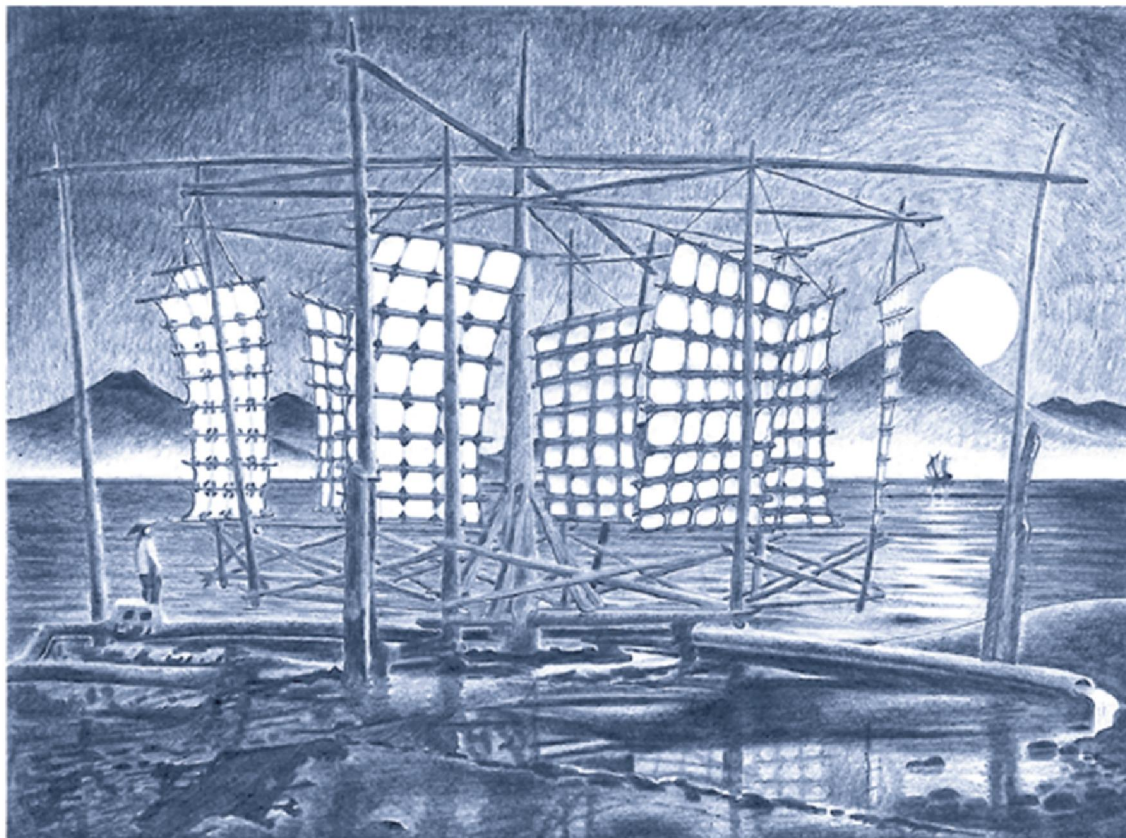


FIGURA 2.2 Ilustração de um antigo moinho de vento chinês.
Autor: Carl Von Canstein, 2007, Creative Commons.

Evolução histórica – Origem do moinho de vento

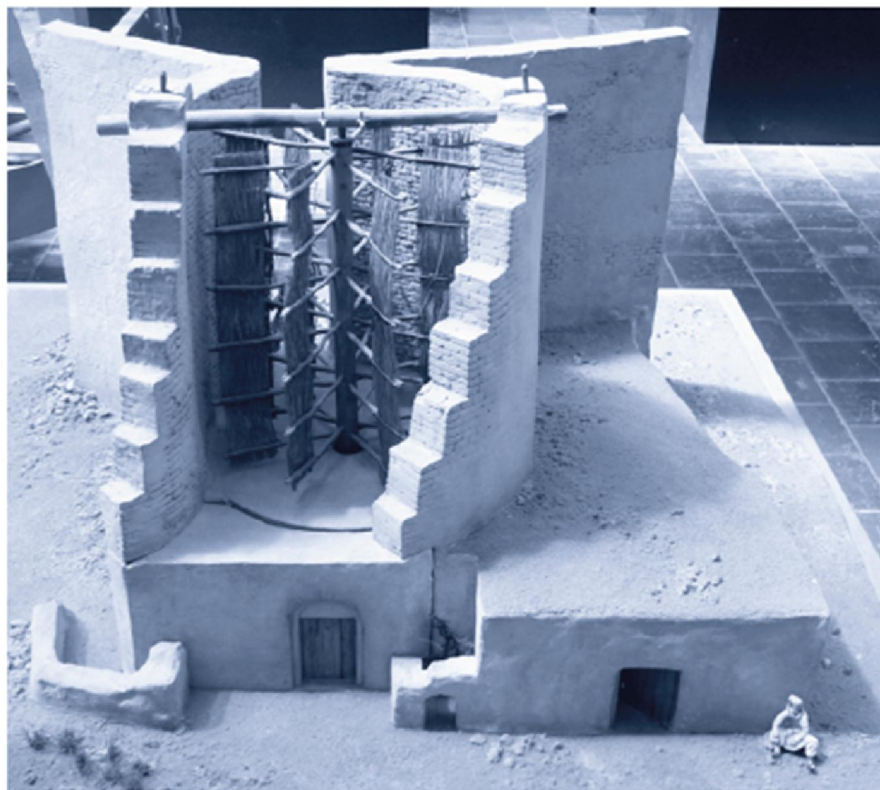


FIGURA 2.3 Foto de um modelo de um moinho de vento persa no Deutsche Museum, Alemanha.

Foto: Saupreiß, 2010, Creative Commons.

Evolução histórica – Origem do moinho de vento



FIGURA 2.5 Rascunho de um moinho de vento feito pelo artista renascentista Leonardo da Vinci.
Fonte: Museo Galileo – Istituto e Museo di Storia della Scienza, Itália.



FIGURA 2.6 Dom Quixote montado em seu cavalo Rocinante enfrenta um moinho de vento, com Sancho Pança ao fundo tentando alertá-lo de tamanha ilusão.
Fonte: Ilustração nº 6 de Gustave Doré (1832-1883) para o livro *Dom Quixote*, de Cervantes.

Evolução histórica – Origem do moinho de vento



FIGURA 2.10 Moinho de vento de Halladay, considerado o primeiro moinho de vento para uso comercial.

Fonte: Wolff, 1900.



FIGURA 2.11 Embarcação fazendo uso de um moinho de vento.

Foto: David Alexander De Maus.

Fonte: National Library of New Zealand.

Evolução histórica – Origem do moinho de vento

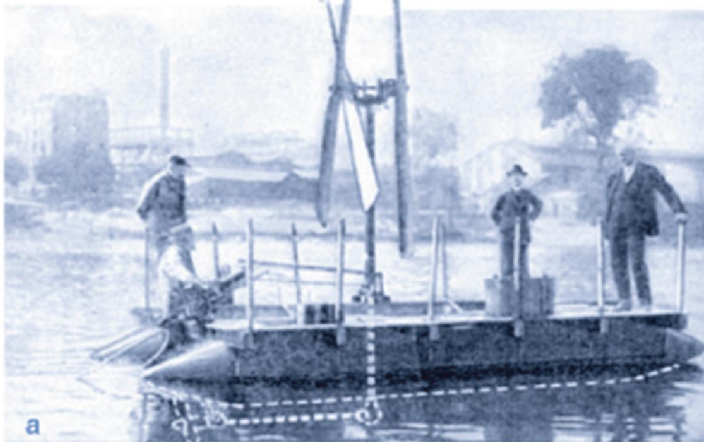


FIGURA 2.12 (a) Uso de um moinho de vento em uma embarcação no rio Sena, perto de Paris, França. Projetada para ventos moderados e conduzida por seus próprios inventores. (b) Ilustração de um pequeno barco com propulsão eólica.

Fonte: (a) *Popular Science Monthly*, Feb. 1923 – vol. 102, nº 2, p. 43. (b) *Popular Mechanics*, Dec. 1927 – vol. 48, nº 6, p. 999.

Evolução histórica – Origem do moinho de vento



FIGURA 2.13 Duas turbinas eólicas e um moinho de vento na paisagem holandesa.

Foto: Loranchet, 2009, Creative Commons.



FIGURA 2.14 Moinhos de vento em Campo de Criptna (La Mancha, Espanha).

Foto: Lourdes Cardenal, 2004, Creative Commons.

Evolução histórica – Origem do moinho de vento



FIGURA 2.15 Moinho de vento na cidade de Castro, Paraná/Brasil.
Foto: Kiko Correia, 2008, Creative Commons.

Evolução histórica – Os primeiros geradores eólicos

- ✓ O primeiro moinho de vento para gerar eletricidade foi construído em Julho de 1887 na cidade escocesa de Glasgow pelo engenheiro eletricista e professor **James Blyth** (1839-1906), conseguindo a patente britânica em 1891 da turbina.
- ✓ Tinha 10 m de altura, eixo vertical, instalada em sua casa de campo.
- ✓ Utilizada para carregar acumuladores, para iluminação da casa.
- ✓ Ofereceu a eletricidade excedente para o povo de Marykirk.

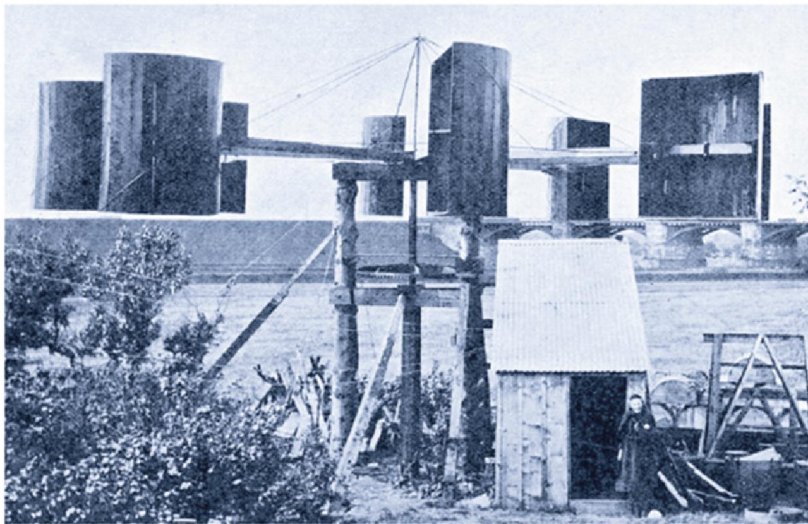


FIGURA 2.17 O moinho de vento de Blyth, 1891, Escócia.
Fonte: domínio público.

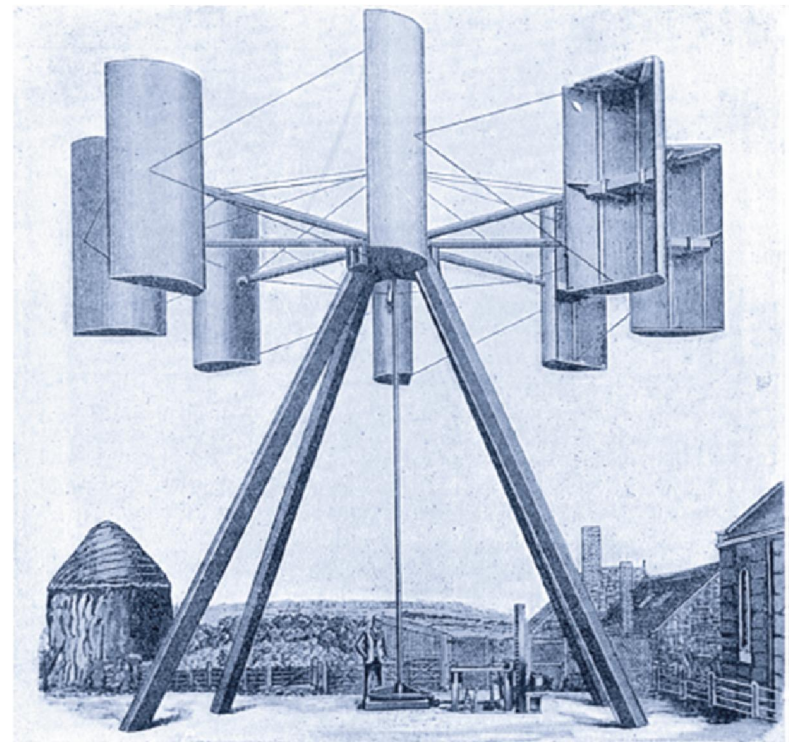


FIGURA 2.18 Ilustração do moinho de vento de Blyth.
Fonte: Kennedy, 1905.

Evolução histórica – Os primeiros geradores eólicos

- ✓ Até o século XIX os moinhos de vento produziam apenas energia mecânica.
- ✓ Os engenheiro perceberam, então, que os moinhos de vento poderiam produzir energia elétrica para iluminação e aquecimento.
- ✓ Erroneamente, costuma-se atribuir o feito de Blyth ao americano

Charles Francis Brush (1849-1929), em 1888, Clevelando, Ohio.

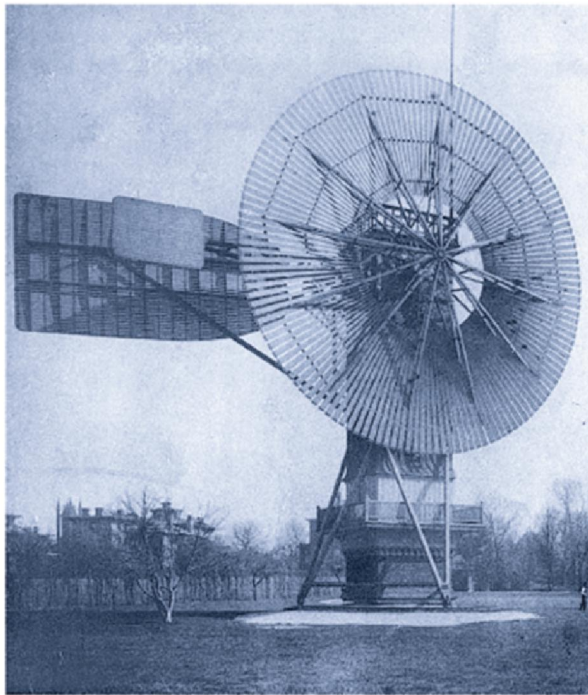


FIGURA 2.20 A turbina eólica de Brush, em Cleveland. Ela operou de 1888 a 1908.
Fonte: Spera, 2009.

- **Gerador alimentando 12 baterias**
- **Eixo horizontal**
- **144 pás**
- **17 m de diâmetro de rotor**
- **18,3 m de altura de torre**

Parte 2 – Energia Eólica
Prof. Alex Vilarindo Menezes

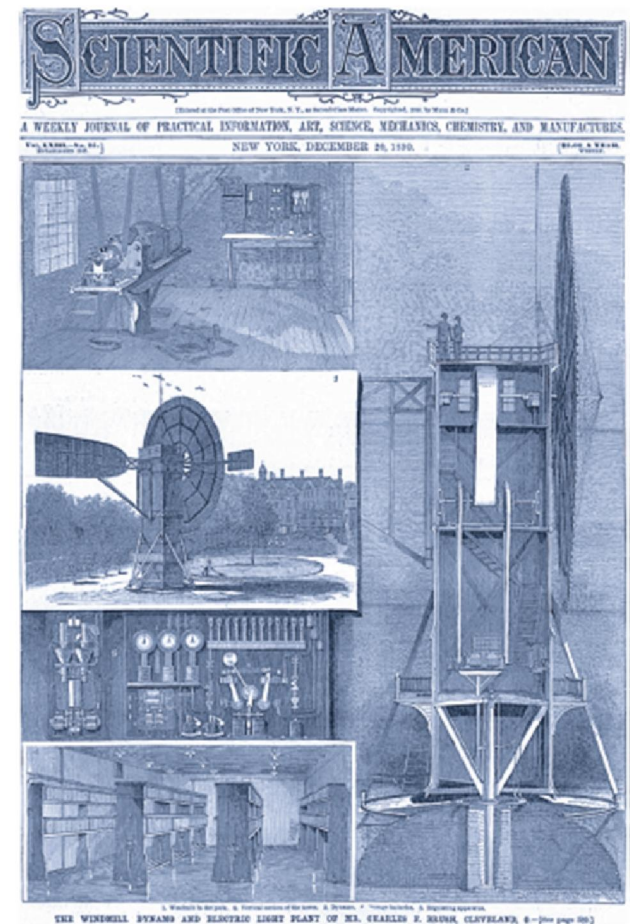


FIGURA 2.21 Capa da revista americana *Scientific American*, com destaque para a turbina de Charles F. Brush.
Fonte: *Scientific American* nº 63, 1890.

Evolução histórica – Os primeiros geradores eólicos

- ✓ Até o século XIX os moinhos de vento produziam apenas energia mecânica.
- ✓ Os engenheiros perceberam, então, que os moinhos de vento poderiam produzir energia elétrica para iluminação e aquecimento.
- ✓ Erroneamente, costuma-se atribuir o feito de Blyth ao americano Charles Francis Brush (1849-1929), em 1888, Clevelando, Ohio.

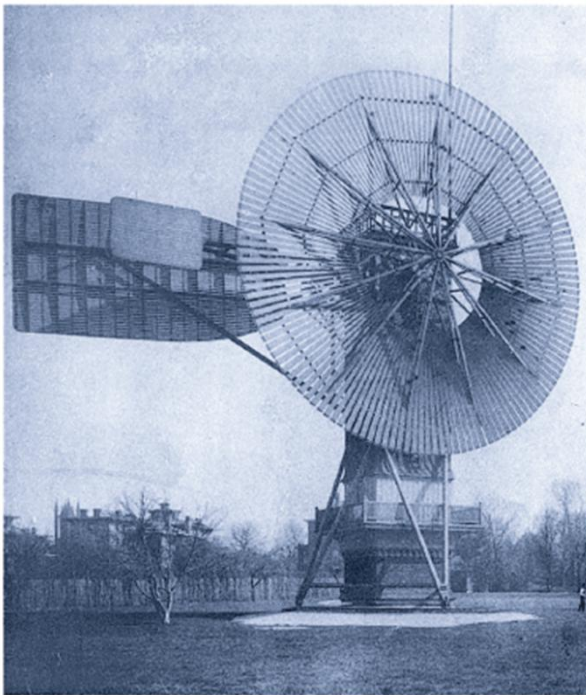
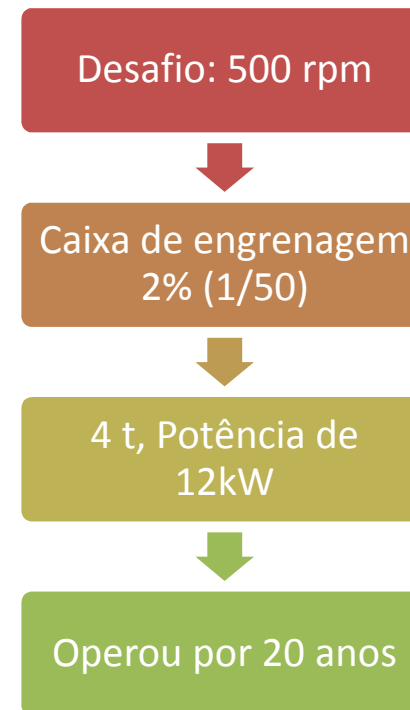


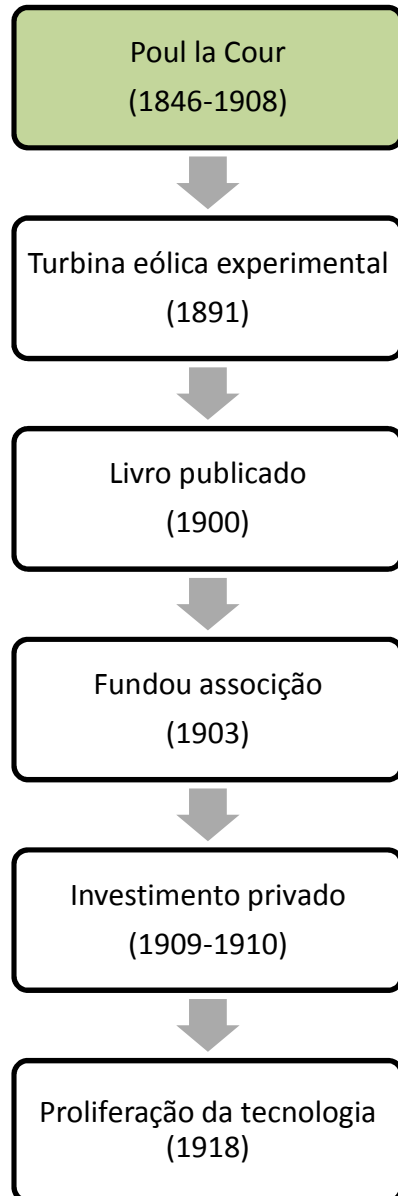
FIGURA 2.20 A turbina eólica de Brush, em Cleveland. Ela operou de 1888 a 1908.

Fonte: Spera, 2009.

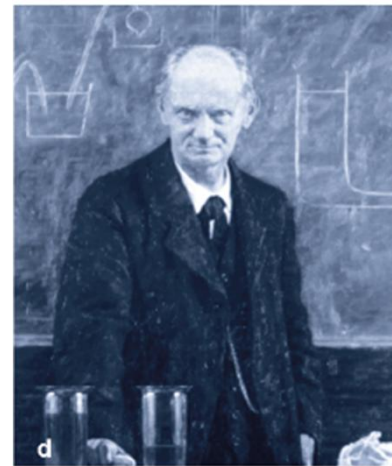
13



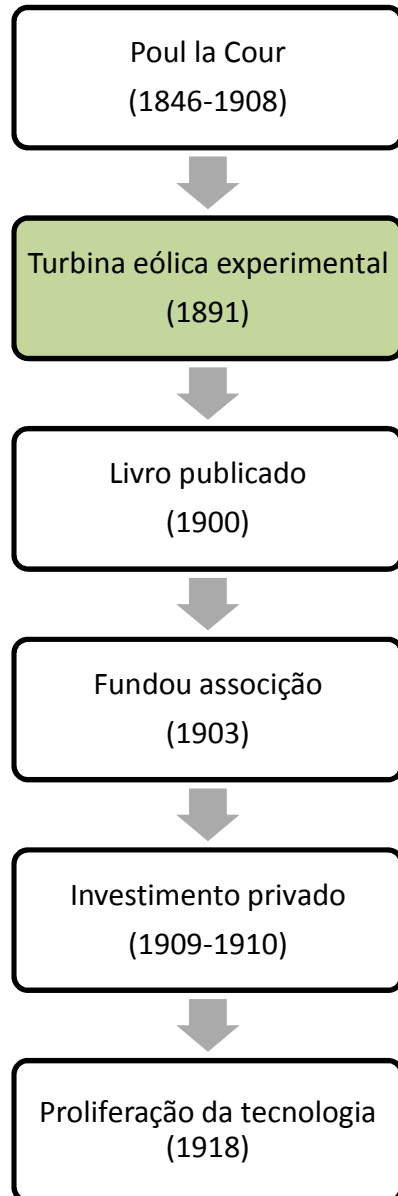
Evolução histórica – Poul la Cour



- ✓ Foi o responsável pela transição entre os moinhos de ventos e a moderna tecnologia de geração eólica. É dele o mérito de apresentar a energia eólica em termos científicos.
- ✓ Trabalhou como professor de ciência naturais e matemática na cidade Askov (dinamarca).



Evolução histórica – Poul la Cour



✓ Com **fundos do governo dinamarquês**, que estava procurando meios de fornecer eletricidade às áreas rurais do país, la Cour, em 1891, construiu uma **turbina eólica experimental que aciona um dínamo**.

✓ Ele usou a corrente contínua gerada pela turbina para eletrólise e armazenou hidrogênio então produzido. De 1885 a 1902, lâmpadas a gás usando esse método iluminaram terrenos de esolas em Askov.

✓ Nos anos seguintes, la Cour expandiu suas atividades em Askov e montou uma oficina de testes para turbinas eólicas.

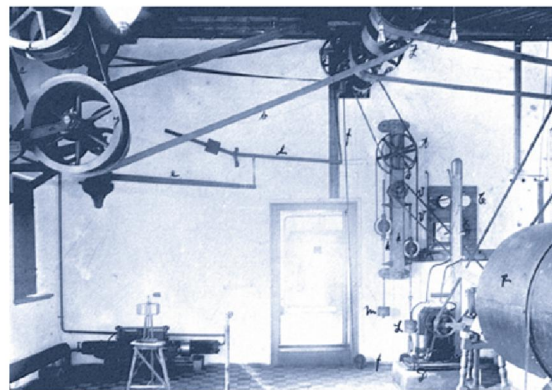
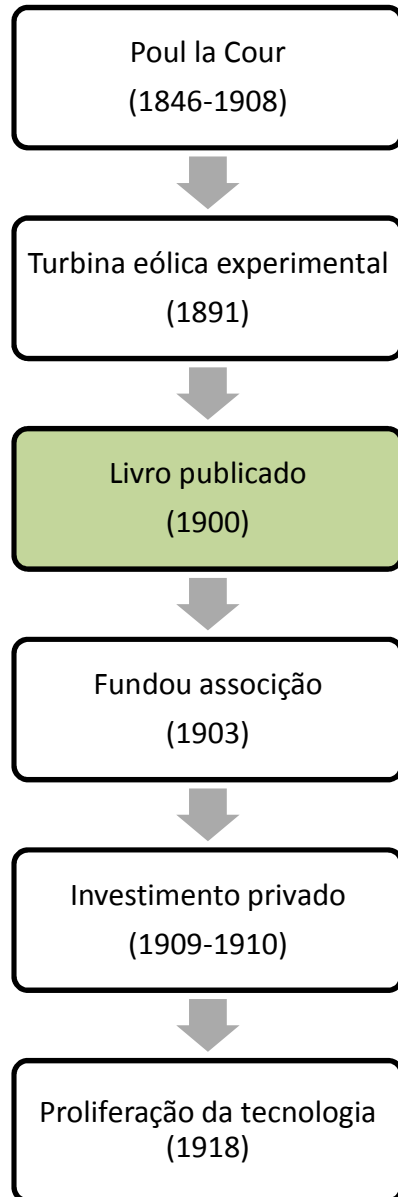


FIGURA 2.24 Sala de máquinas de Poul la Cour, em Askov, Dinamarca, onde, a partir de 1897, ocorreram experimentos eólicos. Fonte: Nissen, 2004.



FIGURA 2.25 A primeira turbina eólica usada por Poul la Cour em 1891 em Askov, na Dinamarca. Fonte: The Danish Museum of Energy.

Evolução histórica – Poul la Cour



✓ Foi possivelmente o primeiro a realizar testes com moinho de vento. No livro *Forsogsmollen*, publicado em Copenhague em 1900, la Cour descreve seu trabalho.

✓ Na dinamarca, entre 1891 e 1918, ele construiu mais de 100 turbinas na faixa de 20 a 35 kW. Após a primeira turbina de 1891, em 1897 foram vistos dois modelos de teste.



FIGURA 2.26 As turbinas de teste de Poul la Cour em Askov, Dinamarca, 1897.
Fonte: Poul la Cour Museum.

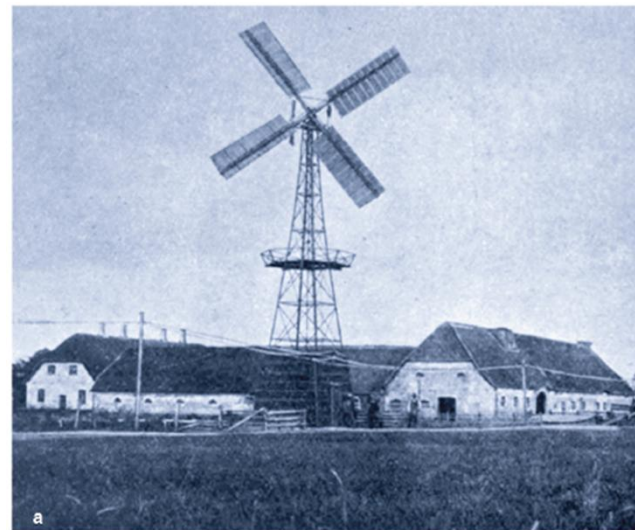
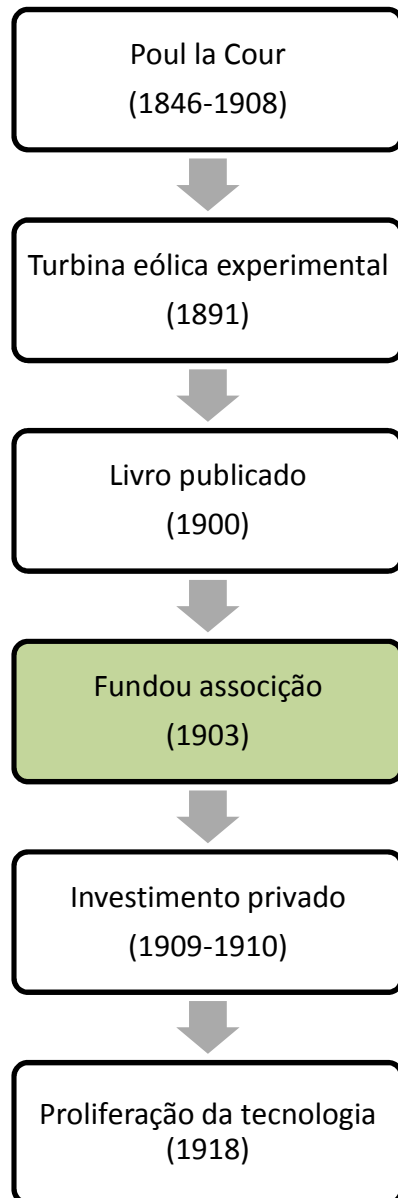


FIGURA 2.27 Turbina de Poul la Cour em (a) Askov e (b) Vallekilde.
Fonte: la Cour, 1904.

Evolução histórica – Poul la Cour



✓ Em 1903, la Cour fundou a Associação Dinamarquesa dos Engenheiros de Energia Eólica (*Dansk Vind Elektrisitets Selskab – DVES*), que, entre outras coisas, oferecia **cursos de treinamento para os “eletricistas do vento”**.

✓ Naquele mesmo ano, a DVES tinha registradas 132 pequenas plantas eólicas em operação na Dinamarca. No ano seguinte, a DVES publicou um periódico sobre eletricidade e energia eólica .

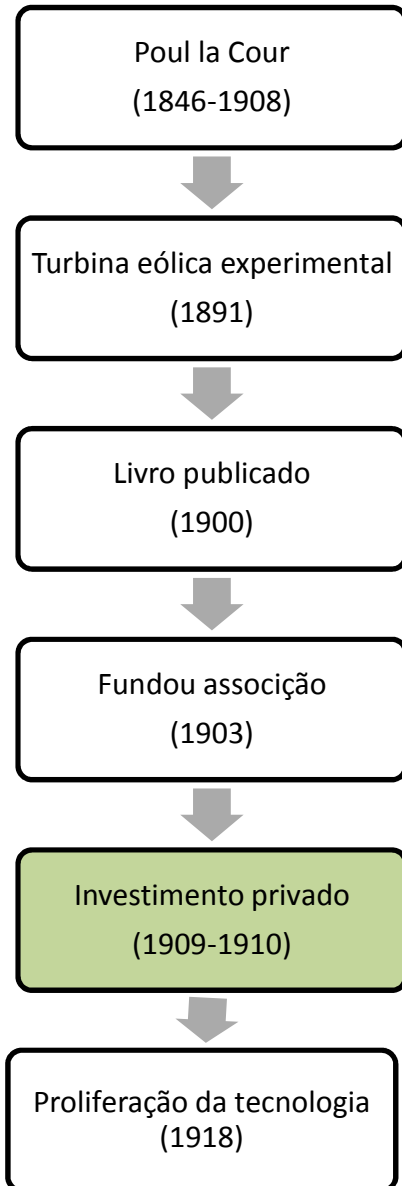


FIGURA 2.29 Capa do *Tidsskrift for Vindelektricitet*, publicado em 1904 por Poul la Cour. Fonte: Nissen, 2002.



FIGURA 2.28 Participantes do primeiro curso de eletricistas organizado pela Associação Dinamarquesa dos Engenheiros de Energia Eólica, em 1904. Poul la Cour é o primeiro sentado da esquerda para a direita, na fileira central. Em pé, o terceiro da direita para a esquerda é Johhanes Jull, que em 1957 desenvolveu a primeira turbina AC do mundo. Fonte: Nissen, 2002.

Evolução histórica – Poul la Cour

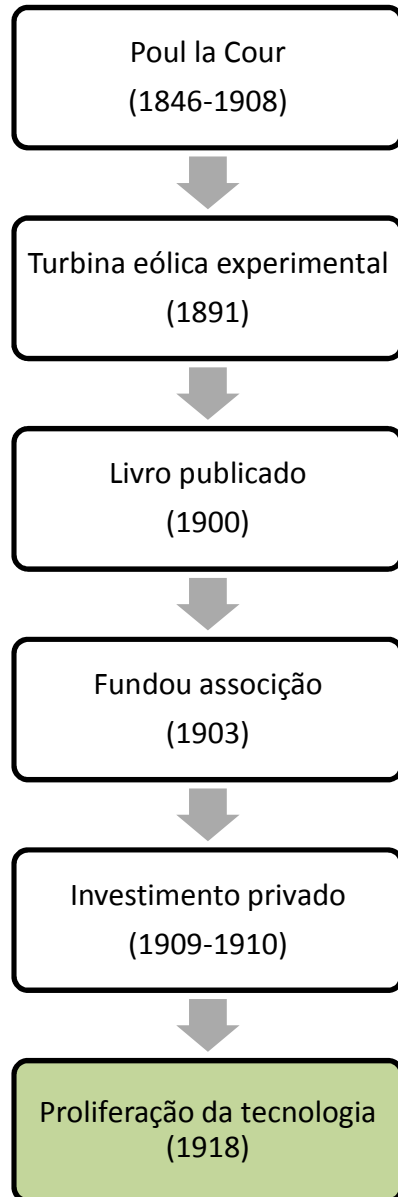


✓ O tamanho do sucesso de la Cour se tornou claro quando a **Lykkegard Company** entrou no negócio. Por volta de **1909 já haviam sido construídas 72 turbinas eólicas para geração de eletricidade**, modeladas depois de testes em Askov.

✓ Em 1910, pouco mais de 10 empresas produziam os então chamados “motores eólicos”, dos quais a Lykkegard fornecia a maior parte.

✓ Essas máquinas produziam **Corrente Contínua** na faixa de 60 a 70 MWh por ano.

Evolução histórica – Poul la Cour



✓ O desenvolvimento das turbinas eólicas foi acelerado pelo drástico aumento no preço dos combustíveis durante a Primeira Guerra Mundial, e por volta de 1918 havia cerca de **120 turbinas em operação.**

✓ O modelo de la Cour-Lykkegard tinha em torno de **30 kW** a **12 m/s** de velocidade do vento e um **diâmetro de rotor de 18 m.**

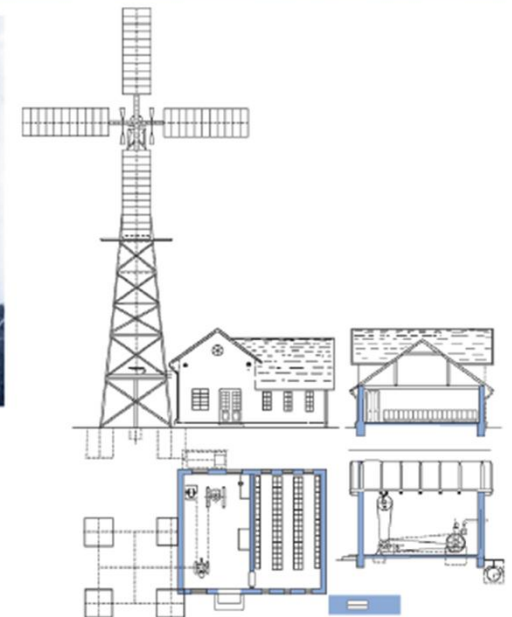


FIGURA 2.30 Turbina eólica de la Cour-Lykkegard, Dinamarca. Fonte: The Danish Museum of Energy.

Evolução histórica – Primeira turbina em AC

✓ Pouco depois da Segunda Guerra Mundial, o engenheiro dinamarquês Johannes Juul, um dos primeiros alunos de la Cour, construiu em 1957 uma turbina de 200 kW em Vester Egesborg, Dinamarca.



FIGURA 2.32 Turbina eólica de 200 kW instalada em Gedser, na Dinamarca.
Fonte: The Danish Museum of Energy.

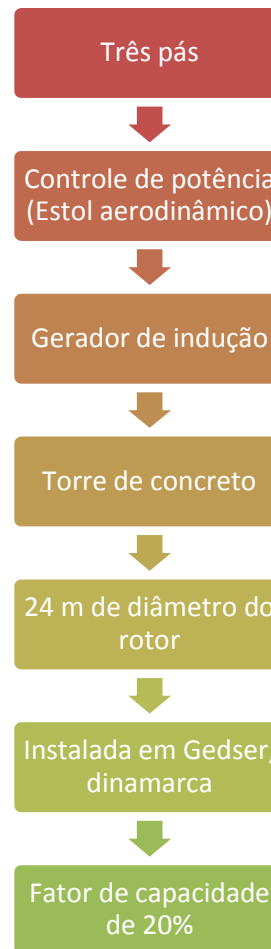


FIGURA 2.33 Turbina eólica de Gedser, Dinamarca.
Fonte: The Danish Museum of Energy.

Evolução histórica – Os projetos da Alemanha

- ✓ Ao lado da Dinamarca e Holanda, a Alemanha é outro país europeu de forte tradição no uso da energia eólica. Até os anos 1930, **3600 turbinas eólicas** foram construídas na Alemanha por cerca de 10 fabricantes – a maioria para bombeamento de água.
- ✓ O físico alemão **Albert Betz (1885-1968)** abordou o problema da física do rotor eólico e da aerodinâmica de um ponto de vista estritamente científico. Ele resumiu o resultado de sua pesquisa e formulou uma base teórica para o formato aerodinâmico das pás do rotor eólico que é válida até o presente.

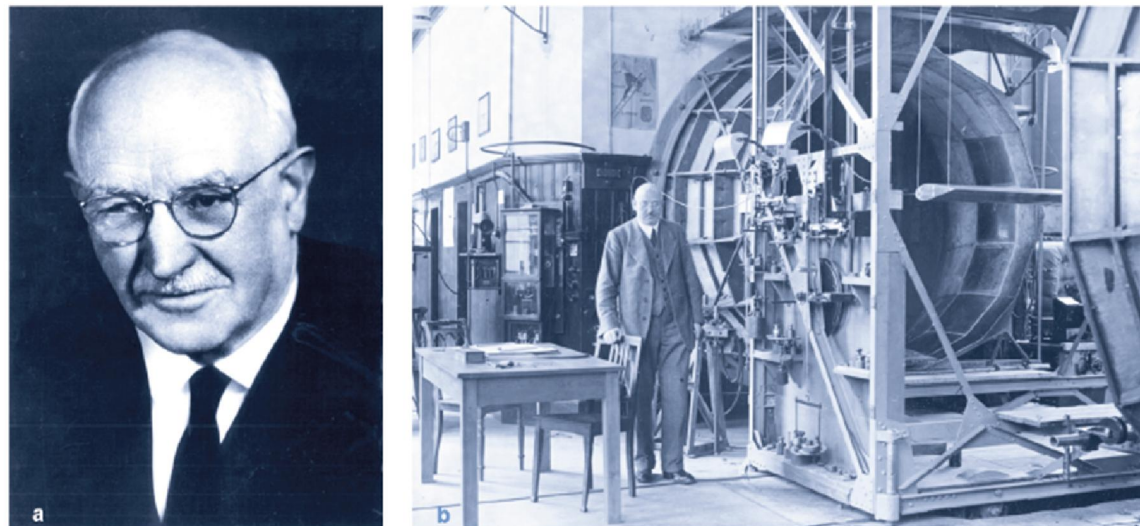
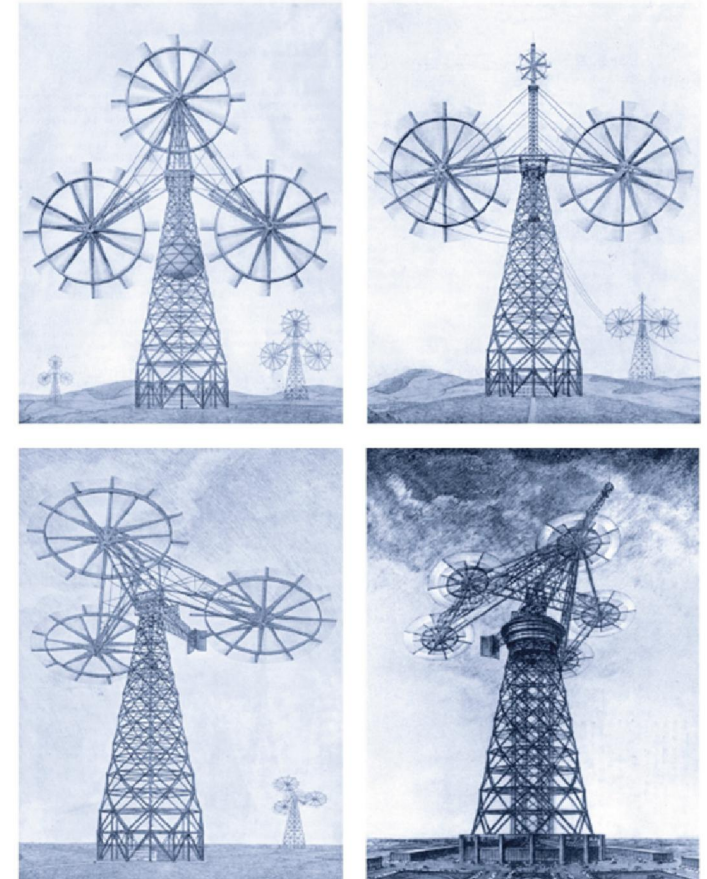
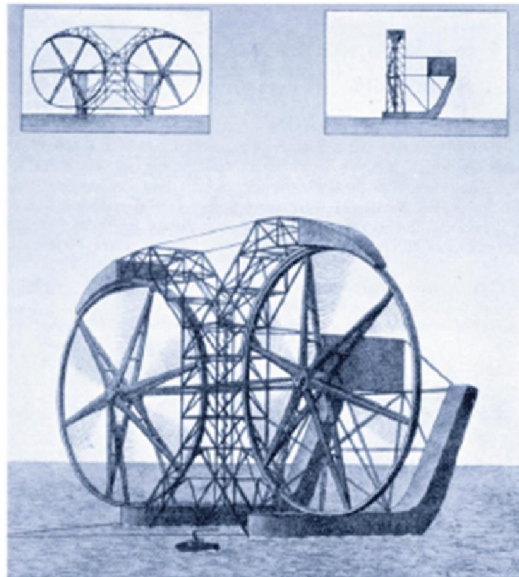


FIGURA 2.35 (a) Albert Betz por volta de 1963; (b) Albert Betz em uma oficina de testes aerodinâmicos em 1930. Fonte: DLR Archive Goettingen.

Evolução histórica – Os projetos da Alemanha

- ✓ Um dos primeiros a trabalhar com essas novas descobertas científicas de Betz foi o engenheiro **Herrman Honnef (1878-1961)**, que desenvolveu o conceito de enormes usinas eólicas – foi o pioneiro em desenvolvimento de grandes turbinas.
- ✓ Em 1932, Honnef chegou a conceber o projeto de uma instalação eólica composta por **cinco rotores de 160 m de diâmetro, 20 MW de potência e altura de torre de 250 m**.
- ✓ As turbinas de Honnef nunca vieram a ser construídas. Naquele mesmo ano, Honnef propôs a ideia da geração eólica *offshore*, tendo sido considerado o primeiro a conceber tal conceito.



Evolução histórica – A primeira grande turbina americana

✓ Em 1922, os irmãos **Marcellus Jacobs (1903 -1985)** e **Joseph Jacobs** começaram a desenvolver uma pequena turbina. Elas foram de algum modo as sucessoras dos moinhos de bombeamento de água. Depois de testes iniciais com uma hélice de duas pás de um avião, eles desenvolveram um rotor de três pás que acionava diretamente um gerador DC de baixa velocidade para carregar baterias.

✓ A turbina que Marcellus Jacobs inventou se tornou uma marca registrada em 1927, entrando oficialmente nos negócios a partir de 1929. Na década de 1950, a empresa pode ter construído cerca de **50000 máquinas eólicas (1,8 a 3 kW)**, inclusive com vendas internacionais.

✓ Uma dessas turbinas eólicas foram adquiridas pelo almirante americano Richard Byrd, em sua expedição para a antártida, tendo a turbina operado **sem manutenção por mais de 22 anos.**



FIGURA 2.42 Veículo da companhia eólica de Marcellus e Joseph Jacobs. A tradução do inglês da escrita na lateral do automóvel diz: “Usina elétrica-eólica superautomática – anos de operação perfeita.”
Fonte: Jacobs Wind.



FIGURA 2.41 Turbina eólica de Jacobs. A figura apresenta Marcellus Jacobs ao lado de uma máquina de 2,5 kW nos anos 1940.
Fonte: Jacobs Wind.

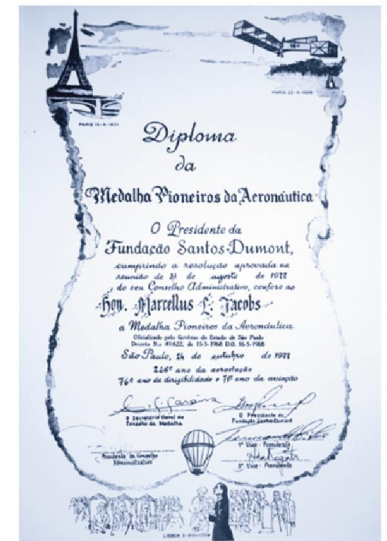


FIGURA 2.43 Diploma da Fundação Santos Dumont dado aos irmãos Marcellus e Joseph Jacobs em 1977.
Fonte: Jacobs Wind.

Evolução histórica – Rússia (turbina de grande porte)

✓ Paralelamente ao desenvolvimento das turbinas dos irmãos Jacoss, nos EUA, no outro lado do oceano, na península da Crimeia, em Balaklava, Rússia, em 1931, foi dado um dos primeiros passos no desenvolvimento de usinas eólicas de grande porte, com a construção de uma turbina de **100 kW e 30 m de diâmetro de rotor, gerando em torno de 200 MWh.**

✓ Projetada pelo engenheiro russo V. N. Krasnovky, a Wime D-30 tem a importância histórica de ser um dos primeiros sistemas eólicos a alimentar uma concessionária.



FIGURA 2.44 A turbina eólica russa instalada em Balaklava em 1931.

Fonte: *Popular Science Monthly*, 1935.

Evolução histórica – EUA (turbina de grande porte)

✓ Em outubro de 1941, a turbina foi instalada em uma colina perto de Rutland, no estado de Vermont, e foi a primeira grande turbina do mundo, custando em torno de 1 milhão de dólares – idealização do engenheiro americano Palmer Cosslett Putnam (1900-1984).

✓ **Dados técnicos:**

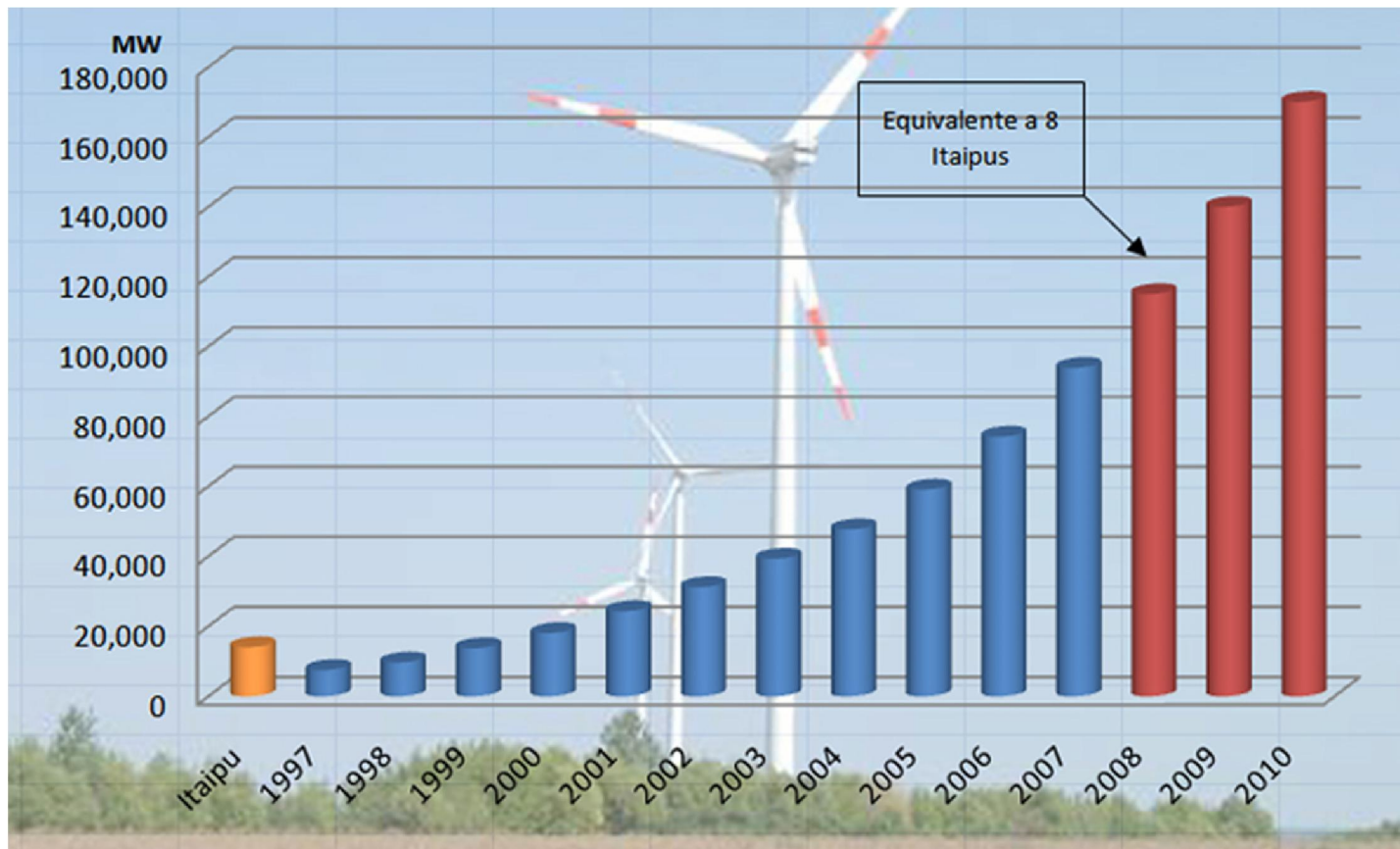
1. **Diâmetro do rotor: 53,3 m**
2. **Potência nominal: 1,25MW**
3. **Altura da torre: 35,6 m**
4. **Comprimento útil da pá: 20 m**
5. **Peso: 6,9 t para cada pá**
6. **Velocidade: 29 rpm**
7. **Peso total: 79 t**
8. **Relação do eixo de transmissão 20,6**
9. **Velocidade nominal do vento: 13,5 m/s**
10. **Alternador: 1,25MVA, 2,4 kV e 600 rpm**



FIGURA 2.46 Turbina eólica de Smith-Putnam instalada perto de Rutland, Vermont-EUA, em 1941.
Fonte: National Renewable Energy Laboratory, EUA.

Evolução histórica – Cenário mundial atual

✓ “O crescimento da energia eólica no mundo tem sido vertiginoso. Em 2008 a capacidade total instalada atingiu a marca dos 115.000 MW, equivalente a cerca de 8 usinas de Itaipu. Entre 1998 e 2007 a média anual de crescimento ultrapassou os 28% ao ano!” – Fonte: <http://www.enercons.com.br/areas-atuacao-ce.php>.

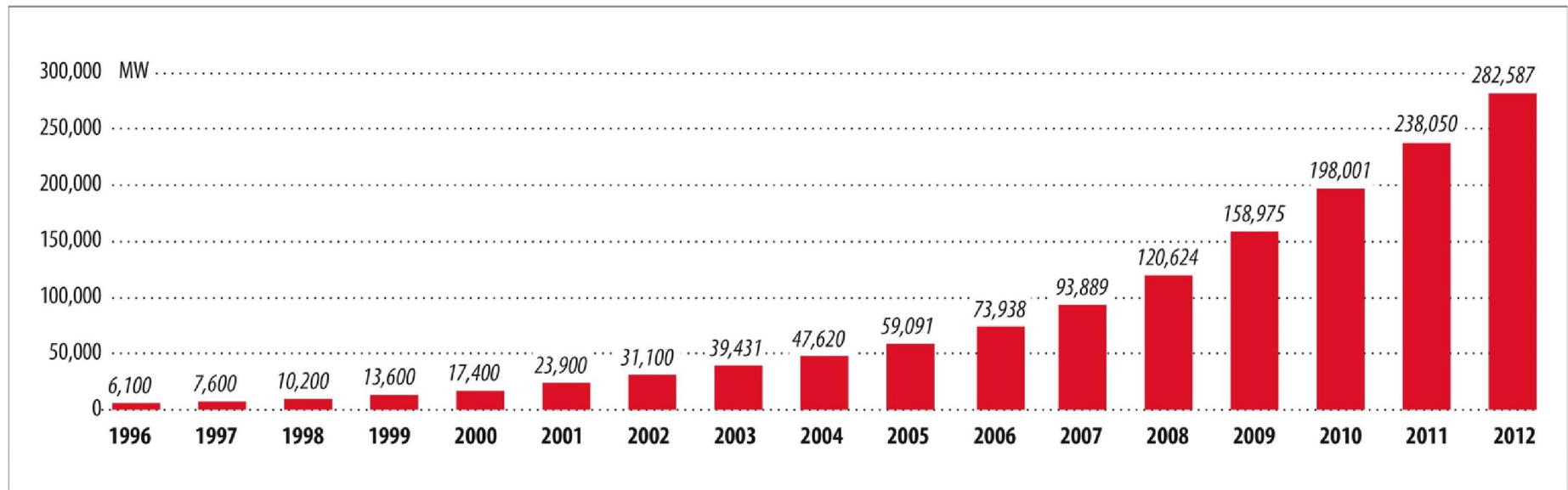


A capacidade instalada de Itaipu é de 14.000 MW. São 20 unidades geradoras de 700 MW cada.
Com apenas uma das 20 unidades geradoras seria possível abastecer uma cidade com 1,5 milhão de habitantes.
Fonte: Itaipu, Junho 2013

Parte 2 – Energia Eólica
Prof. Alex Vilarindo Menezes

Evolução histórica – Cenário mundial atual

Global Cumulative Installed Wind Capacity 1996-2012

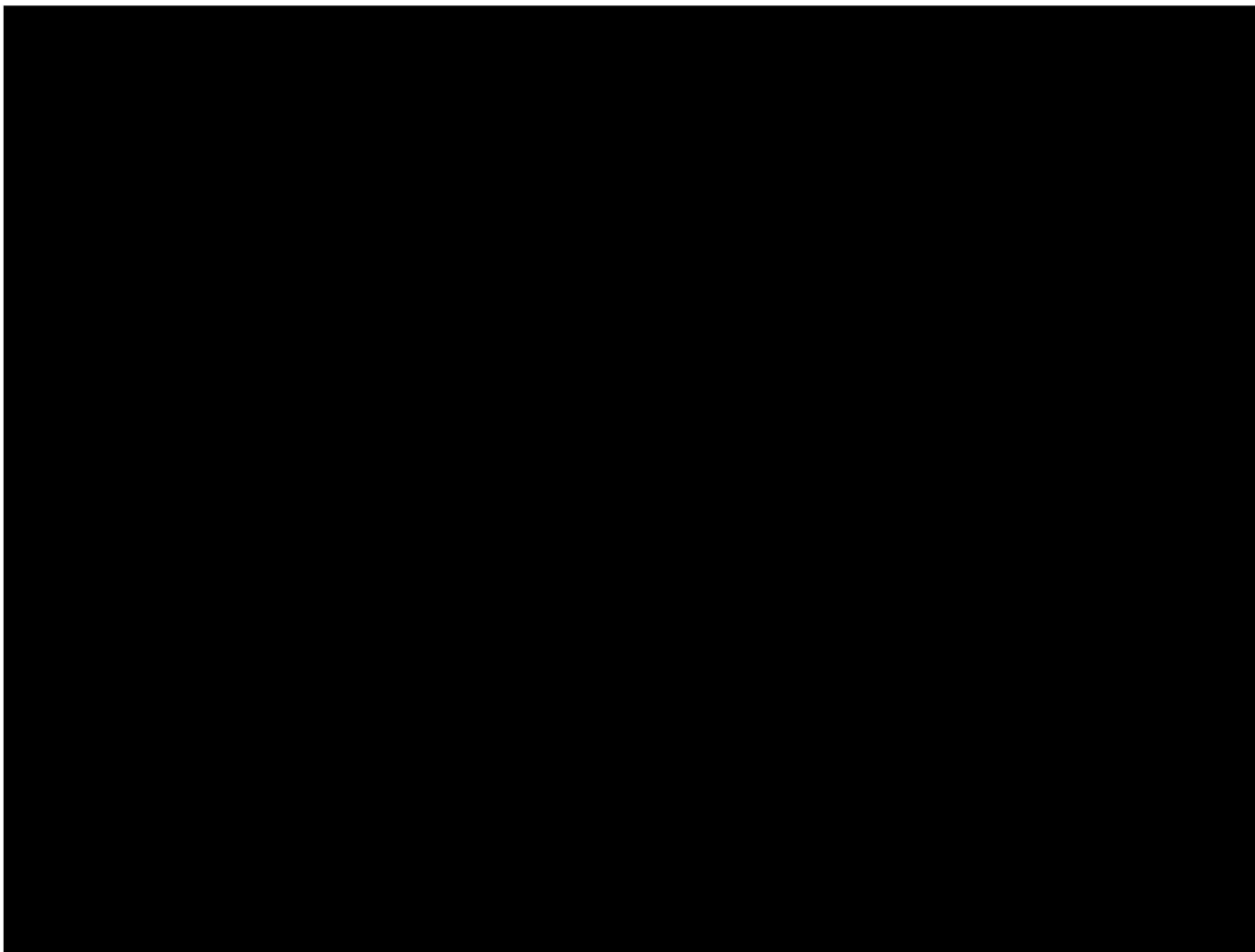


Source: GWEC

Fonte: <http://www.gwec.net/global-figures/graphs/>, Junho 2013

Evolução histórica – Cenário mundial atual

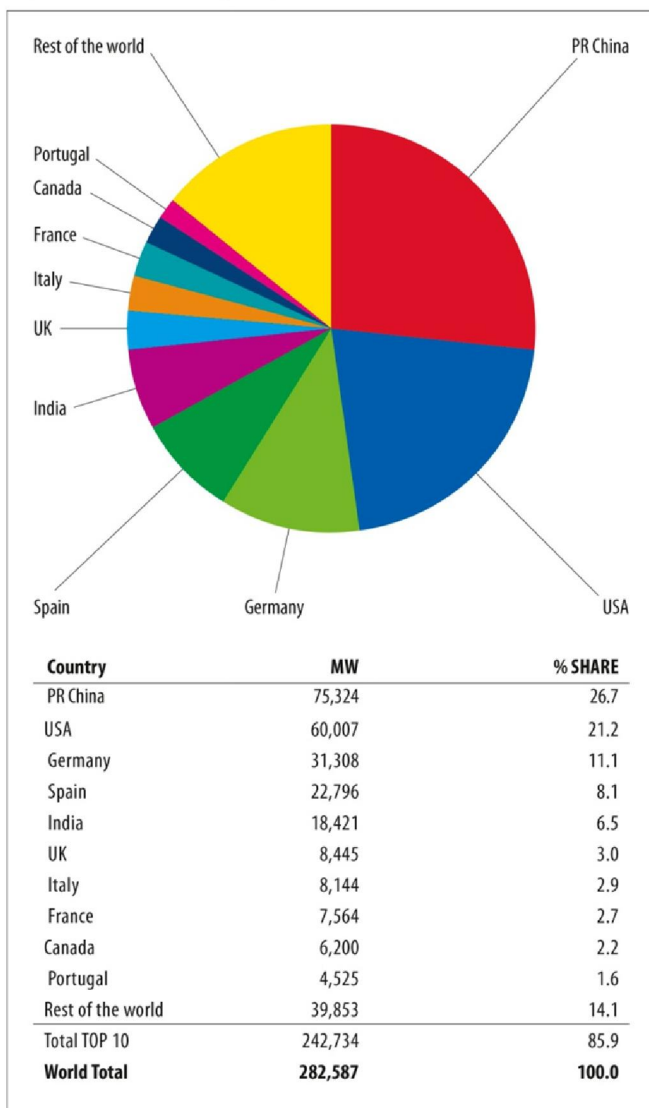
Vídeo breve histórico da energia eólica



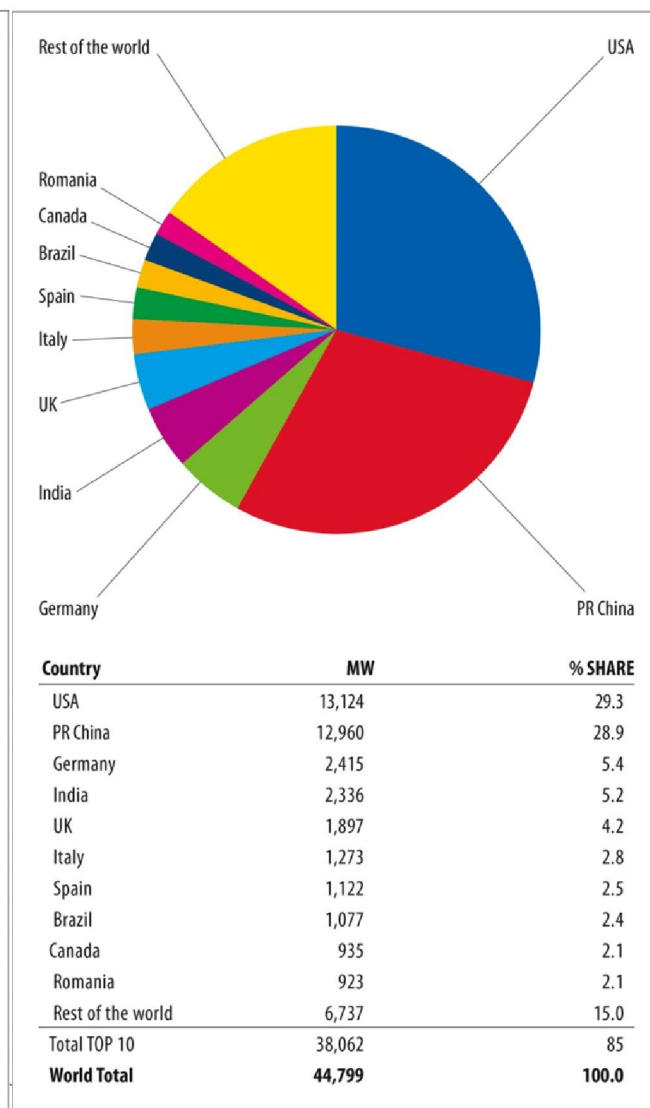
Evolução histórica – Cenário mundial atual

Fonte: <http://www.gwec.net/global-figures/graphs/>, Junho 2013

Top 10 Cumulative Capacity (December 2012)



Top 10 New Installed Capacity (Jan-Dec 2012)



Source: GWEC

Source: GWEC

Evolução histórica – Cenário mundial e nacional

Maior usina eólica do mundo:
Gansu Wind Farm China
5160 MW (Cap. Instalada)

Capacidade instalada de
Itaipu 14000 MW

Maior usina eólica da
américa latina: Complexo
Eólico Alto Sertão I Bahia
293,6 MW (Cap. Instalada)

Garante o consumo de
cerca de 2,16 milhões de
habitantes

Quantos parques eólicos e
hidrelétricas ainda podem
ser construídos no Brasil?

Potencial Eólico Brasileiro
(Atlas Aneel): Estima-se
cerca de 143000 MW



Fonte: <http://www.renovaenergia.com.br/pt-br/nossos-negocios/eolica/paginas/operacao.aspx>, Junho 2013.

Fonte: http://www.chinadaily.com.cn/bizchina/2010-11/04/content_11502951.htm, Junho 2013.

Evolução histórica – Cenário Nacional

10 maiores usinas eólicas em operação

Usina	Potência Fiscalizada (MW)	Destino da Energia	Proprietário	Município
Praia Formosa	105	PIE	100% para Eólica Formosa Geração e Comercialização de Energia S.A.	Camocim - CE
Alegria II	100	PIE	100% para New Energy Options Geração de Energia S/A	Guamaré - RN
Parque Eólico Elebrás Cidreira 1	70	PIE	100% para Elebrás Projetos S.A	Tramandaí - RS
Canoa Quebrada	57	PIE	100% para Bons Ventos Geradora de Energia S.A.	Aracati - CE
Eólica Icaraizinho	54,6	PIE	100% para Eólica Icaraizinho Geração e Comercialização de Energia S.A.	Amontada - CE
Alegria I	51	PIE	100% para New Energy Options Geração de Energia S/A	Guamaré - RN
Bons Ventos	50	PIE	100% para Bons Ventos Geradora de Energia S.A.	Aracati - CE
Parque Eólico de Osório	50	PIE	100% para Ventos do Sul Energia S/A	Osório - RS
Parque Eólico dos Índios	50	PIE	100% para Ventos do Sul Energia S/A	Osório - RS
Parque Eólico Sangradouro	50	PIE	100% para Ventos do Sul Energia S/A	Osório - RS

Produtor Independente de Energia Elétrica - PIE - É a pessoa jurídica ou empresas reunidas em consórcio que recebam concessão ou autorização do poder concedente para produzir energia elétrica destinada ao comércio de toda ou parte da energia produzida, por sua conta e risco.

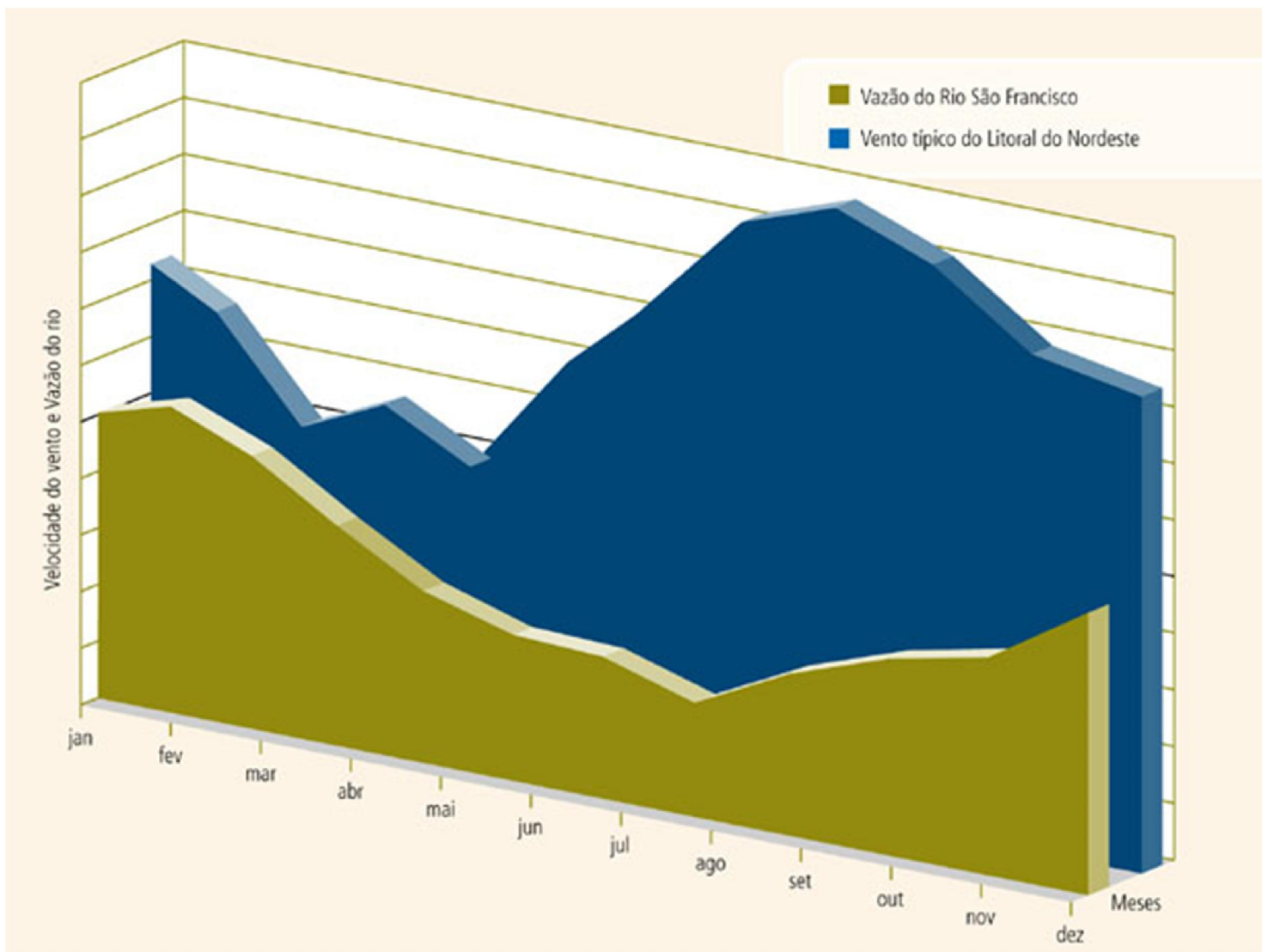
Total de 104 Usinas

2140MW Fiscalizados

15% de Itaipu

Fonte: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoGeracaoTipo.asp?tipo=7&ger=Outros&principal=E%C3%B3lica>, Novembro 2013

Evolução histórica – Cenário Nacional



O vento e suas características

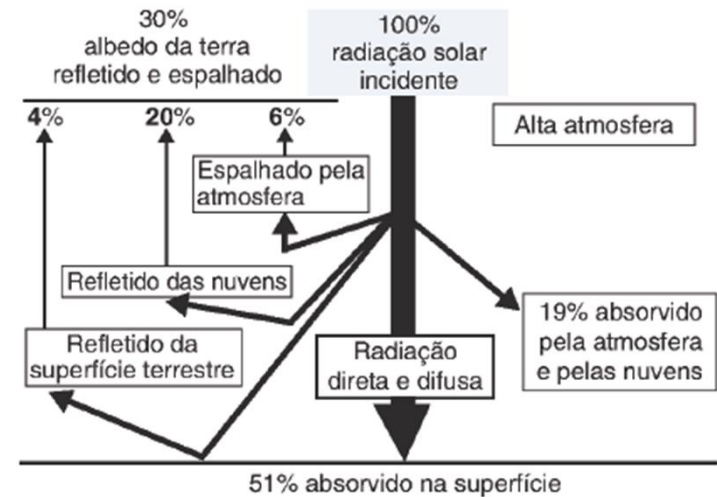
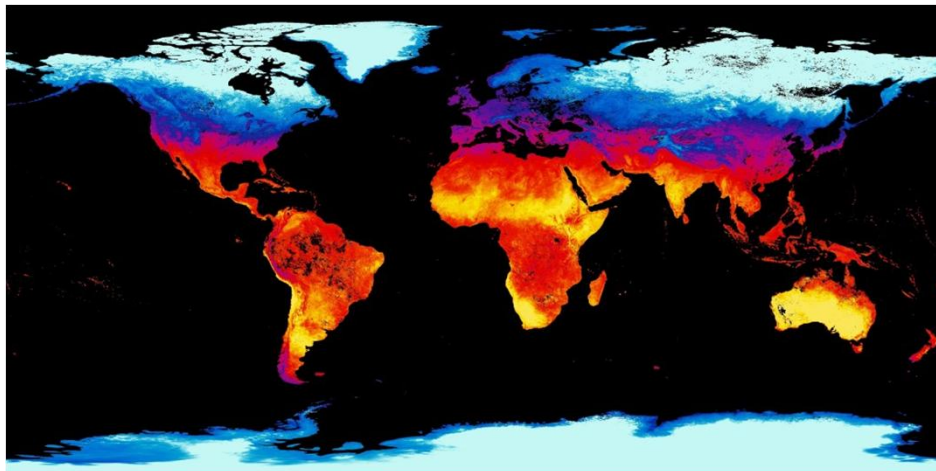


O vento e suas características

O vento é o ar em movimento. Simples assim!

1,96 cal/cm² por min ou 1367 W/m² (Topo da atmosfera)

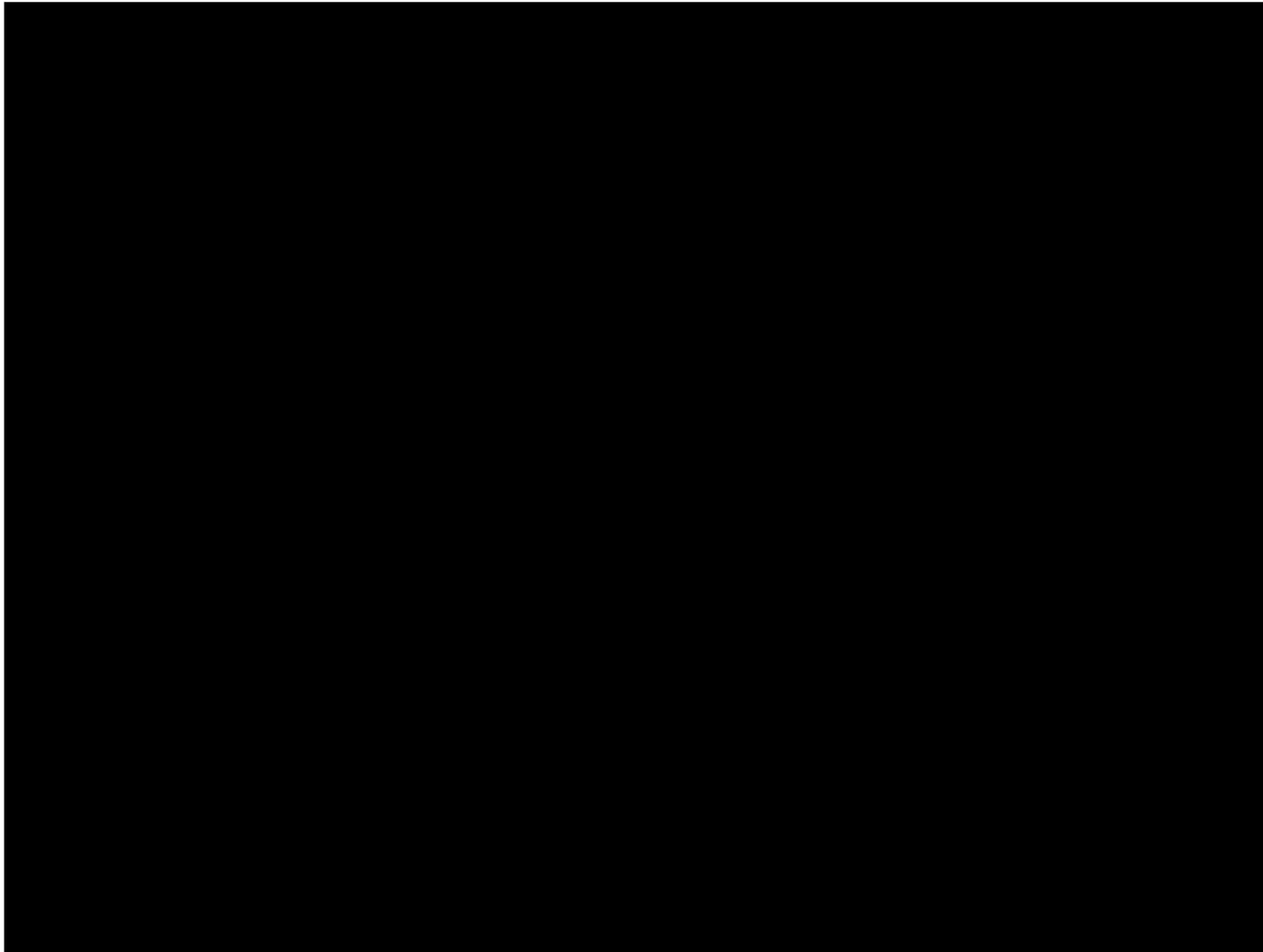
1,58 bilhão de TWh/ano – média de 350 W/m²



Apenas cerca de 3 a 5% da radiação que chega é convertida em energia cinética (vento)

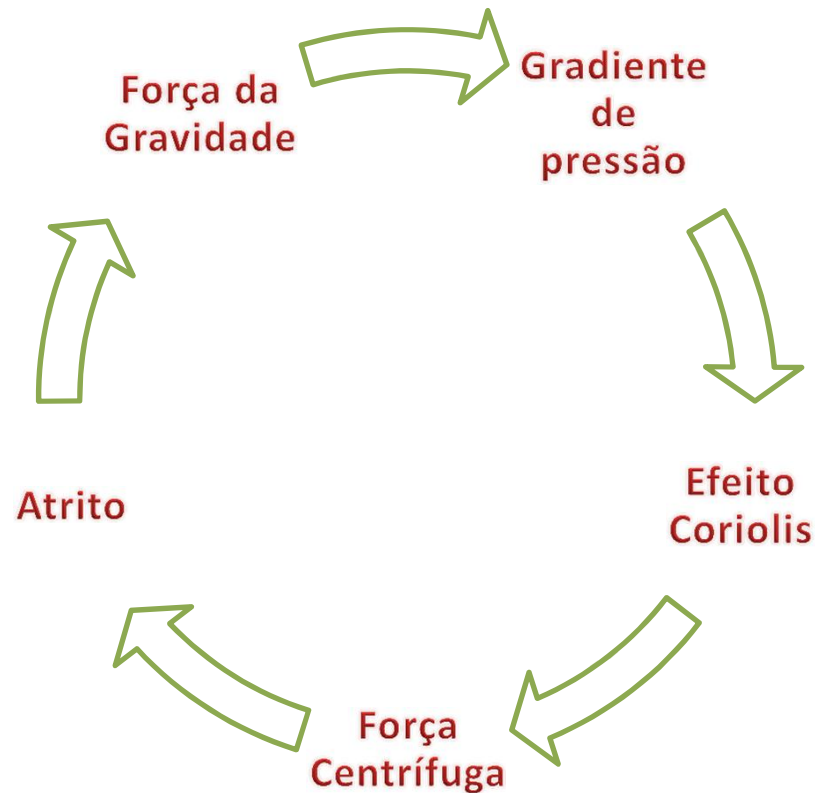
O vento e suas características

Vídeo movimentos na atmosfera



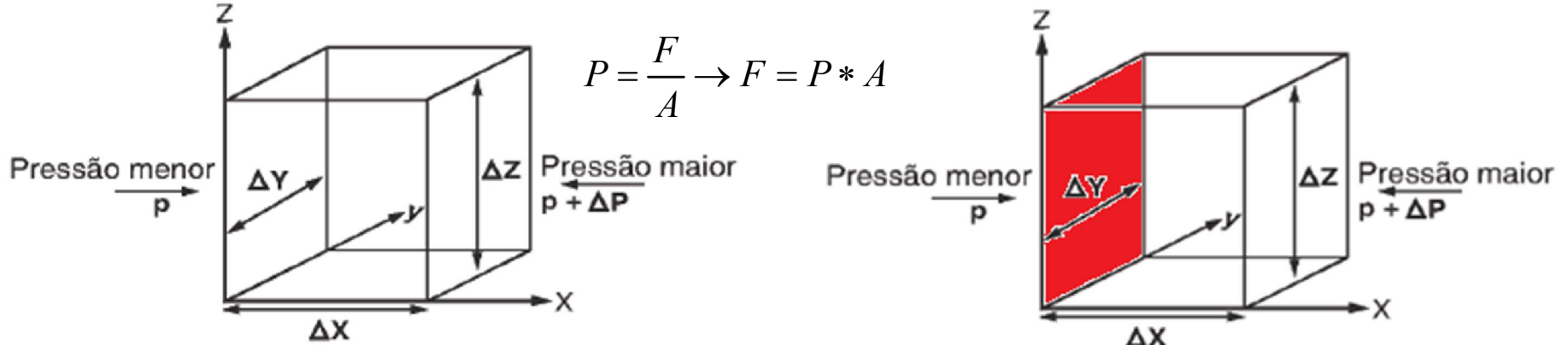
O vento e suas características – Forças envolvidas

✓ O vento é a movimentação das massas de ar na atmosfera, e, para facilitar o estudo, consideramos o vento um **corrente contínua** de parcelas de ar. Há cinco forças atuando sobre as parcelas de ar:



O vento e suas características – Gradiente de pressão

✓ Ocorre um **gradiente de pressão** quando existe uma mudança de pressão do ar de um lugar para o outro. O vetor gradiente indica o sentido e a direção de maior alteração no valor de uma quantidade por unidade de espaço



$$P = \frac{F}{A} \rightarrow F = P * A$$

$$F_{gpx} + F_{p+\Delta p} = F_p$$

$$F_{gpx} = F_p - F_{p+\Delta p}$$

$$F_{gpx} = p\Delta y\Delta z - (p + \Delta p)\Delta y\Delta z$$

$$\Delta p = \left(\frac{\partial p}{\partial x}\right) \Delta x$$

$$F_{gpx} = -\Delta p\Delta y\Delta z = -\left(\frac{\partial p}{\partial x}\right) \Delta x\Delta y\Delta z$$

$$\rho = \frac{m}{V} \rightarrow V = \frac{m}{\rho} \rightarrow \Delta x\Delta y\Delta z = \frac{1}{\rho}$$

$$F_{gpx} = -\left(\frac{\partial p}{\partial x}\right) \left(\frac{1}{\rho}\right)$$

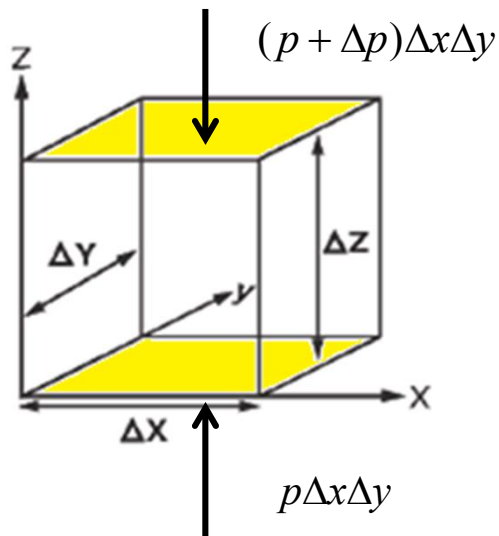
Força resultante do gradiente de pressão por unidade de massa

Parte 2 – Energia Eólica
Prof. Alex Vilarindo Menezes

O vento e suas características – Gradiente de pressão

✓ Gradiente de pressão vertical

$$P = \frac{F}{A} \rightarrow F = P * A$$



$$\Delta p_z = -\rho \cdot g \cdot \Delta z$$

Gradiente de pressão vertical

$$F_{gpz} + F_{p+\Delta p} = F_p$$

$$F_{gpz} = F_p - F_{p+\Delta p}$$

$$F_{gpz} = p\Delta x\Delta y - (p + \Delta p)\Delta x\Delta y$$

$$F_{gpz} = -\Delta p \cdot \Delta x \cdot \Delta y$$

$$F_{gpz} \cdot \Delta z = -\Delta p \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$$

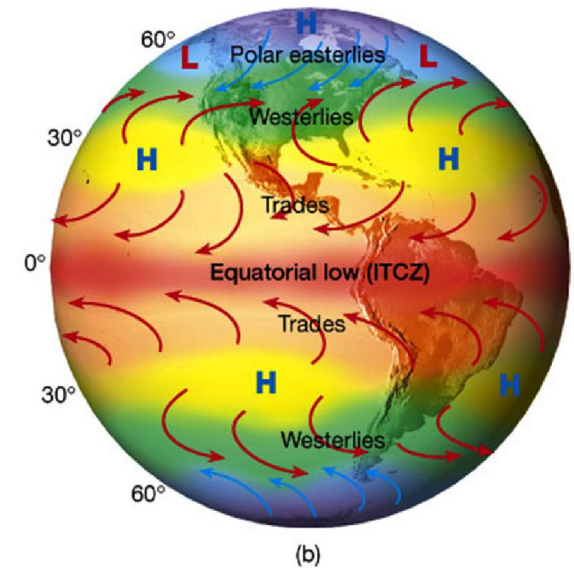
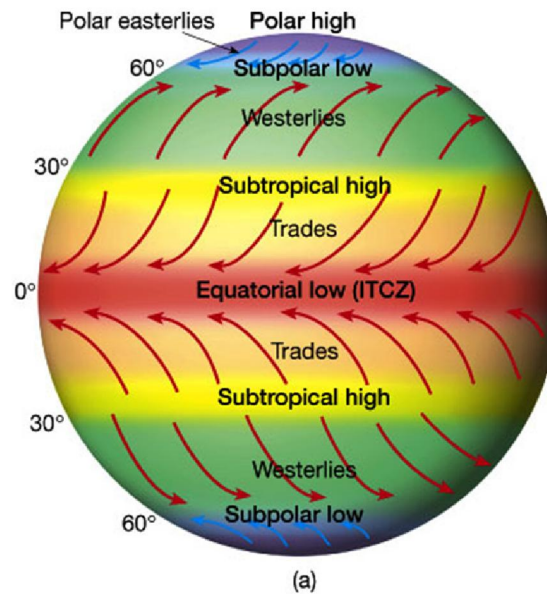
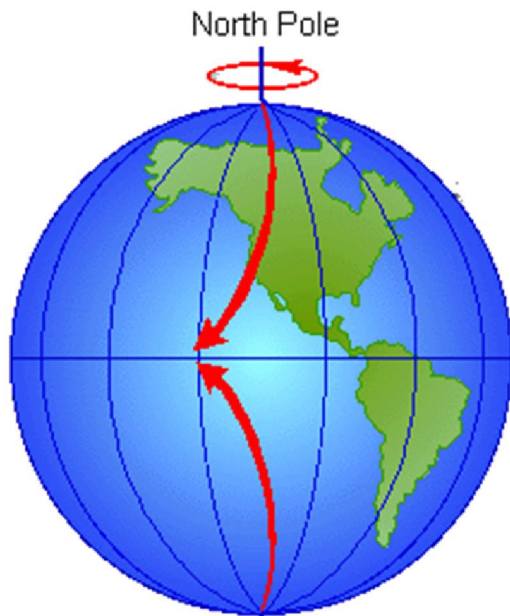
$$\rho = \frac{m}{V} \rightarrow V = \frac{m}{\rho} \rightarrow \Delta x\Delta y\Delta z = \frac{1}{\rho}$$

$$F_{gpz} \cdot \Delta z = -\Delta p \cdot \frac{1}{\rho}$$

$$\Delta p = -\rho \cdot g \cdot \Delta z$$

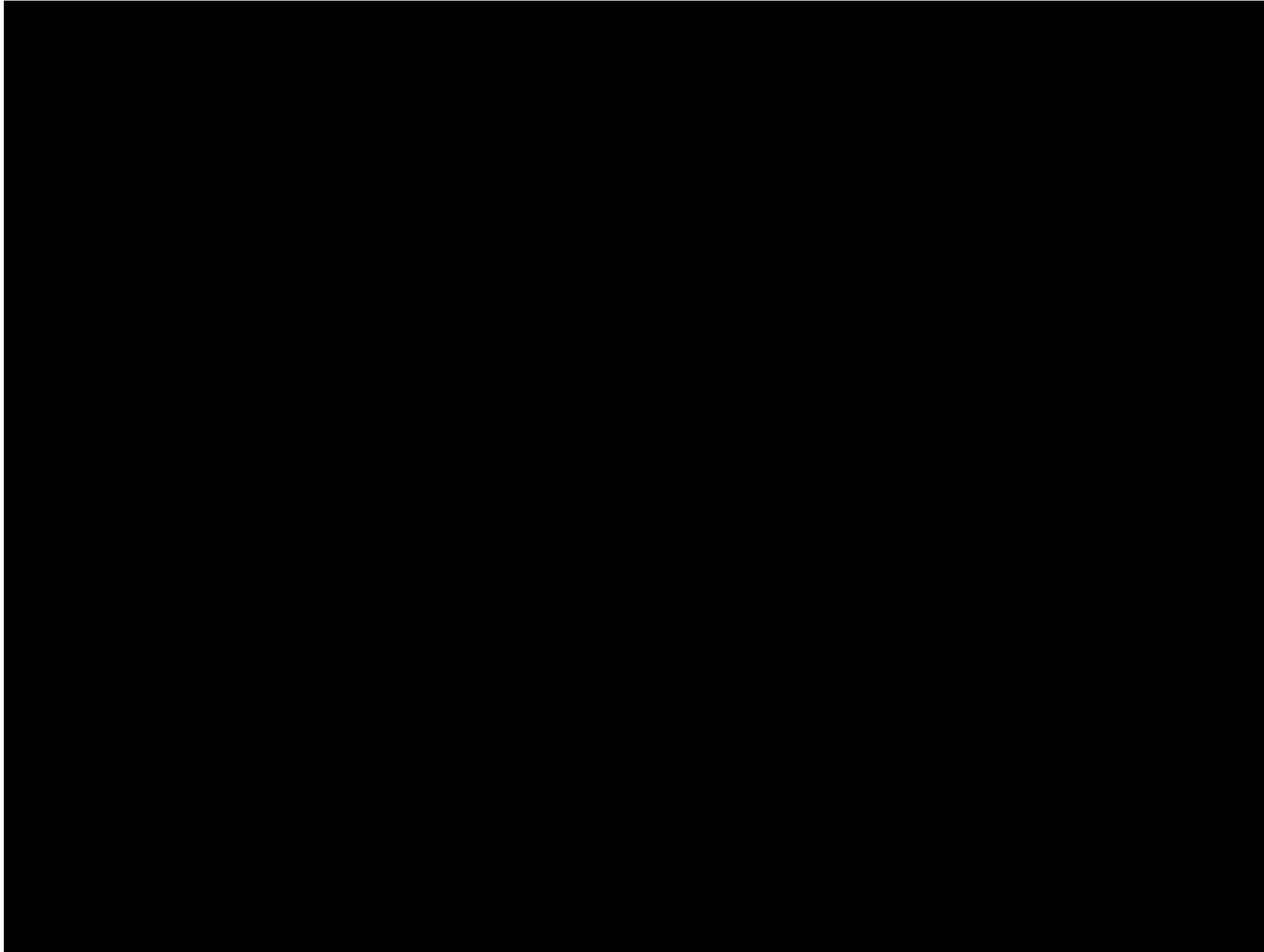
O vento e suas características – Efeito Coriolis

✓ “É uma aceleração aparente que tende a desviar um objeto que se movimenta livremente devido à rotação da terra.”



O vento e suas características – Efeito Coriolis

Video Efeito Coriolis

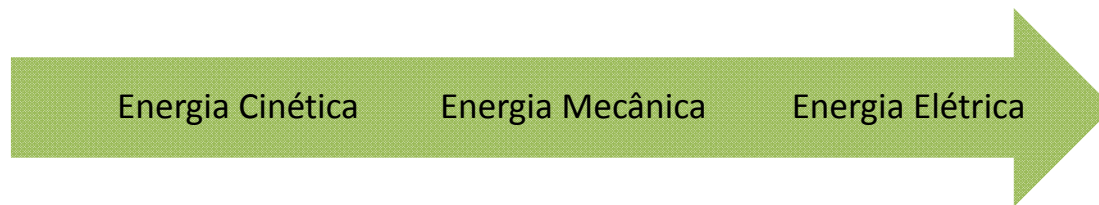


A Energia Eólica



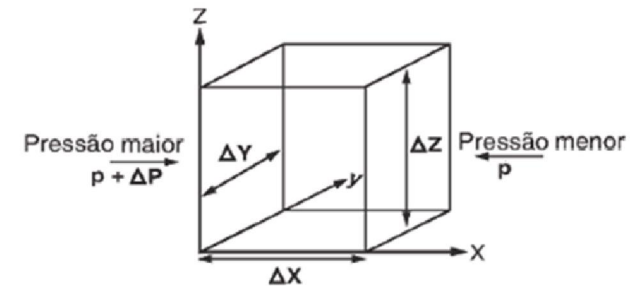
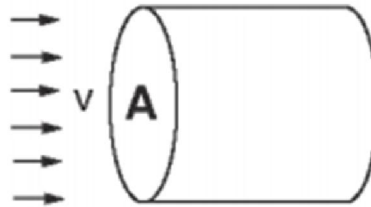
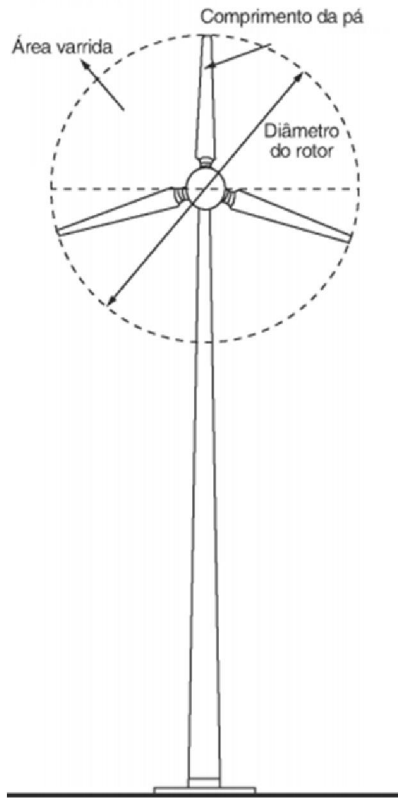
A Energia Eólica

O ar em movimento produz energia!



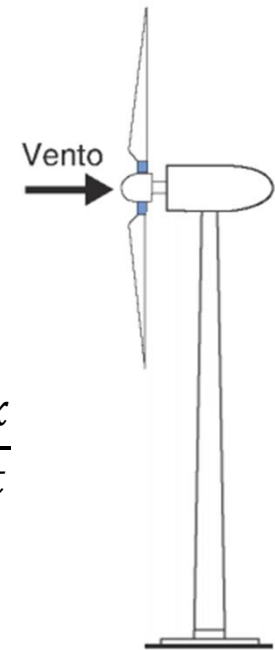
Qual a potência disponível pelo vento?

A Energia Eólica



$$E_c = \frac{1}{2} m v^2$$

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



$$E_c = \frac{1}{2} (\rho V) v^2$$

$$P = \frac{1}{2} (\rho A) v^2 \frac{\partial x}{\partial t}$$

$$E_c = \frac{1}{2} (\rho A \partial x) v^2$$

$$P = \frac{\partial E_c}{\partial t}$$

P – potência disponível no vento (W)
 ρ – massa específica do ar (kg/m³)
 A – área da seção transversal do cilindro que é ultrapassada pelo vento (m²)
 v – velocidade do vento (m/s)

A Energia Eólica – Análise da formulação

Densidade do ar

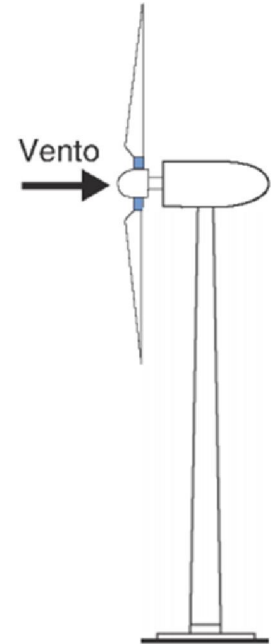
$$PV = nRT$$

$$\frac{P}{RT} = \frac{n}{V}$$

$$\rho = \frac{P_a}{RT}$$

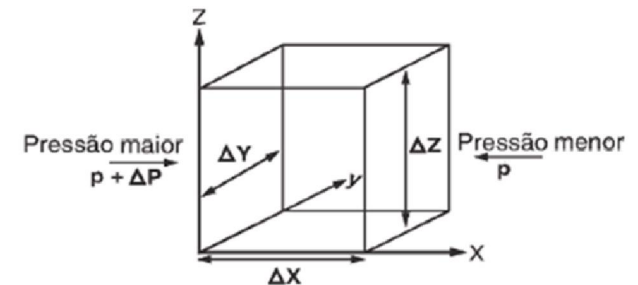
$$\rho = \frac{\left[353,4 \left(1 - \frac{z}{45271} \right) 5,2624 \right]}{273,15 + T}$$

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



- P_a – pressão atmosférica (Pa)
- ρ – massa específica do ar (kg/m^3)
- V – Volume do ar (m^3)
- R – constante do fluido - ar ($287\text{J}/(\text{Kg.K})$)
- z – altitude do local (m)
- T – temperatura do ambiente ($^{\circ}\text{C}$)

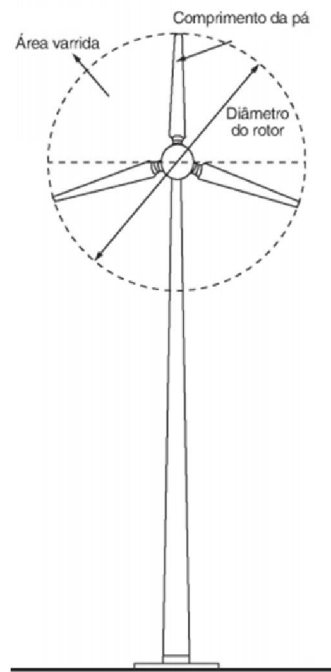
Para 15°C e 1013hPa (101325 Pa) a massa específica do ar é de aproximadamente $1,225\text{ kg/m}^3$.



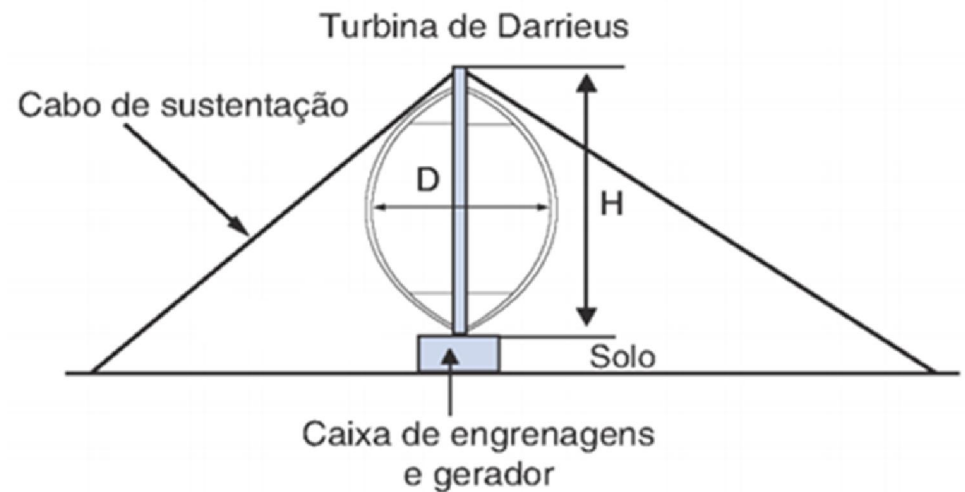
A Energia Eólica – Análise da formulação

Área varrida pelo rotor

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



$$A \cong \frac{2}{3} DH$$



A Energia Eólica – Análise da formulação

Velocidade do vento

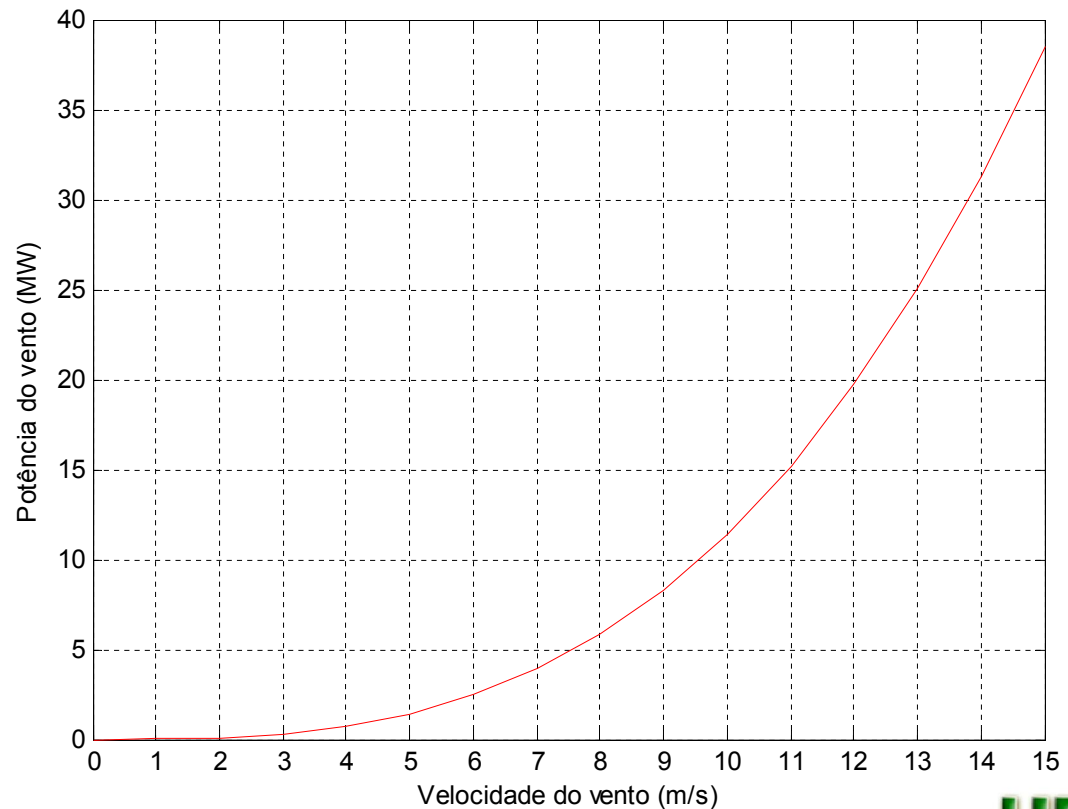
Considerando a maior turbina eólica do mundo - Siemens:

$A = 18.626,5 \text{ m}^2$ ($D = 154 \text{ m} - 6 \text{ MW}$)

$\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$

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

Velocidade do vento (m/s)	Potência (MW)
0	0,00
1	0,01
2	0,09
3	0,31
4	0,73
5	1,43
6	2,46
7	3,91
8	5,84
9	8,32
10	11,41
11	15,19
12	19,71
13	25,06
14	31,31
15	38,50



A Energia Eólica – Análise da formulação

Velocidade do vento

Relação não-linear do vento (Potência x Velocidade):

$$E = P * \Delta t = \frac{1}{2} \rho A v^3 * t$$

Situação 1: 100 Horas de vento a 6 m/s

$$E_1 = \frac{1}{2} * 1,225 * 18626,5 * 6^3 * 100 = 246,43 \text{ MWh}$$

Situação 2: 50 horas de vento a 3 m/s mais 50 horas de vento a 9 m/s

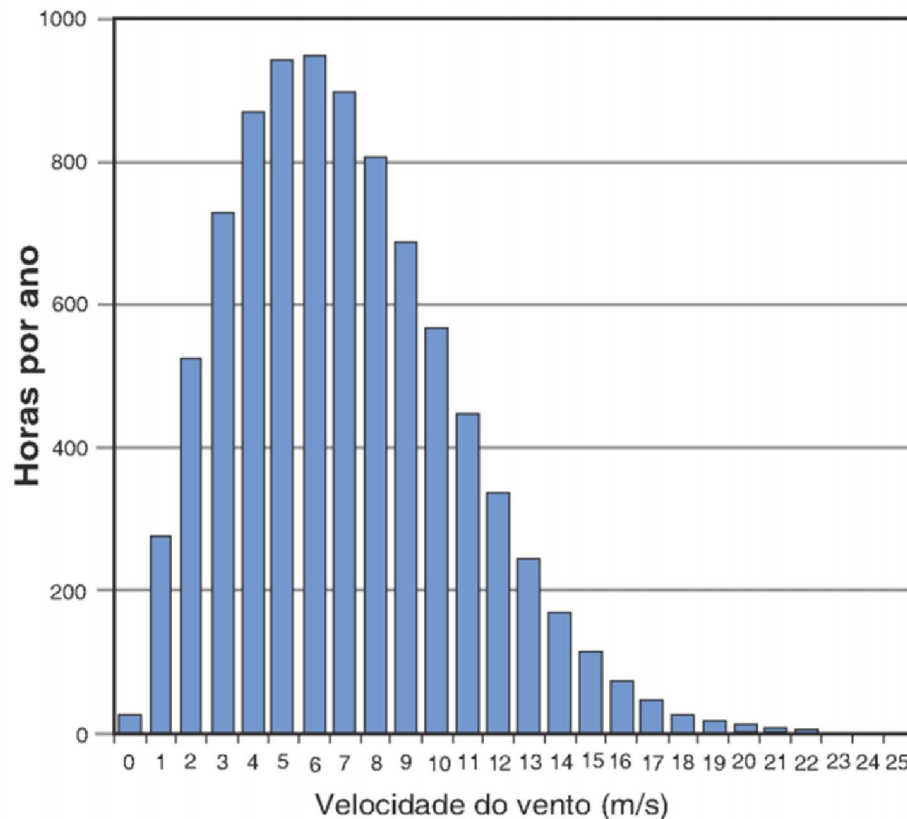
$$E_2 = \frac{1}{2} * 1,225 * 18626,5 * 3^3 * 50 + \frac{1}{2} * 1,225 * 18626,5 * 9^3 * 50 = 431,25 \text{ MWh}$$

Diferença de 75%

A Energia Eólica – Natureza estocástica do vento

O vento tem características estocásticas e sua velocidade é uma variável aleatória contínua!

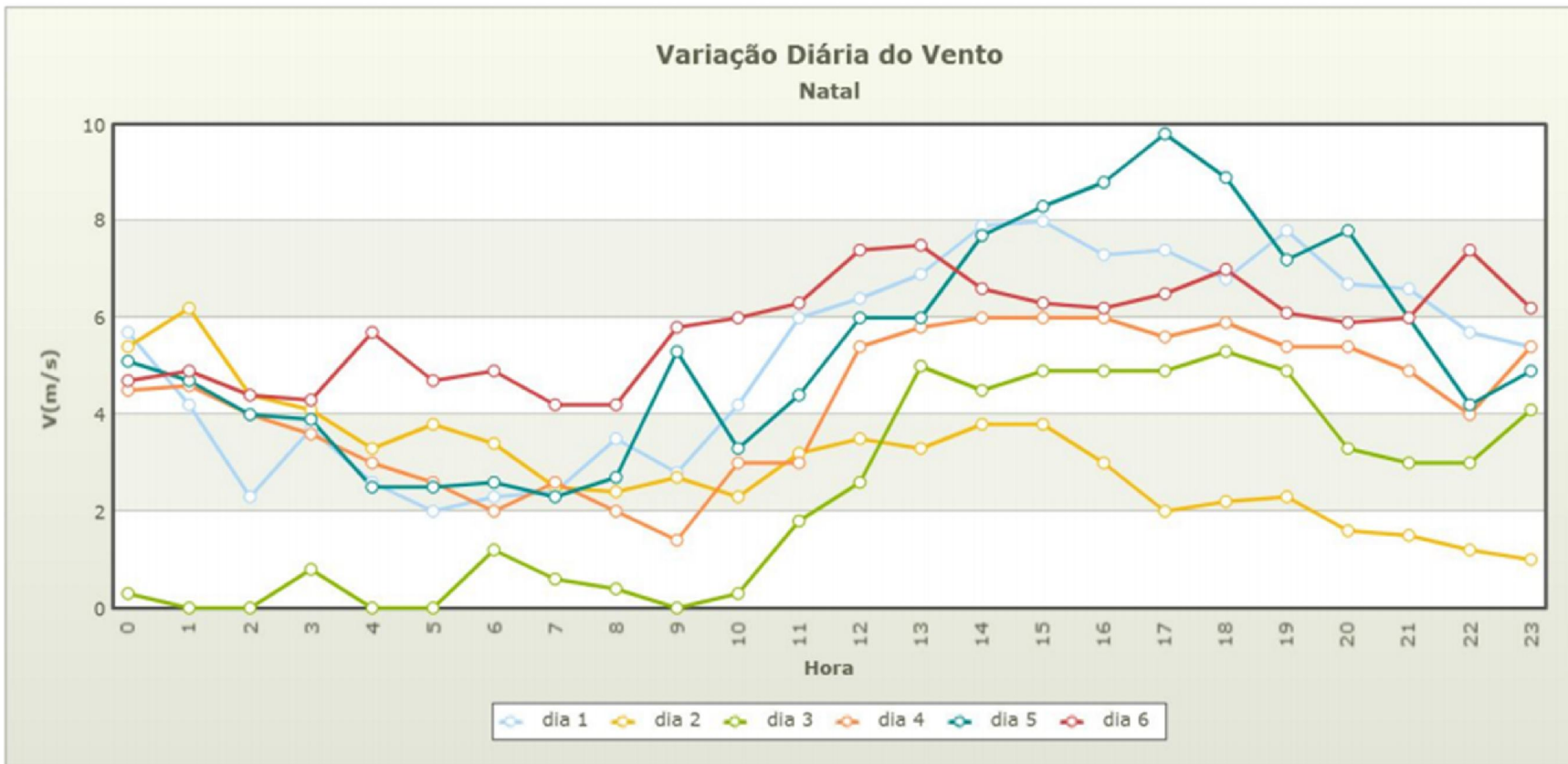
v (m/s)	Horas/ano
0	24
1	276
2	527
3	729
4	869
5	941
6	946
7	896
8	805
9	690
10	565
11	444
12	335
13	243
14	170
15	114
16	74
17	46
18	28
19	16
20	9
21	5
22	3
23	1
24	1
25	0
Total de horas	8.760



$$v = \int_0^{\infty} f(v)dv$$

Função densidade de probabilidade

A Energia Eólica – Natureza estocástica do vento



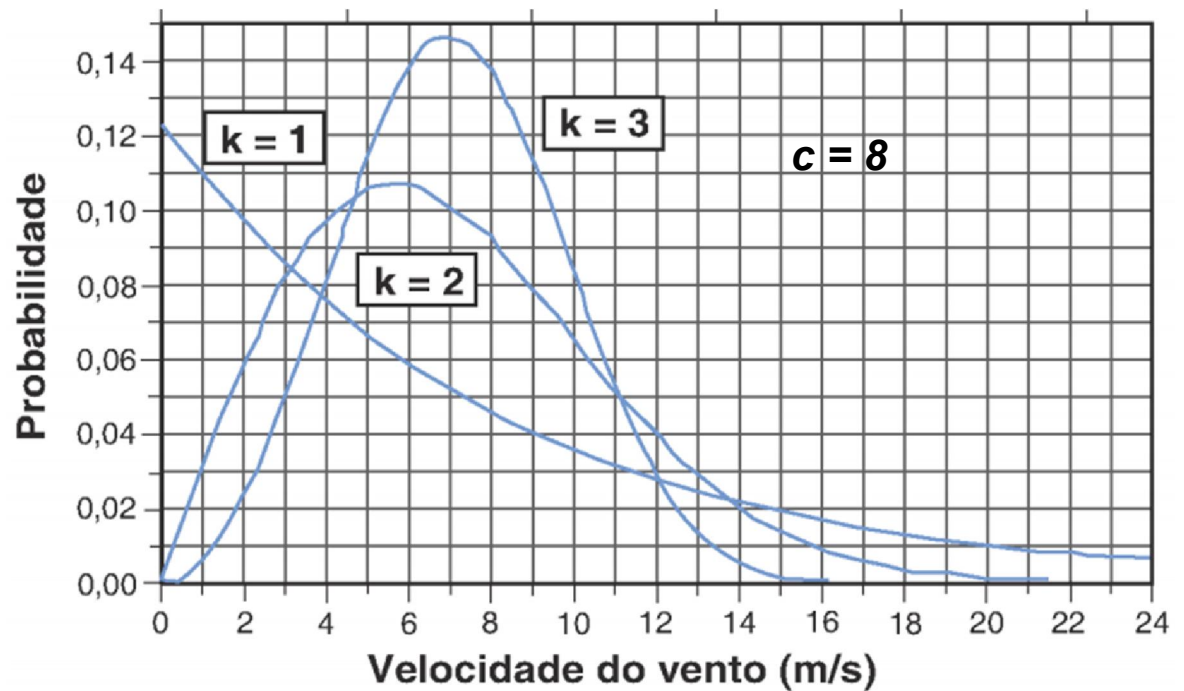
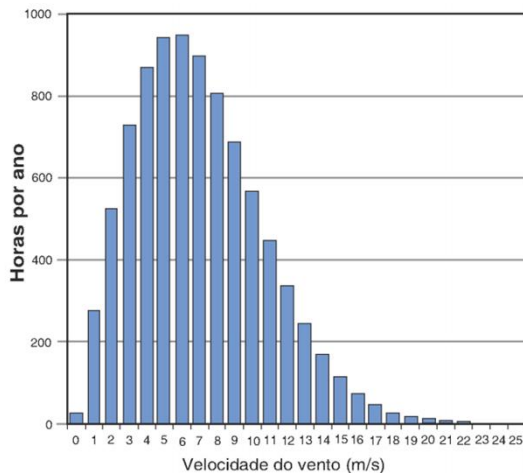
A Energia Eólica – Natureza estocástica do vento

A função de densidade de probabilidade que mais se ajusta à distribuição do vento é chamada de *distribuição de Weibull*.

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}$$

k – fator de forma (m/s)

c – fator de escala



A Energia Eólica – Natureza estocástica do vento

A função de densidade de probabilidade que mais se ajusta à distribuição do vento é chamada de *distribuição de Weibull*.

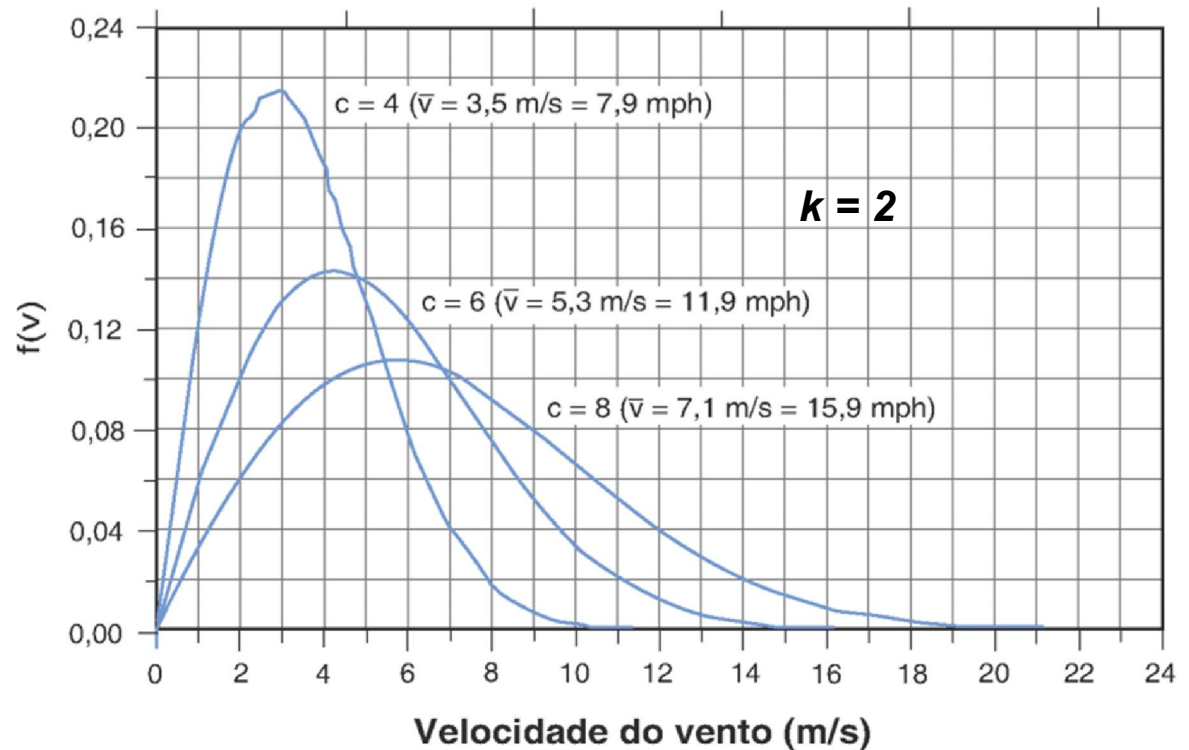
$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}$$

k – fator de forma (m/s)

c – fator de escala

k = 2 (Distribuição de Rayleigh)

$$f(v) = \left(\frac{2v}{c^2}\right) e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^2}$$



A Energia Eólica – Natureza estocástica do vento

A função de densidade de probabilidade que mais se ajusta à distribuição do vento é chamada de *distribuição de Weibull*.

$$f(v) = \left(\frac{2v}{c^2}\right) e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^2} \quad (1)$$

k = 2 (Distribuição de Rayleigh)

$$\bar{v} = \int v * f(v) dv \quad (2)$$

Aplicando (1) em (2):

$$\bar{v} = \int v * \left(\frac{2v}{c^2}\right) e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^2} dv$$

$$\bar{v} = \frac{2}{c^2} \int v^2 e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^2} dv$$

$$\bar{v} \cong \frac{\sqrt{\pi}}{2} c \cong 0,886c \quad (3)$$

Alternativamente:

$$c \cong \frac{2}{\sqrt{\pi}} \bar{v} \cong 1,128\bar{v} \quad (4)$$

Aplicando (4) em (1):

$$f(v) = \left(\frac{2v}{\left(\frac{2}{\sqrt{\pi}}\bar{v}\right)^2}\right) e^{-\left(\frac{v}{\frac{2}{\sqrt{\pi}}\bar{v}}\right)^2}$$

$$f(v) = \left(\frac{\pi v}{2\bar{v}^2}\right) e^{\left(-\frac{\pi}{4}\right)\left(\frac{v}{\bar{v}}\right)^2} \quad (5)$$

A Energia Eólica – Natureza estocástica do vento

Localização: Echaporã
 Altura da torre: 75 m
 Período da coleta de dados
 de 01/04/2010 a 31/03/2011



Torre Anemométrica ASP01



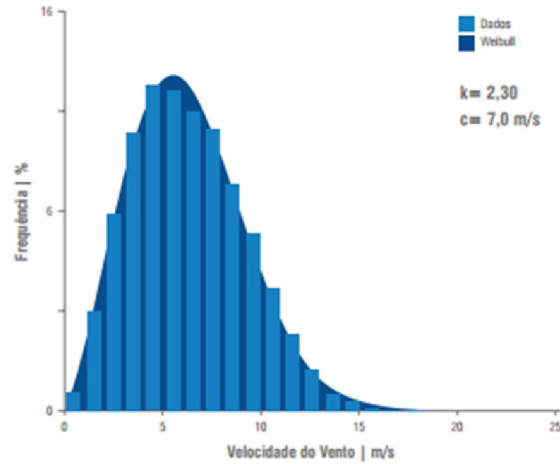
Paisagem do local de instalação

Parâmetros Eólicos	50 m	75 m
Velocidade Média	5,78 m/s	6,26 m/s
Desvio Padrão	0,45 m/s	0,44 m/s
Fator de Forma de Weibull, k	2,30	2,30
Fator de Escala de Weibull, c	6,48 m/s	7,01 m/s

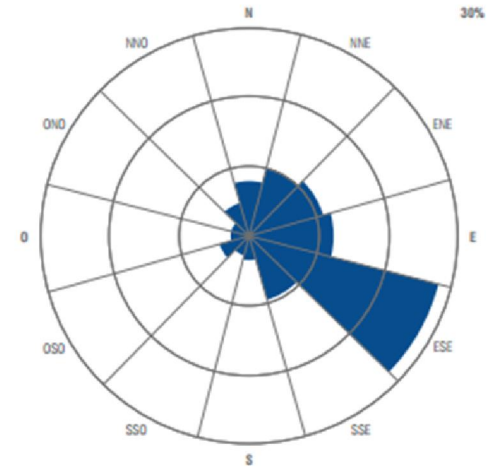
Parâmetros Meteorológicos	
Temperatura Média	24,0 °C
Umidade Relativa do Ar Média	66,5 %
Pressão Atmosférica Média	946 mbar

Taxa de dados válidos	Altura	%
Anemômetro	50 m	82,72%
Anemômetro	75 m	82,72%
Sensor de Direção	50 m	82,72%
Sensor de Direção	75 m	82,72%

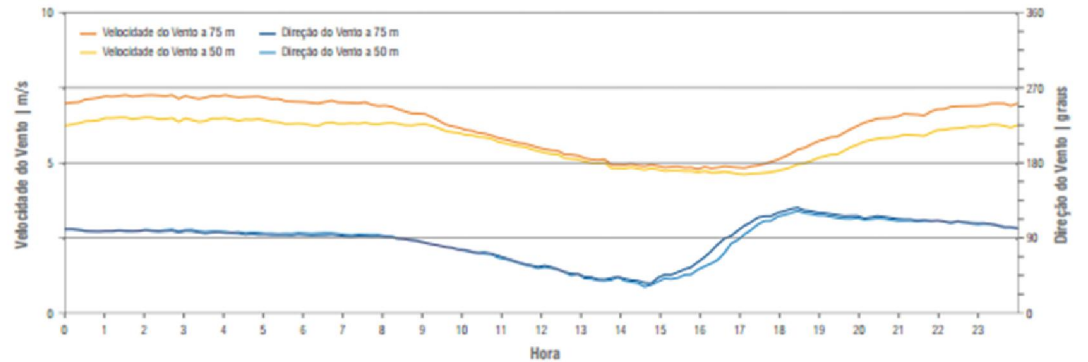
VELOCIDADE DE VENTO E DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL



ROSA DOS VENTOS



VARIAÇÃO DIÁRIA MÉDIA DE VELOCIDADE E DIREÇÃO DE VENTO



A Energia Eólica – Natureza estocástica do vento

Localização: Avaré
 Altura da torre: 75 m
 Período da coleta de dados de 01/04/2010 a 31/03/2011



Torre Anemométrica ASP02



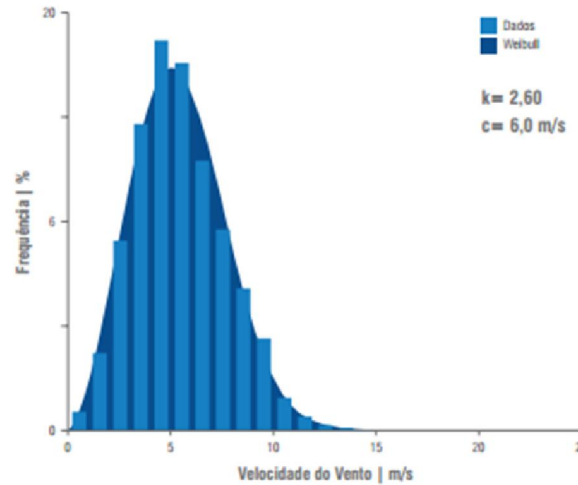
Paisagem do local de instalação

Parâmetros Eólicos	50 m	75 m
Velocidade Média	4,91 m/s	5,38 m/s
Desvio Padrão	0,40 m/s	0,46 m/s
Fator de Forma de Weibull, k	2,40	2,60
Fator de Escala de Weibull, c	5,52 m/s	6,05 m/s

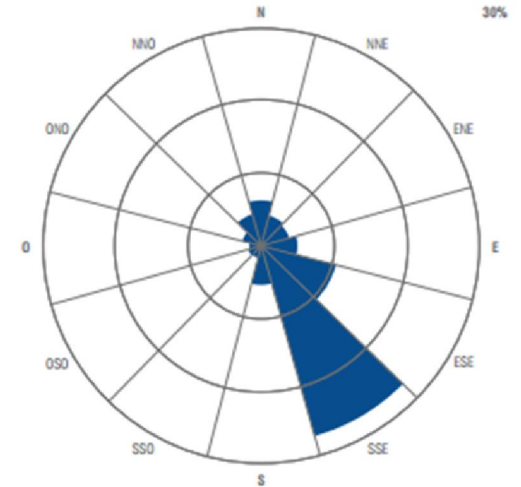
Parâmetros Meteorológicos	
Temperatura Média	21,9 °C
Umidade Relativa do Ar Média	73,4 %
Pressão Atmosférica Média	924 mbar

Taxa de dados válidos	Altura	%
Anemômetro	50 m	87,40%
Anemômetro	75 m	87,40%
Sensor de Direção	50 m	87,40%
Sensor de Direção	75 m	87,40%

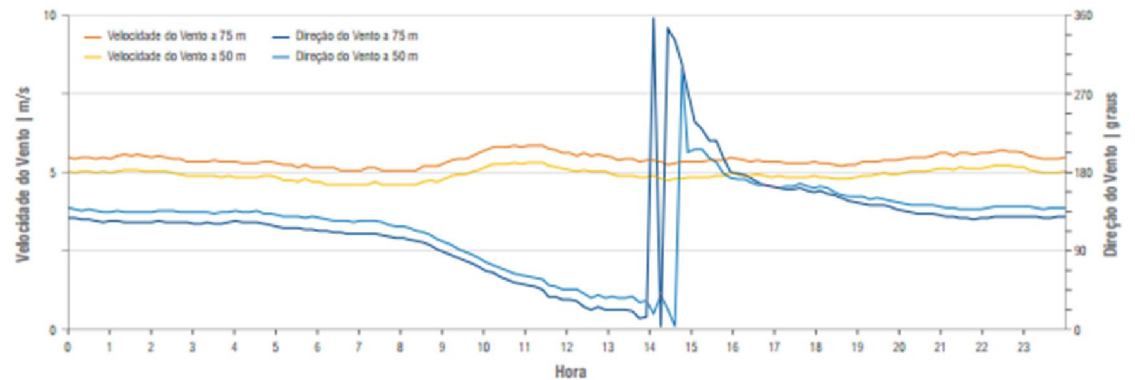
VELOCIDADE DE VENTO E DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL



ROSA DOS VENTOS



VARIAÇÃO DIÁRIA MÉDIA DE VELOCIDADE E DIREÇÃO DE VENTO



A Energia Eólica – Natureza estocástica do vento

Localização: Alto da Serra / Henry Borden
 Altura da torre: 50 m
 Período da coleta de dados
 de 01/05/2008 a 30/04/2009



Torre Anemométrica ASP08



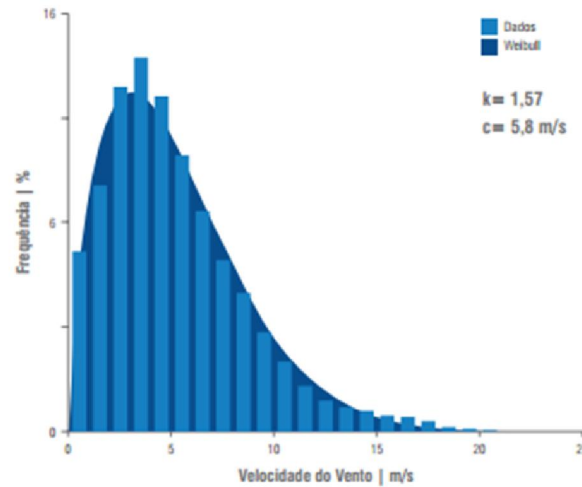
Paisagem do local de instalação

Parâmetros Eólicos	40 m	50 m
Velocidade Média	4,98 m/s	5,11 m/s
Desvio Padrão	0,72 m/s	0,66 m/s
Fator de Forma de Weibull, k	1,58	1,57
Fator de Escala de Weibull, c	5,66 m/s	5,83 m/s

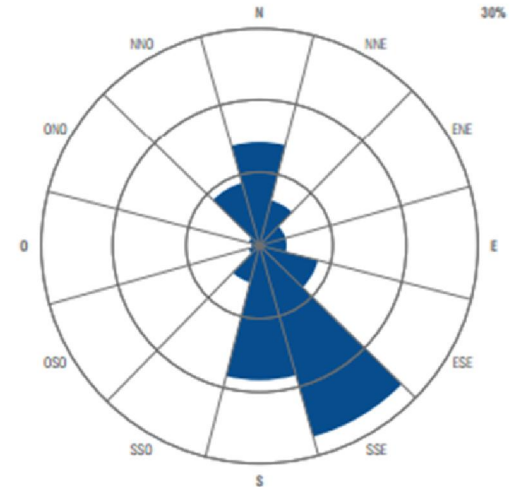
Parâmetros Meteorológicos	
Temperatura Média	18,3 °C
Umidade Relativa do Ar Média	76,2 %
Pressão Atmosférica Média	-

Taxa de dados válidos	Altura	%
Anemômetro	40 m	99,55%
Anemômetro	50 m	99,55%
Sensor de Direção	40 m	99,55%
Sensor de Direção	50 m	99,55%

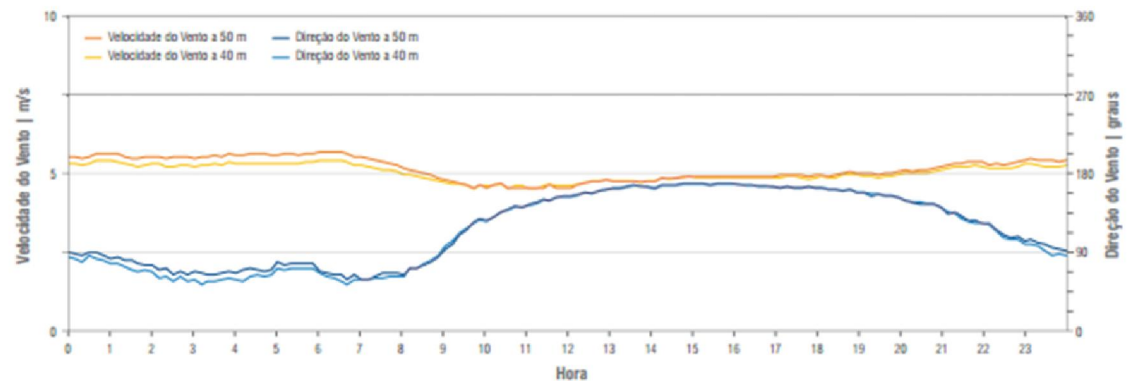
VELOCIDADE DE VENTO E DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL



ROSA DOS VENTOS



VARIAÇÃO DIÁRIA MÉDIA DE VELOCIDADE E DIREÇÃO DE VENTO



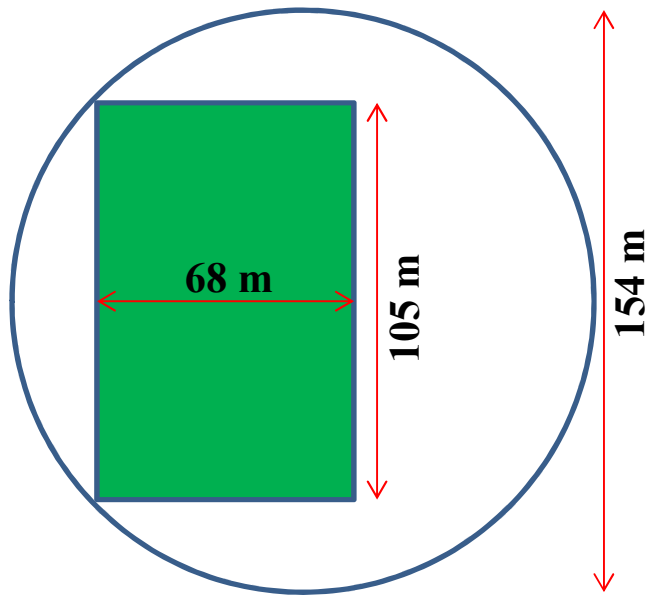
Turbinas Eólicas



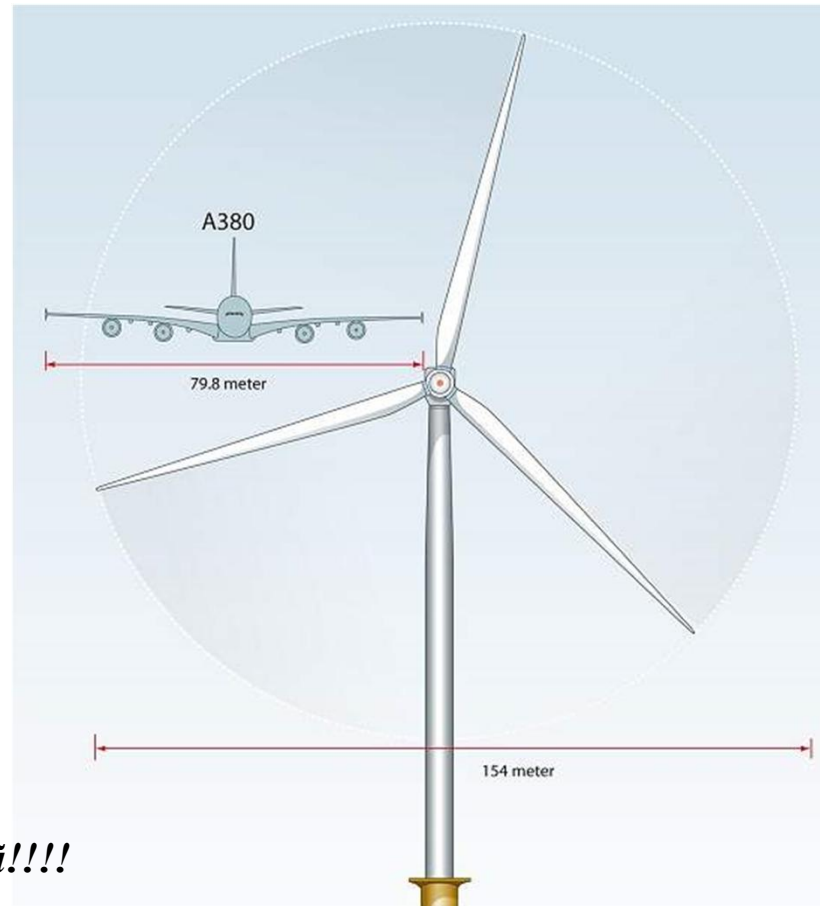
Turbinas Eólicas

* Suficiente para 5500 residências

A maior turbina eólica do mundo - Siemens:
 $A = 18.626,5 \text{ m}^2$ ($D = 154 \text{ m} - 6 \text{ MW}^*$)
 $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$

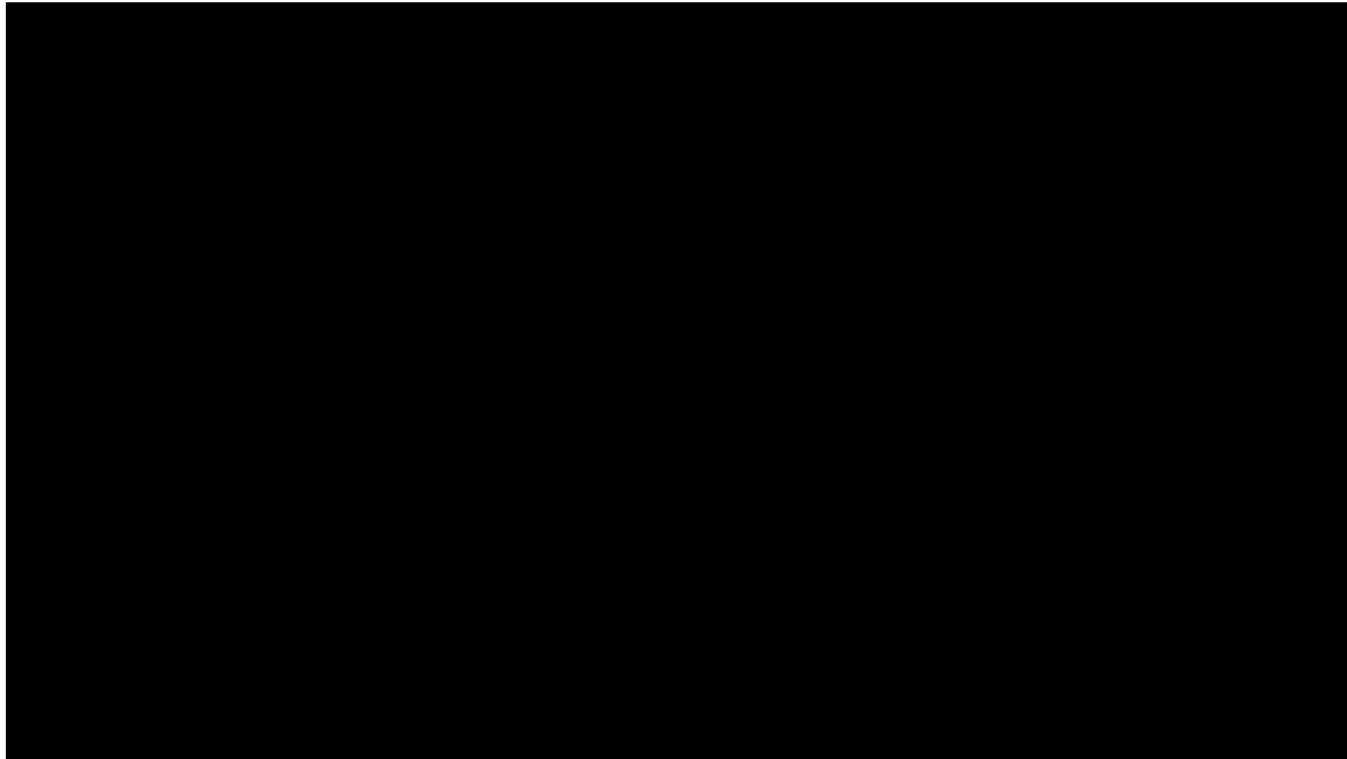


2,6 vezes a área do gramado do Maracanã!!!!



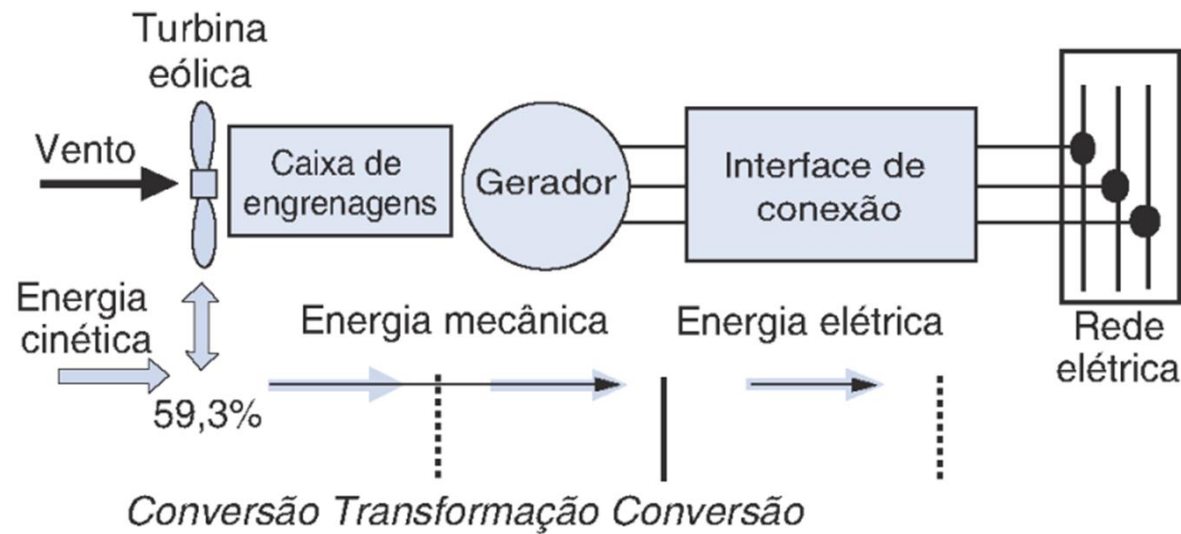
Turbinas Eólicas

Vídeo – Maior turbina eólica do mundo (SIEMENS)



Turbinas Eólicas

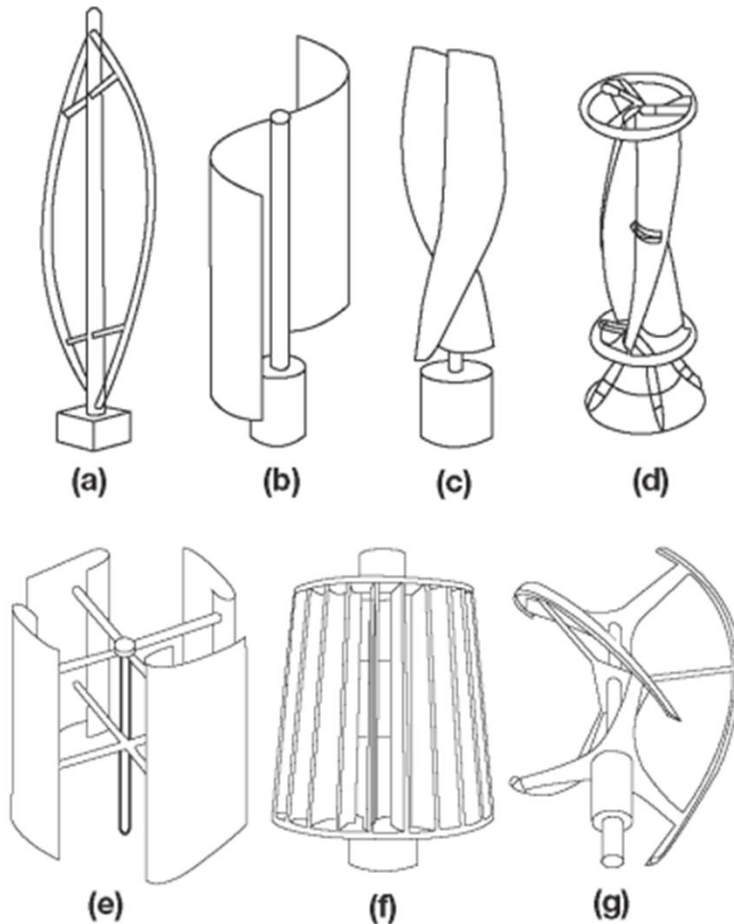
*Turbinas eólicas são equipamentos que absorvem **parte** da energia cinética do vento!*



*Elas podem ser de **eixo vertical** ou **eixo horizontal**!*

Turbinas Eólicas – Classificação das turbinas eólicas

Eixo vertical



(a) *Darrieus*

(b) *Savonius*

(c) *Solarwind*

(d) *Helicoidal*

(e) *Noguchi*

(f) *Maglev*

(g) *Cochrane*

Turbinas Eólicas – Classificação das turbinas eólicas

Vídeo – Turbinas de eixo vertical



Turbinas Eólicas – Classificação das turbinas eólicas

Eixo vertical – Turbina de Darrieus

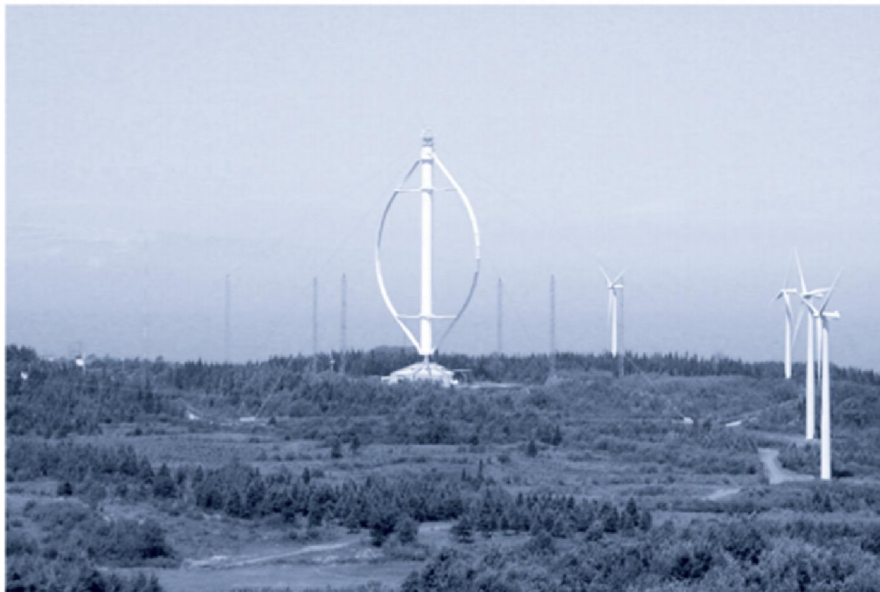
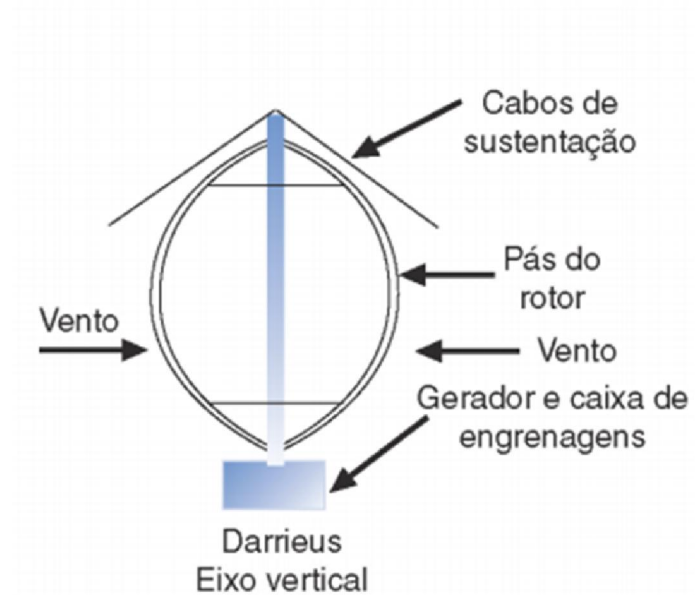


FIGURA 6.5 Turbina de Darrieus no parque eólico canadense de Le Nordais.



Turbinas Eólicas – Classificação das turbinas eólicas

Eixo vertical – Turbina de Savonius

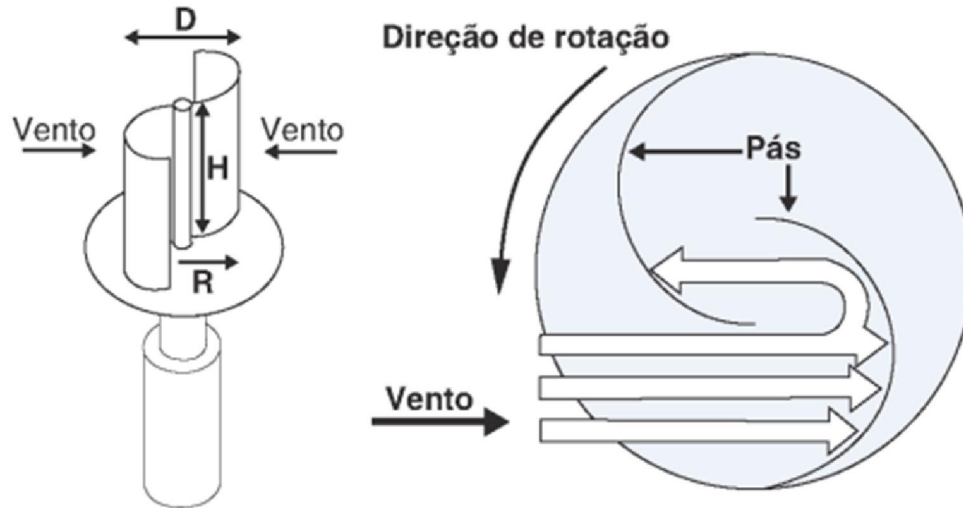
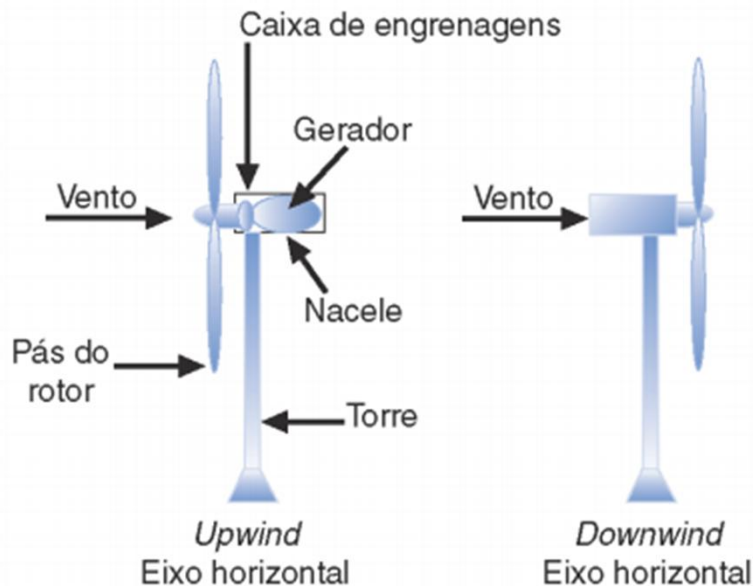


FIGURA 6.10 Turbinas híbridas Savonius-Darrieus na cidade chinesa de Jinguashi, em Taiwan.

Turbinas Eólicas – Classificação das turbinas eólicas

Eixo horizontal



Características:

- *A velocidade do rotor e a saída de potência podem ser controladas pelo controle do ângulo das pás; e*
- *O formato das pás do rotor pode ser otimizado aerodinamicamente, e foi provado que ele alcança sua eficiência máxima quando a sustentação aerodinâmica é levada ao nível máximo.*

Vantagens:

- *Acesso a ventos maiores velocidades por causa da altura da torre;*
- *Melhor controle devido ao ajuste do ângulo de passo; e*
- *Alta eficiência, uma vez que as pás encaram perpendicularmente o vento.*

Desvantagens:

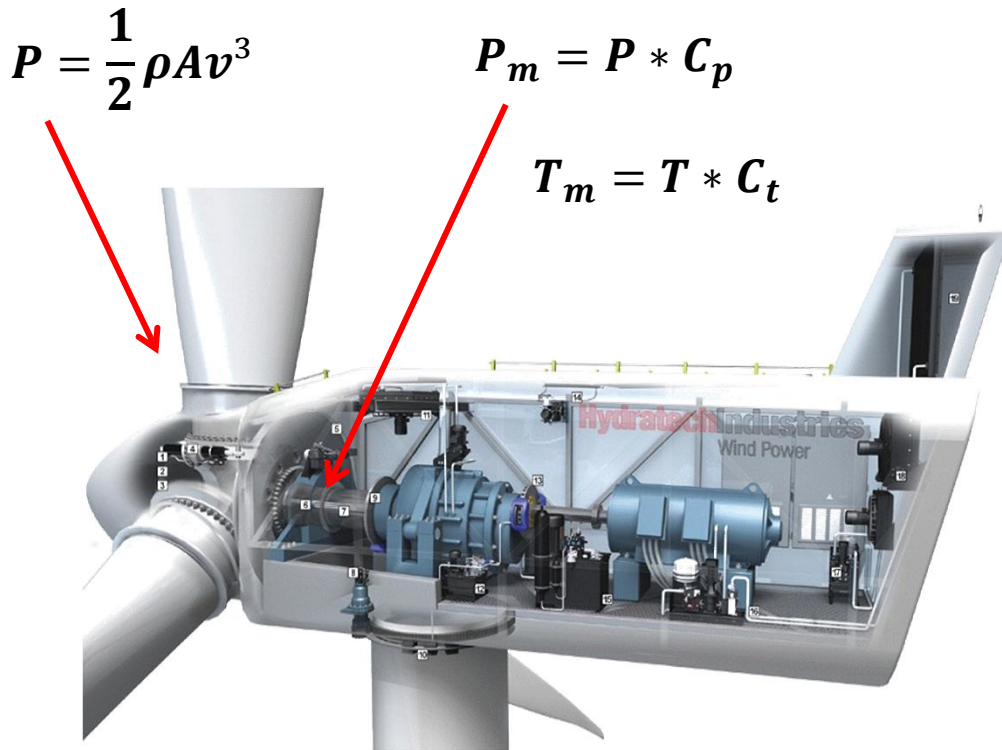
- *Dificuldade na instalação de uma alta torre;*
- *Dificuldade no transporte dos equipamentos;*
- *Exigência de um sistema de controle para girar as pás em direção ao vento; e*
- *Construção complexa da torre para apoiar o peso das pás e do cubo.*

Turbinas Eólicas – Classificação das turbinas eólicas

Eixo horizontal x Eixo vertical

	Darrieus	Turbina de eixo horizontal
Perfil da pá	Complicado	Complicado
Mecanismo de direção	Não	Sim
Possibilidade de mecanismo de passo	Não	Sim
Torre	Não	Sim
Cabos de sustentação	Sim	Não
Ruído	Moderado	Alto
Área da pá	Grande	Pequena
Carga na pá	Baixa	Alta
Posição do gerador	No solo	No alto da torre
Autoinicialização	Não	Sim
Interferência da torre	Pequena	Grande
Fundação	Simples	Extensa
Estrutura global	Simples	Complicada

Turbinas Eólicas – O torque de uma turbina



$$T_m = \frac{P_m}{\omega_t} \quad (6)$$

$$T_m = \frac{P * C_p}{\omega_t} = T * C_t$$

$$\frac{P * C_p}{\omega_t} = \frac{P}{\omega_v} * C_t$$

$$\frac{P * C_p}{\frac{V}{R}} = \frac{P}{\frac{v}{R}} * C_t$$

$$\frac{C_p}{V} = \frac{C_t}{v} \rightarrow \frac{C_p}{C_t} = \frac{V}{v} = \lambda$$

$$C_p = C_t * \lambda \quad (7)$$

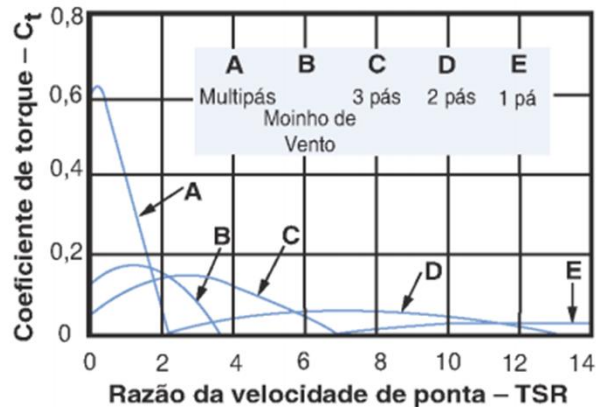
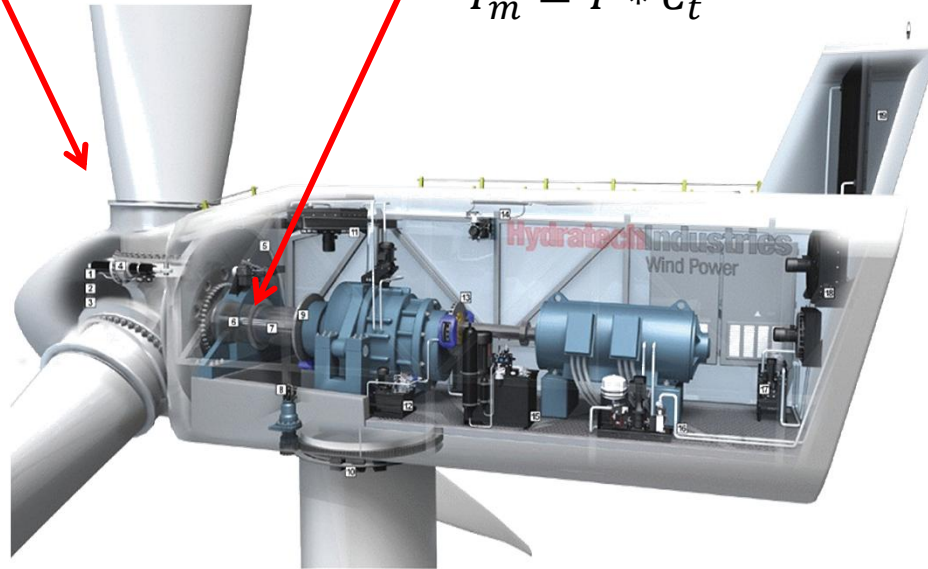
- λ Velocidade de ponta da pá (TSR)
- C_p Coeficiente de potência da turbina
- C_t Coeficiente de torque da turbina
- v Velocidade do vento incidente
- V Velocidade tangencial da pá

Turbinas Eólicas – O torque de uma turbina

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

$$P_m = P * C_p$$

$$T_m = T * C_t$$



$$T_m = \frac{P_m}{\omega_t}$$

$$T_m = \frac{1}{2} \rho A v^3 \frac{C_p}{\omega_t} \quad (8)$$

$$\lambda = \frac{V}{v} = \frac{\omega_t * R}{v}$$

$$\omega_t = \lambda \frac{v}{D/2} \quad (9)$$

$$T_m = \frac{1}{2} \rho A v^3 \frac{C_p}{\lambda \frac{2v}{D}}$$

$$T_m = \frac{1}{4} \rho A v^2 D \frac{C_p}{\lambda} \quad (10)$$

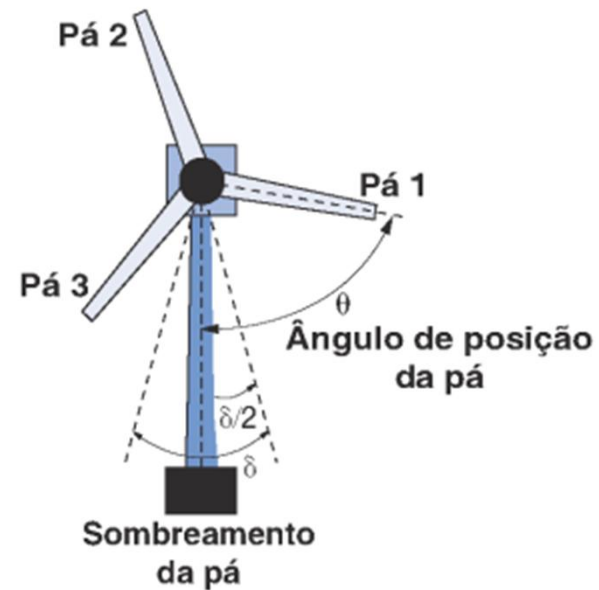
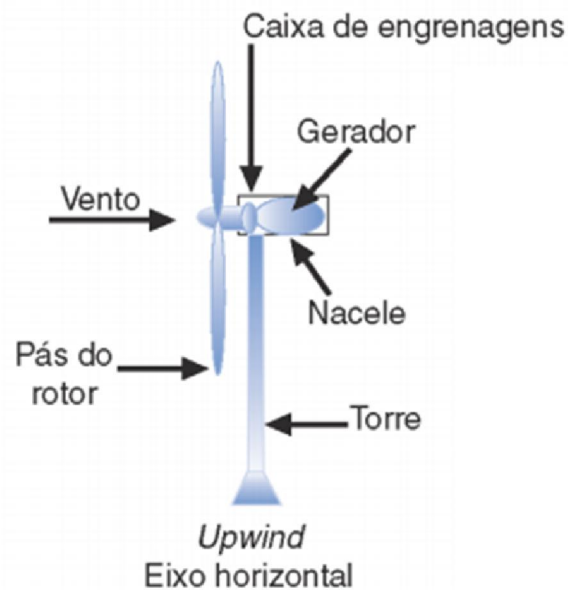
$$C_p = C_t * \lambda \quad (7)$$

$$T_m = \frac{C_t}{4} \rho A D v^2 \quad (11)$$

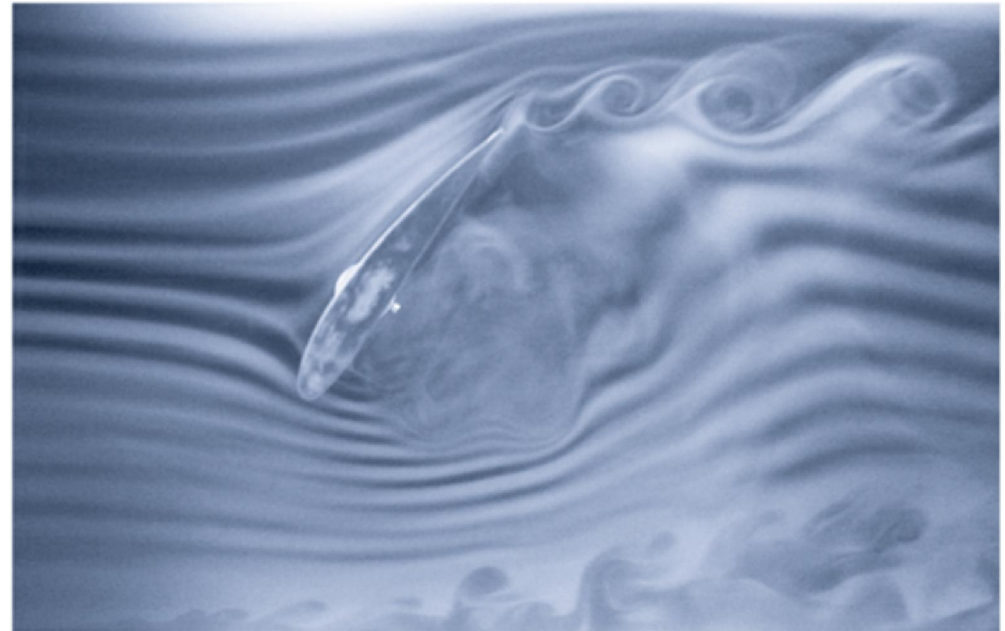
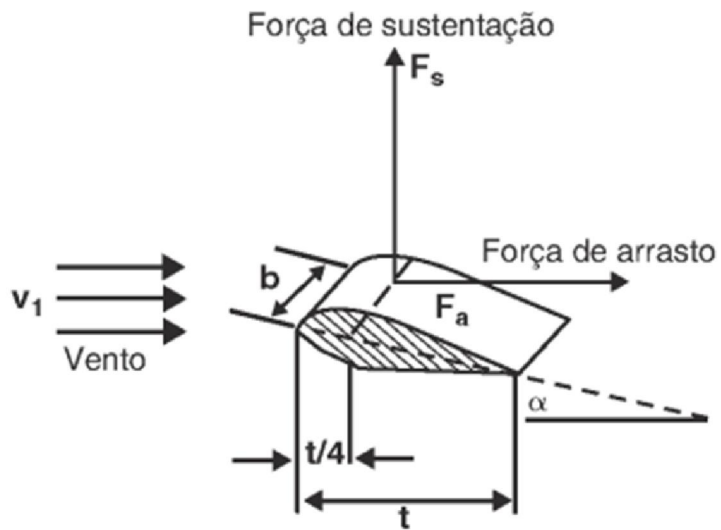
Turbinas Eólicas – Sombreamento

A sombra das pás provoca esforços vibrantes na torre!

A sombra da torre provoca vibração nas pás!



Turbinas Eólicas – As forças de sustentação e arrasto

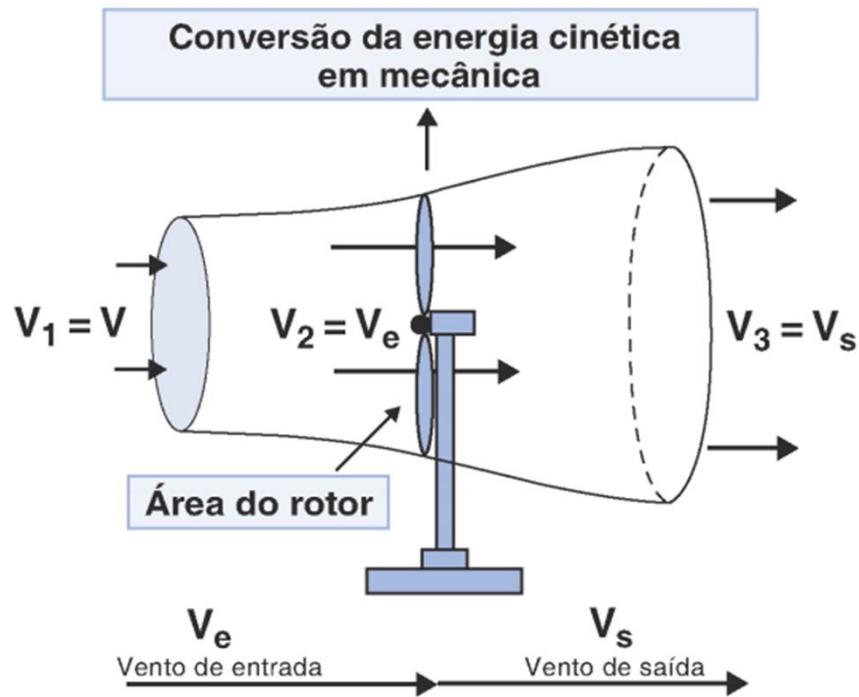


Turbinas Eólicas – As forças de sustentação e arrasto

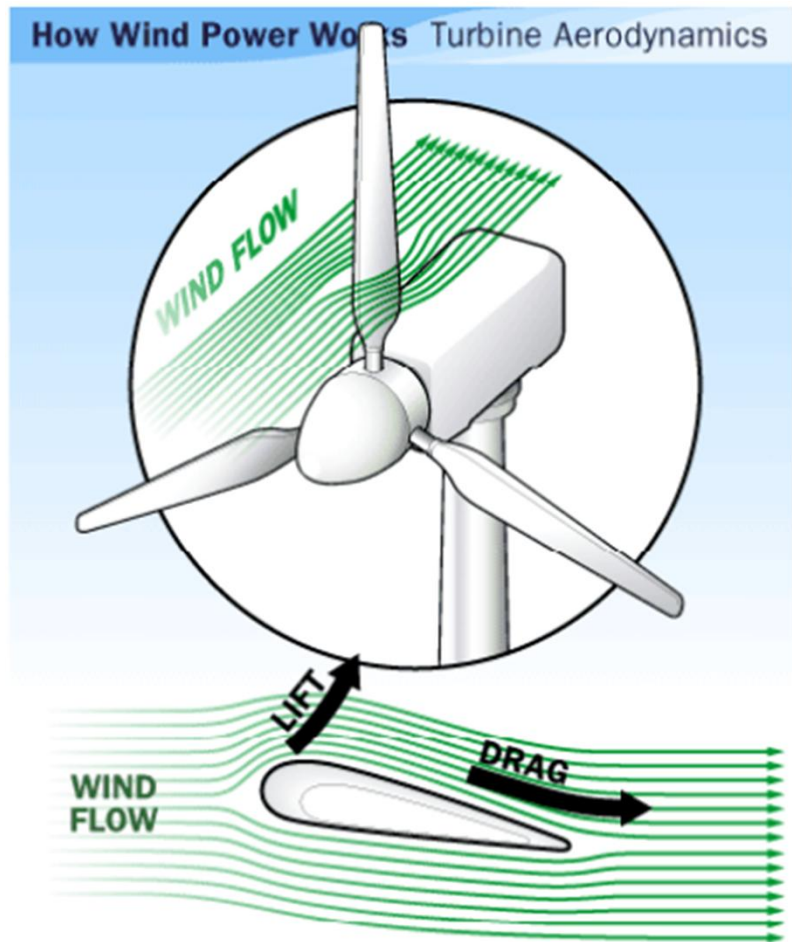
Vídeo – Aerodinâmica das turbinas eólicas



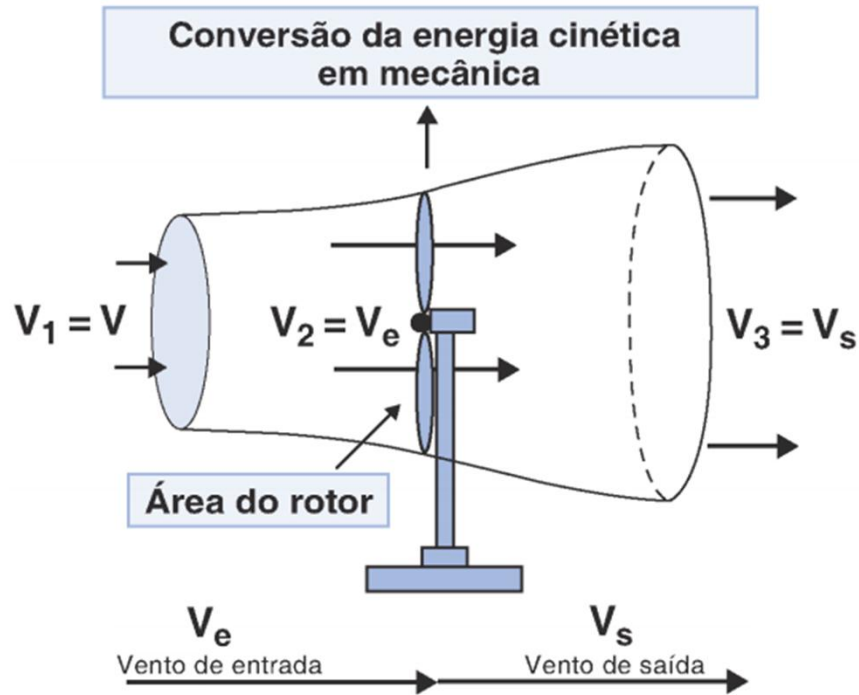
Turbinas Eólicas – O limite de Lanchester-Betz-Joukowski



QUAL A MÁXIMA POTÊNCIA DO VENTO QUE A TURBINA PODE EXTRAIR?



Turbinas Eólicas – O limite de Lanchester-Betz-Joukowski



A potência extraída (por unidade de tempo) pelas pás é dada por:

$$P_{ext} = \frac{1}{2} m(v^2 - V_s^2)$$

O fluxo de massa de ar que passa pelo rotor da turbina:

$$m = \rho A V_e$$

Assumimos que a velocidade do vento através do plano do rotor (V_e) é a média da velocidade de entrada e saída*:

$$P_{ext} = \frac{1}{2} \rho A \frac{(v + V_s)}{2} (v^2 - V_s^2)$$

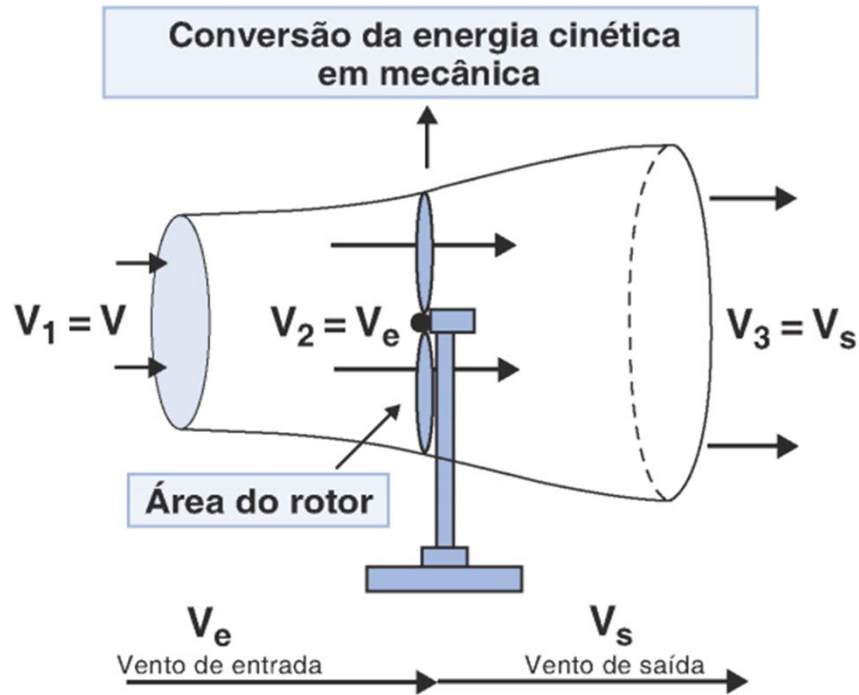
$$\lambda = \frac{V_s}{v}$$

$$P_{ext} = \frac{1}{2} \rho A \frac{(v + \lambda v)}{2} (v^2 - \lambda^2 v^2)$$

$$P_{ext} = \left[\frac{1}{2} \rho A \right] \frac{1}{2} (v + \lambda v)(v^2 - \lambda^2 v^2)$$

*Teorema de Rankine-Froude

Turbinas Eólicas – O limite de Lanchester-Betz-Joukowsky



$$P_{ext} = \left[\frac{1}{2} \rho A \right] \frac{1}{2} (v[1 + \lambda] * v^2[1 - \lambda^2])$$

$$P_{ext} = \left[\frac{1}{2} \rho A v^3 \right] \frac{1}{2} ([1 + \lambda][1 - \lambda^2])$$

$$P_{ext} = P * \frac{1}{2} ([1 + \lambda][1 - \lambda^2])$$

$$C_p = 0.5 * (1 + \lambda)(1 - \lambda^2)$$

$$P_{ext} = P * C_p$$

$$\frac{dC_p}{d\lambda} = 0 \quad (\text{Ponto de máximo de } C_p \text{ em relação a } \lambda)$$

*Teorema de Rankine-Froude

Turbinas Eólicas – O limite de Lanchester-Betz-Joukowski

$$C_p = 0.5 * (1 + \lambda)(1 - \lambda^2)$$

$$C_p = 0.5 * \left(1 + \frac{1}{3}\right) \left(1 - \frac{1}{3^2}\right)$$

$$\frac{dC_p}{d\lambda} = \frac{1}{2} [(1 + \lambda)'(1 - \lambda^2) + (1 + \lambda)(1 - \lambda^2)'] = 0$$

$$C_p \cong 0,593$$

$$\frac{1}{2} [(1 - \lambda^2) + (1 + \lambda)(-2\lambda)] = 0$$

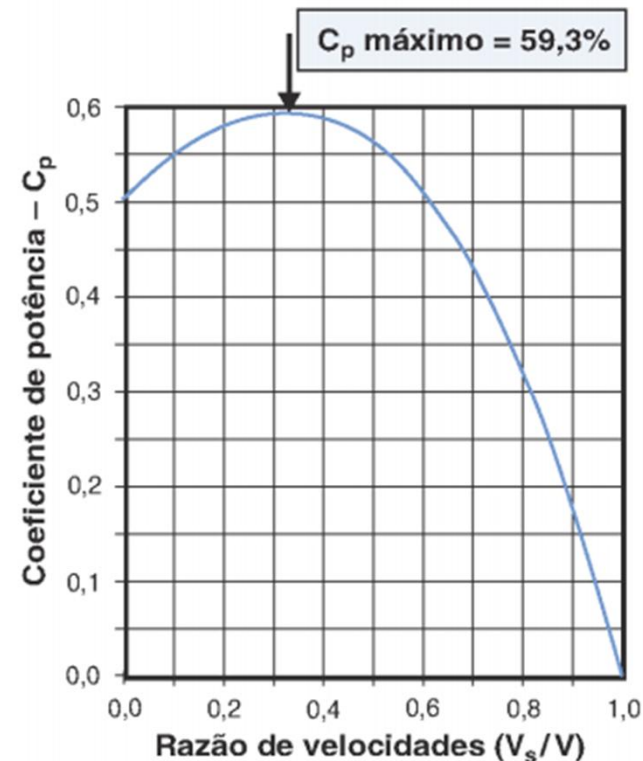
$$[(1 - \lambda^2) + (1 + \lambda)(-2\lambda)] = 0$$

$$[(1 - \lambda^2) + (-2\lambda - 2\lambda^2)] = 0$$

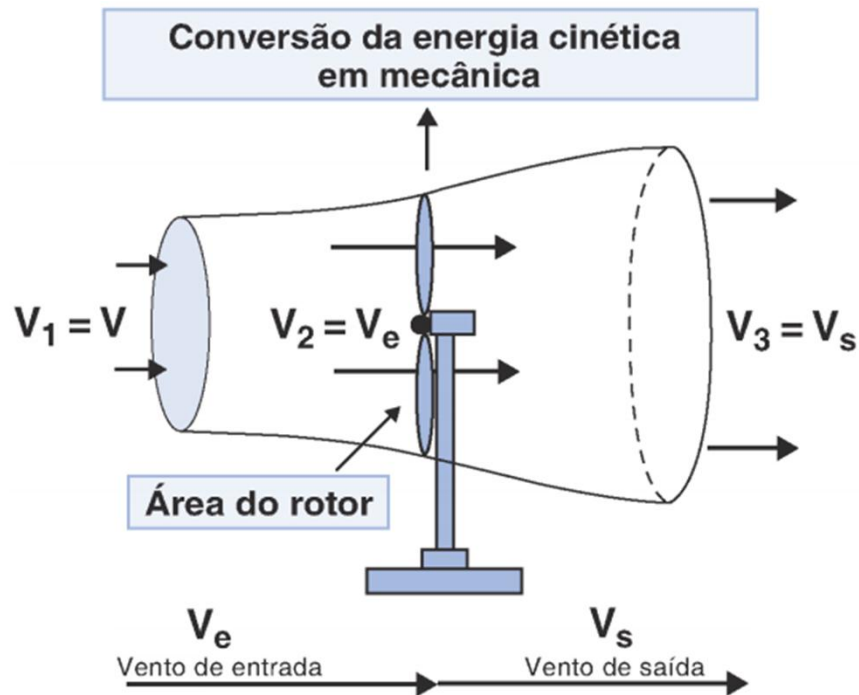
$$1 - 2\lambda - 3\lambda^2 = 0$$

$$\lambda = \frac{1}{3}$$

$$\lambda = -1$$



Turbinas Eólicas – O limite de Lanchester-Betz-Joukowski



Qual a máxima potência do vento que a turbina pode extrair?

$$P_{m\acute{a}x} = P_e - P_s$$

Alternativamente, a demonstração anterior concluiu que:

$$V_e = \frac{2}{3}v \quad V_s = \frac{1}{3}v$$

Assumimos a massa específica ρ do ar como constante, o que é válido para ventos de até 100 m/s:

$$m = \rho A V_e$$

$$P_{m\acute{a}x} = \frac{1}{2} m v^2 - \frac{1}{2} m V_s^2$$

$$P_{m\acute{a}x} = \frac{1}{2} (\rho A V_e) v^2 - \frac{1}{2} (\rho A V_e) V_s^2$$

$$P_{m\acute{a}x} = \frac{1}{2} \frac{2}{3} \rho A v^3 - \frac{1}{2} \frac{1}{3} \frac{1}{9} \rho A v^3$$

$$P_{m\acute{a}x} = \frac{2}{3} - \frac{2}{27} \left(\frac{1}{2} \rho A v^3 \right) = \frac{16}{27} P$$

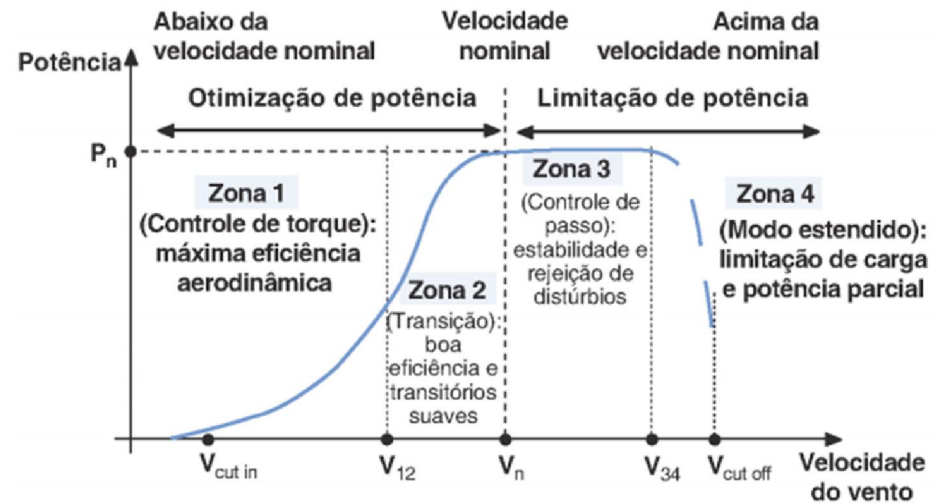
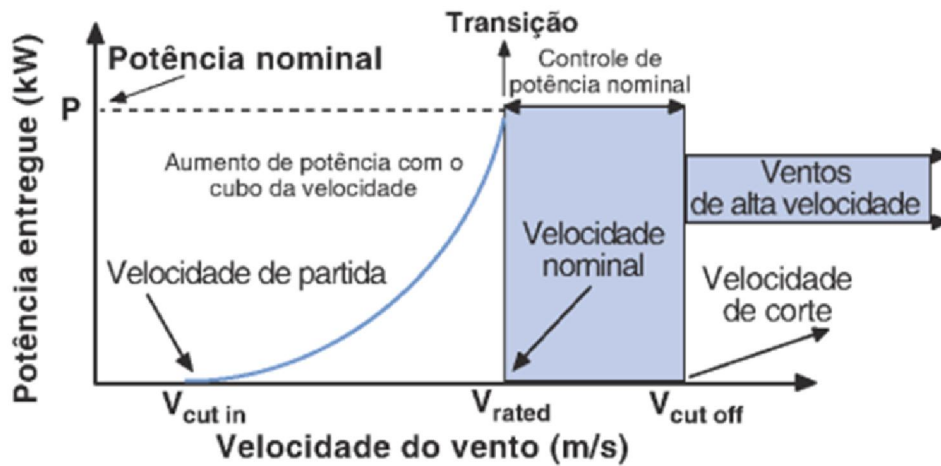
$$P_{m\acute{a}x} \cong 0,593 * P$$

Turbinas Eólicas – As forças de sustentação e arrasto

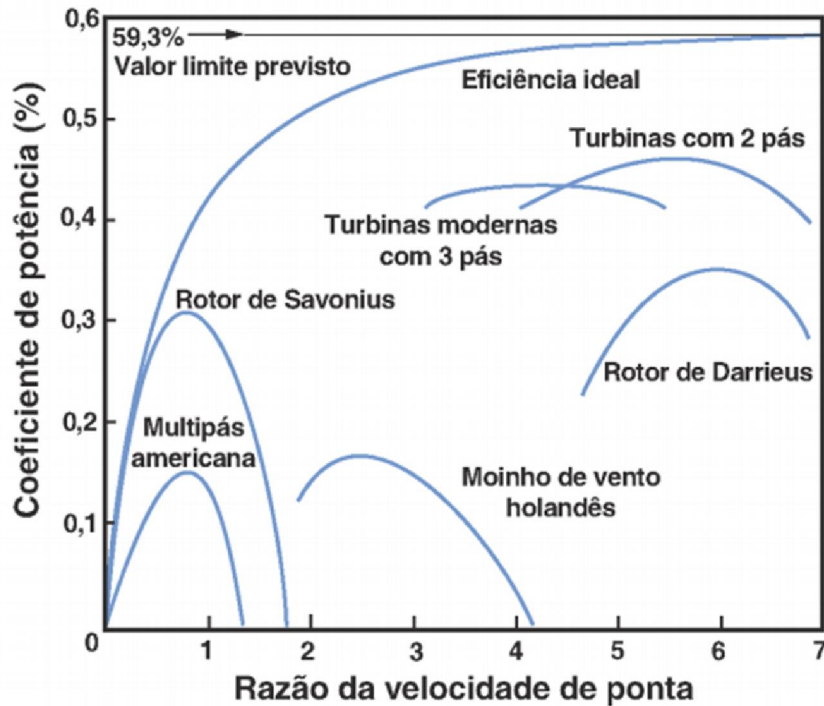
Vídeo – Limite de Betz



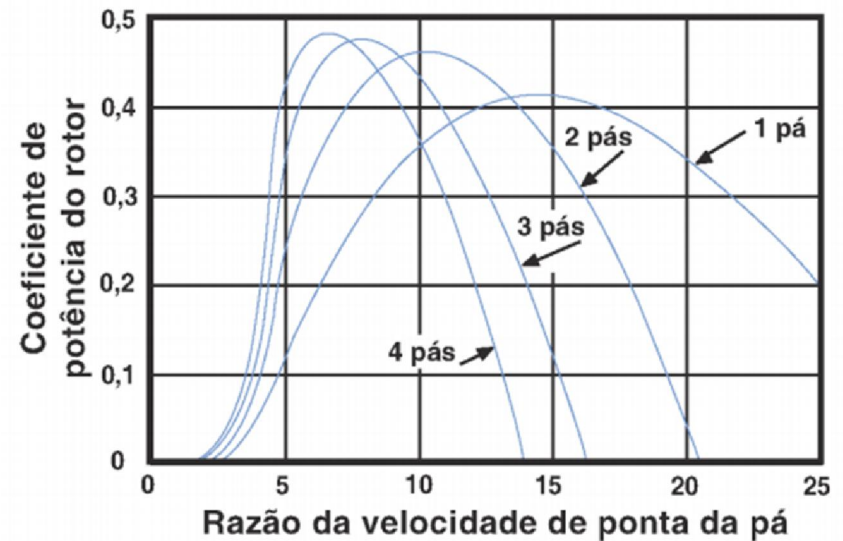
Turbinas Eólicas – O coeficiente e a curva de potência de uma turbina eólica



Turbinas Eólicas – O coeficiente e a curva de potência de uma turbina eólica



Coeficiente de potência não é a eficiência da turbina eólica!



Turbinas Eólicas – As maiores estruturas

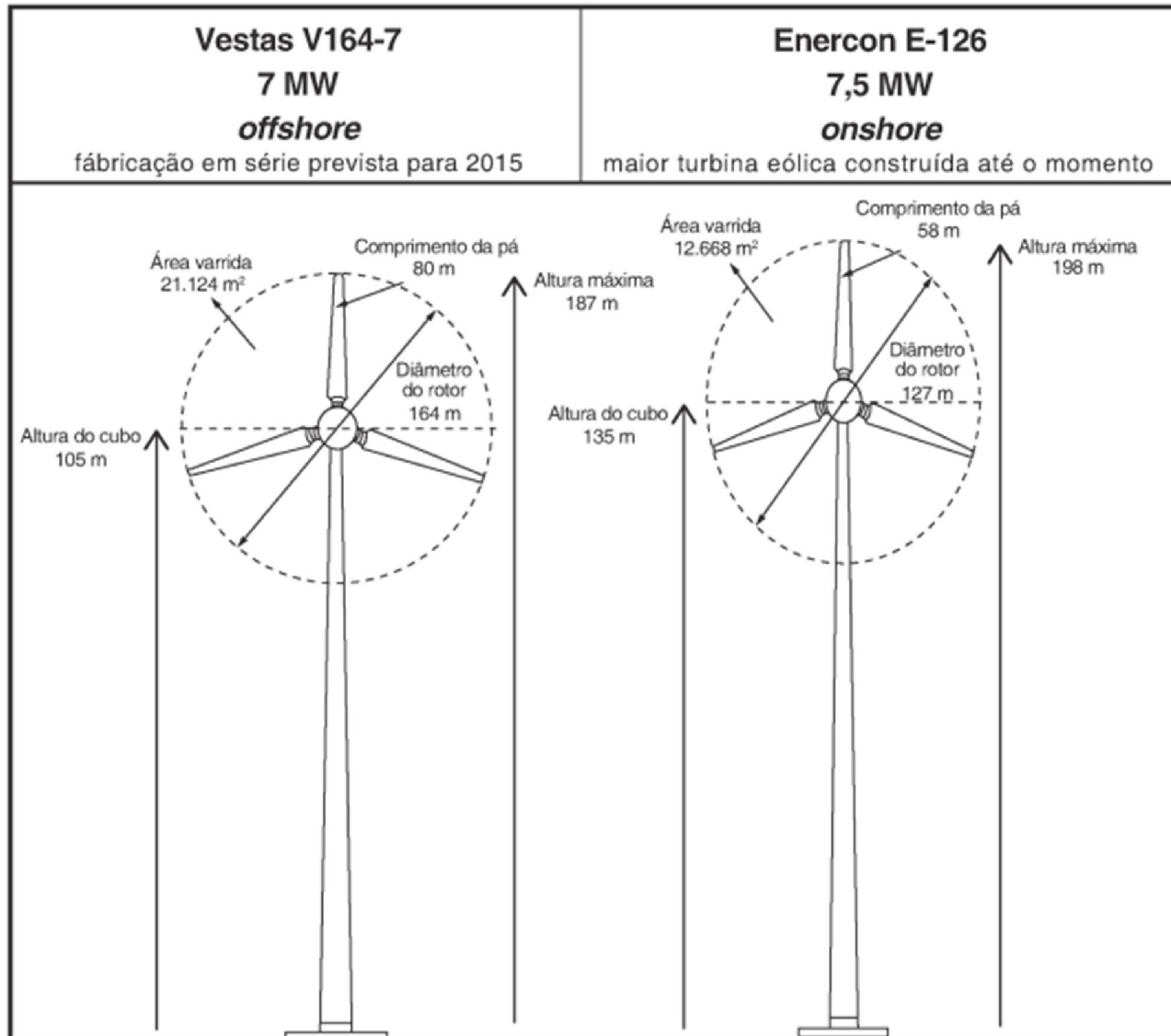
TABELA 6.8 Modelos de turbinas eólicas disponíveis pela Enercon em 2012

	E-33*	E-44	E-48	E-53	E-70	E-82	E-101	E-126
Potência nominal	330 kW	900 kW	800 kW	800 kW	2300 kW	2000 kW 2300 kW 3000 kW	3000 kW	7500 kW
Diâmetro do rotor	33,4 m	44 m	48 m	52,9 m	71 m	82 m	101 m	127 m
Altura do cubo	37 m 44 m 49 m 50 m	45 m 55 m 65 m	50 m 60 m 75 m 76 m	60 m 73 m 75 m	57 m 64 m 85 m 98 m 113 m	78 m 85 m 98 m 108 m 138 m	99 m 135 m	135 m
Área varrida	876 m ²	1521 m ²	1810 m ²	2198 m ²	3959 m ²	5281 m ²	8012 m ²	12668 m ²
Velocidade rotacional	Variável 18-45 rpm	Variável 12-34 rpm	Variável 16-31 rpm	Variável 12-28,3 rpm	Variável 6-21,5 rpm	Variável 6-18 rpm	Variável 4-14,5 rpm	Variável 5-11,7 rpm
Velocidade de corte	28-34 m/s	28-34 m/s	28-34 m/s	28-34 m/s	28-34 m/s	28-34 m/s	28-34 m/s	28-34 m/s

Fonte: Enercon.

*Fim da produção em dezembro de 2012.

Turbinas Eólicas – As maiores estruturas



Turbinas Eólicas – As maiores estruturas

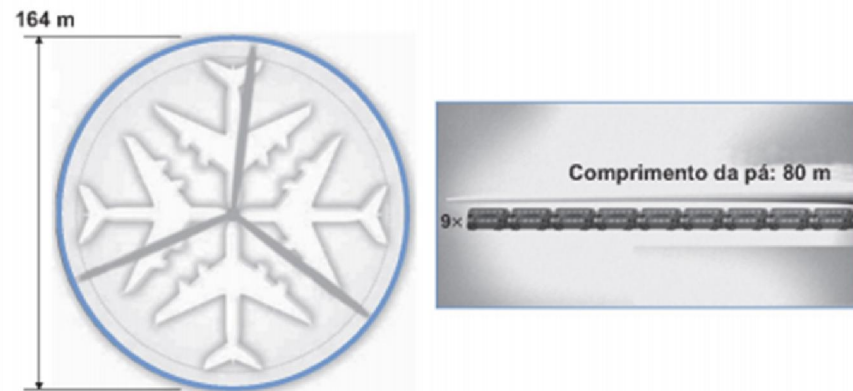
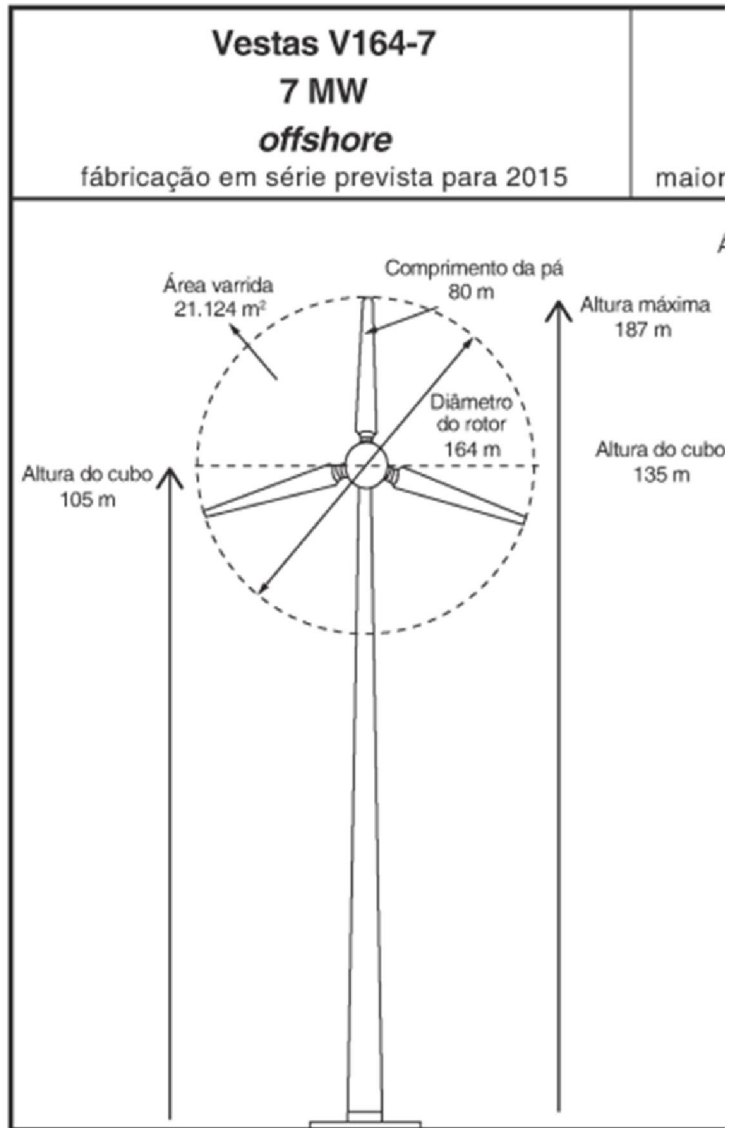


FIGURA 6.37 À esquerda: o tamanho da V164-7 comparado a um Airbus A380. À direita: comprimento da pá da V164-7 comparado a alguns ônibus ingleses.
Fonte: Vestas.

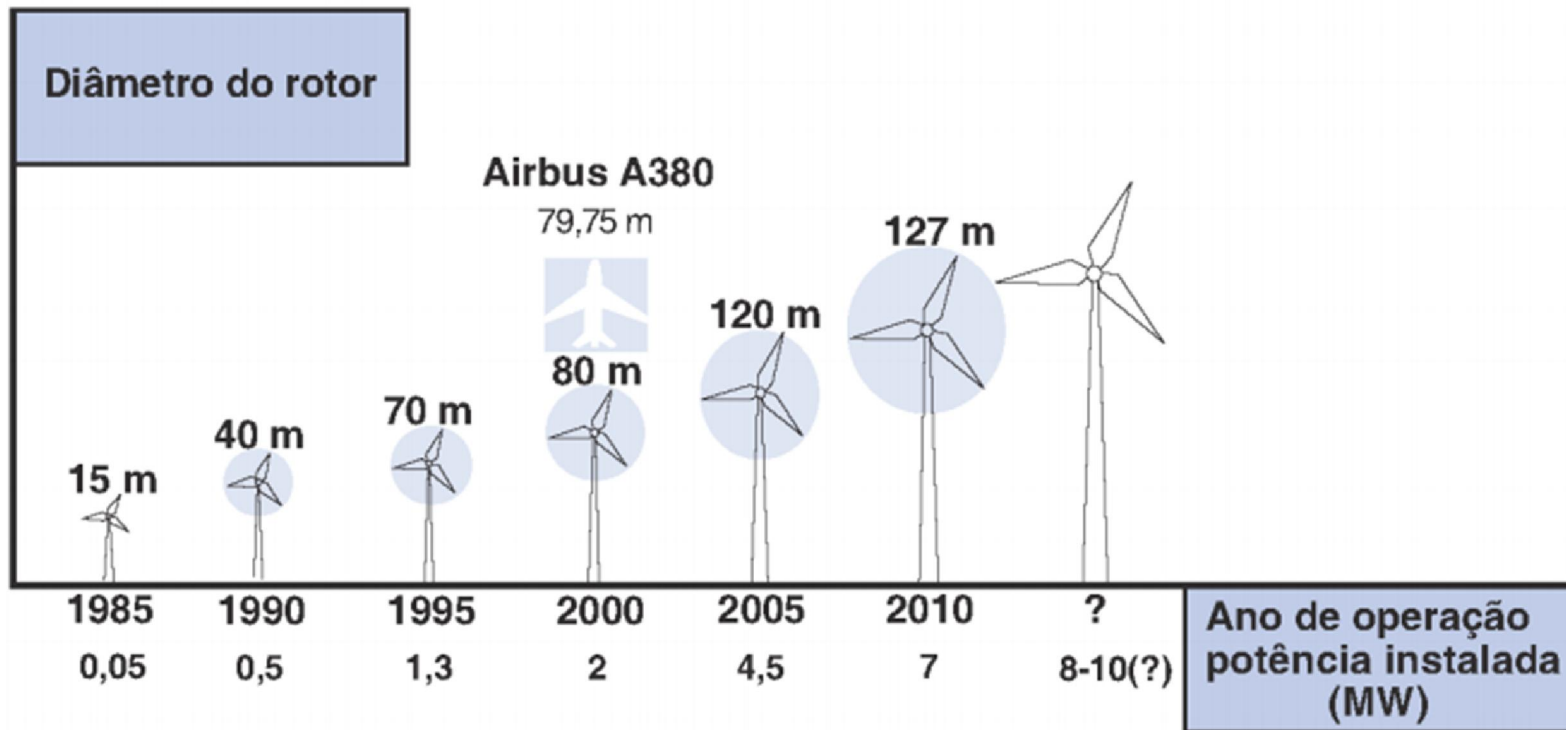
Turbinas Eólicas – As maiores estruturas



FIGURA 6.38 Turbina eólica mais alta (205 m) do planeta, a FL 2500, da empresa alemã Fuhrländer.

Fonte: SPBer, 2007, Creative Commons.

Turbinas Eólicas – As maiores estruturas



Turbinas Eólicas – As maiores estruturas

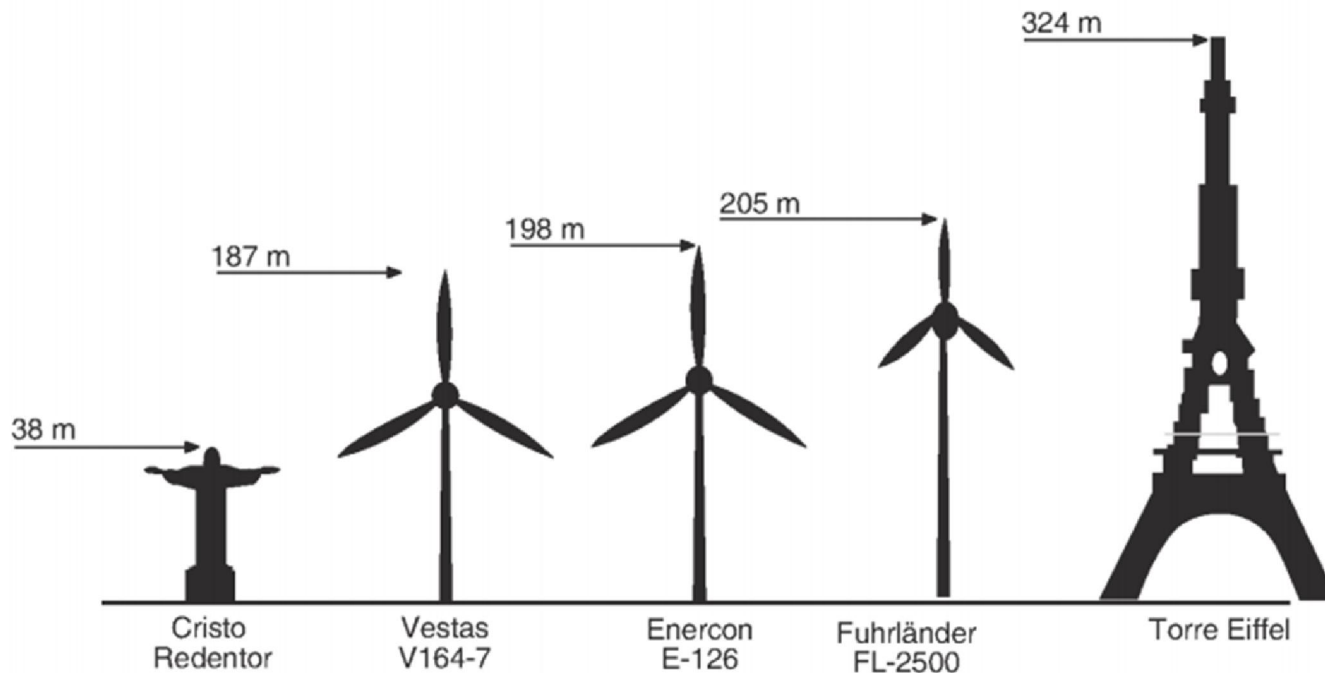


FIGURA 6.40 Comparativo entre algumas estruturas e as maiores turbinas eólicas até 2011.

Fonte: elaboração do autor.

Turbinas Eólicas – As maiores estruturas

TABELA 6.9 Os 5 maiores parques eólicos onshore do mundo em 2012

Posição	Parque eólico	Capacidade instalada (MW)	País	Gerador (unidades)	Notas
1	Jaisalmer Wind Park	1.064	Índia	Suzlon (de 350 kW a 2,1 MW)	Trata-se de um complexo de parques eólicos no distrito de Jaisalmer. A construção foi iniciada em agosto de 2001 e terminou em 01/04/2012.
2	Alta Wind Energy Center	1.020	Estados Unidos	100 GE SLE de 1,5 MW (Fase I)/390 Vestas V90 de 1,5 MW (Fases II a IX)	Desenvolvido pela Terra-Gen Power, o parque é localizado em Tehachapi Pass, na Califórnia. 168 MW foram investidos pelo Google. Em abril de 2012, a Terra-Gen anunciou um contrato de 650 milhões de dólares para financiar os 168 MW da fase VII e os 132 MW da fase IX, alcançando um total de 1,32 GW de potência instalada ao fim do empreendimento.
3	Roscoe Wind Farm	781,5	Estados Unidos	627 (406 da Mitsubishi, 55 da Siemens e 166 da GE)	Instalado no Texas e operado pela alemã E.ON Climate & Renewables, o parque foi construído em quatro etapas: em 2008, a primeira etapa implantou 209 turbinas de 1 MW fabricadas pela Mitsubishi, e a segunda etapa implantou 55 turbinas de 2,3 MW da Siemens. Em 2009 foram instaladas 166 máquinas de 1,5 MW da GE e em seguida mais 197 de 1 MW da Mitsubishi. Já foi considerado o maior parque eólico do mundo, com investimento superior a 1 bilhão de dólares.
4	Horse Hollow Wind Energy Center	735,5	Estados Unidos	430 (142 GE de 1,5 MW: Horse Hollow 1 – 132 Siemens de 2,3 MW: Horse Hollow 2 – 149 GE de 1,5 MW: Horse Hollow III)	Instalado nos condados de Taylor e Nolan, no Texas, o parque entrou em operação entre 2005 e 2006, sendo de propriedade da NextEra Energy Resources, que também o opera.
5	Tehachapi Wind Farm	705	Estados Unidos	2826 (em 10/2010)	Instalado no condado de Kern, na Califórnia, o parque iniciou sua construção em 1980, passou por repotenciação e vem sendo operado por várias empresas.

Turbinas Eólicas – As maiores estruturas

TABELA 6.10 Os 10 maiores parques eólicos *onshore* planejados ou em construção

Posição	Parque eólico	Capacidade instalada (MW)	País	Status
1	Gansu	20.000	China	Em construção desde 2009
2	Titan Wind Project	5.050	Estados Unidos	Em construção desde 2009
3	Pampa Wind Project	4.000	Estados Unidos	Cancelado em 2010
4	Markbygden Wind Farm	Até 4.000	Suécia	Início da construção prevista para o fim de 2012
5	Dobrogea Wind Farm	1.500	Romênia	Em construção desde 2010
6	Aubanel Wind Project	1.000	México	Início da construção prevista para 2014
7	Silverton Wind Farm	Até 1.000	Austrália	Início da construção prevista para 2014
8	Hartland Wind Farm	500-1.000	Estados Unidos	Início da construção prevista para 2014
9	Castle Hill Wind Farm	860	Nova Zelândia	Proposto, mas sem cronograma
10	Shepherds Flat Wind Farm	845	Estados Unidos	Em construção desde 2010

Turbinas Eólicas – As novas arquiteturas de turbinas eólicas



Turbinas Eólicas – As novas arquiteturas de turbinas eólicas

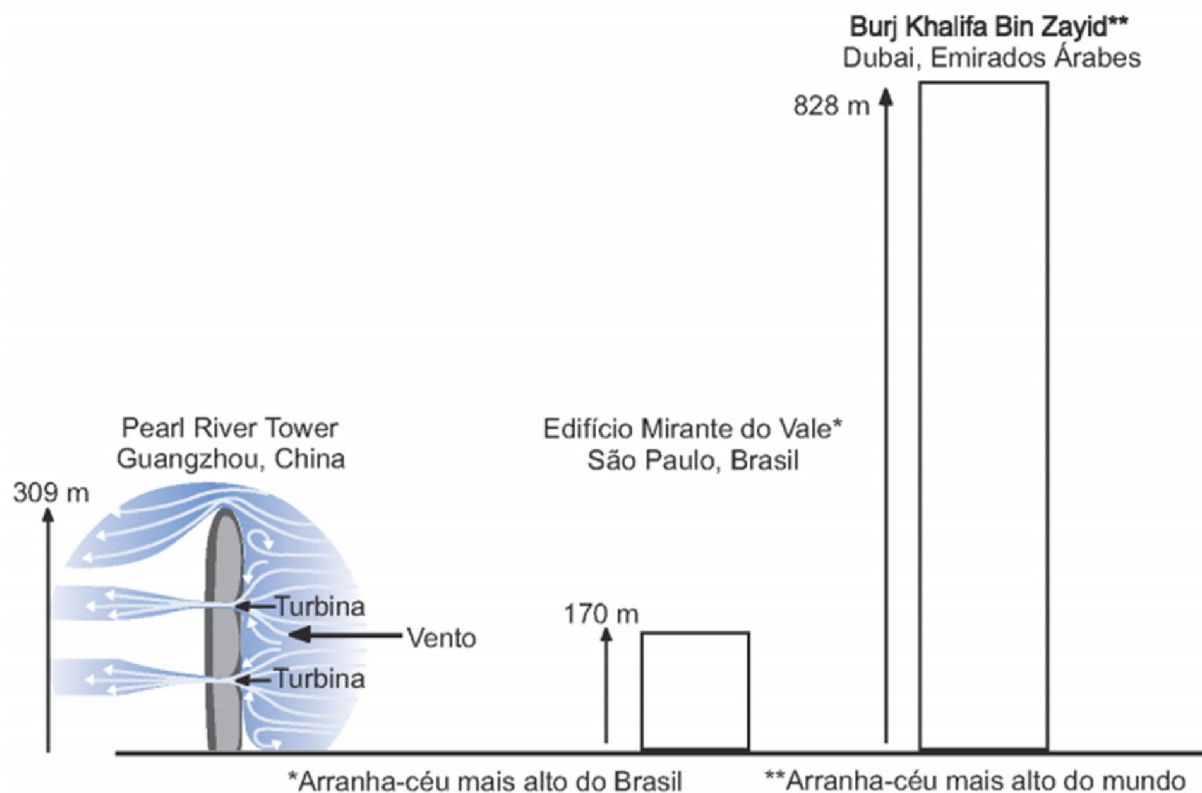


FIGURA 6.43 O Pearl River Tower, na China, inclui duas turbinas eólicas na sua estrutura.

Fonte: Bradwilkins, 2011, Creative Commons.

Turbinas Eólicas – As novas arquiteturas de turbinas eólicas



FIGURA 6.45 Edifício Strata SE1, em Londres, com suas três turbinas eólicas.

Fonte: Dave Catchpole, 2010, Creative Commons.

Parte 2 – Energia Eólica
Prof. Alex Vilarindo Menezes

Os aerogeradores

TORRE

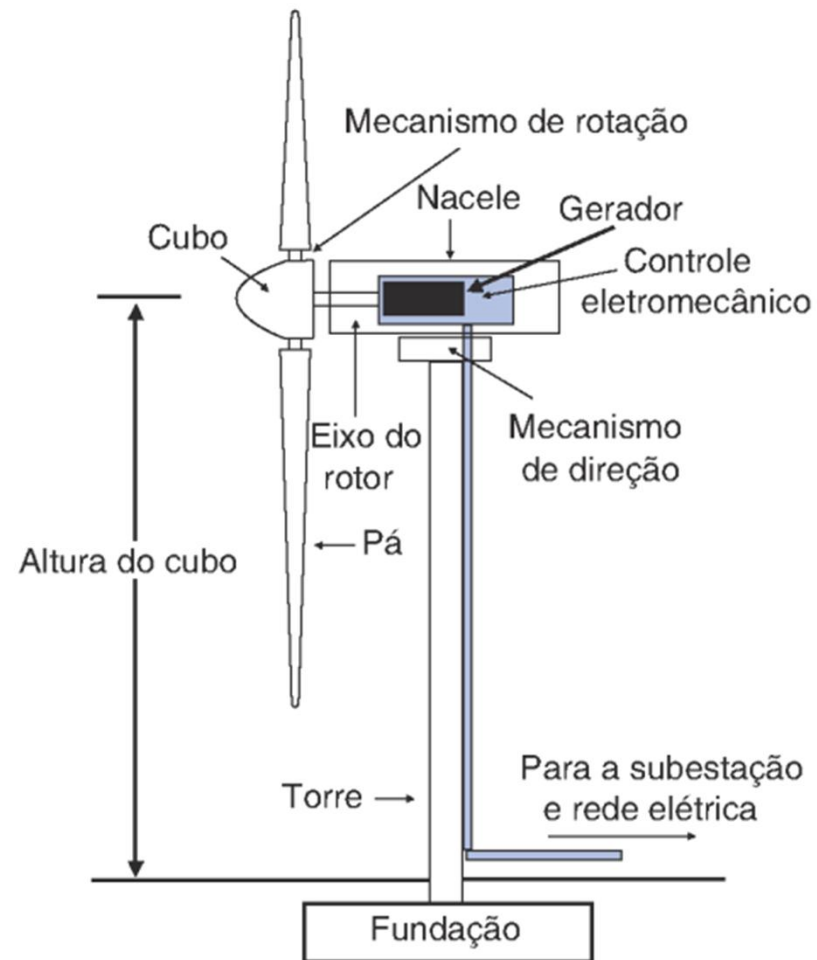
NACELE

CAIXA DE ENGRENAGENS

CUBO

PÁS

GERADOR



Os aerogeradores

TORRE

NACELE

CAIXA DE ENGRENAGENS

CUBO

PÁS

GERADOR



❑ Pode ser cônica (em concreto ou aço) ou treliçada (em aço);

➤ **Torres treliçadas:**

- Foram utilizadas inicialmente para pequenas turbinas;
- Tubulares de aço vem substituindo as treliçadas;
- Desvantagens: Alto tempo de montagem e uma despesa maior com manutenção.

Os aerogeradores

TORRE

NACELE

CAIXA DE ENGRENAGENS

CUBO

PÁS

GERADOR



➤ **Torres de concreto:**

- Assim como a treliçada vem sendo substituído pelas tubulares de aço;
- Podem ser construídas no local de implantação;
- Mais fácil de ser transportada;
- Grandes flutuações no preço do aço no mercado;
- As torres de concreto se mostram competitivas para alturas superiores a 100 metros.



Parte 2 – Energia Eólica
Prof. Alex Vilarindo Menezes

Os aerogeradores

TORRE

NACELE

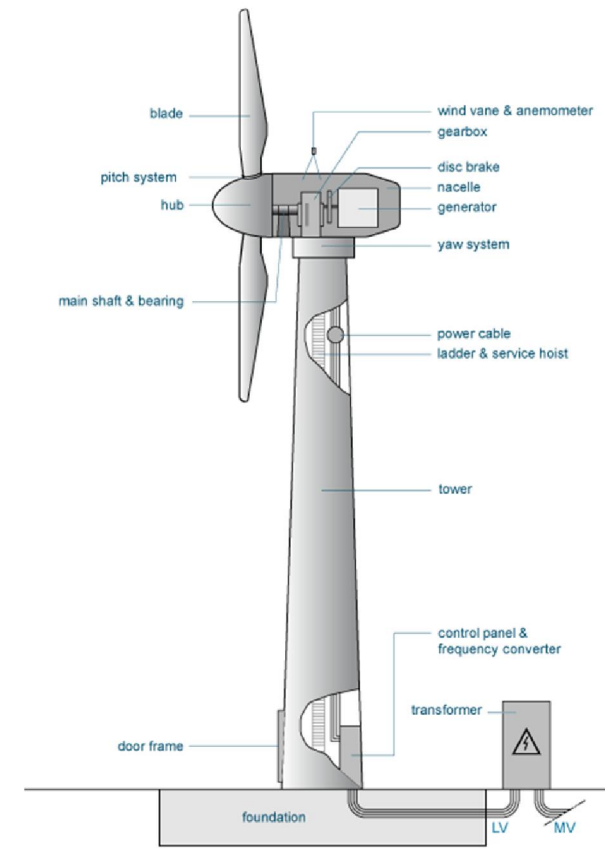
CAIXA DE ENGRENAGENS

CUBO

PÁS

GERADOR

➤ Estrutura interna da torre



Os aerogeradores

TORRE

NACELE

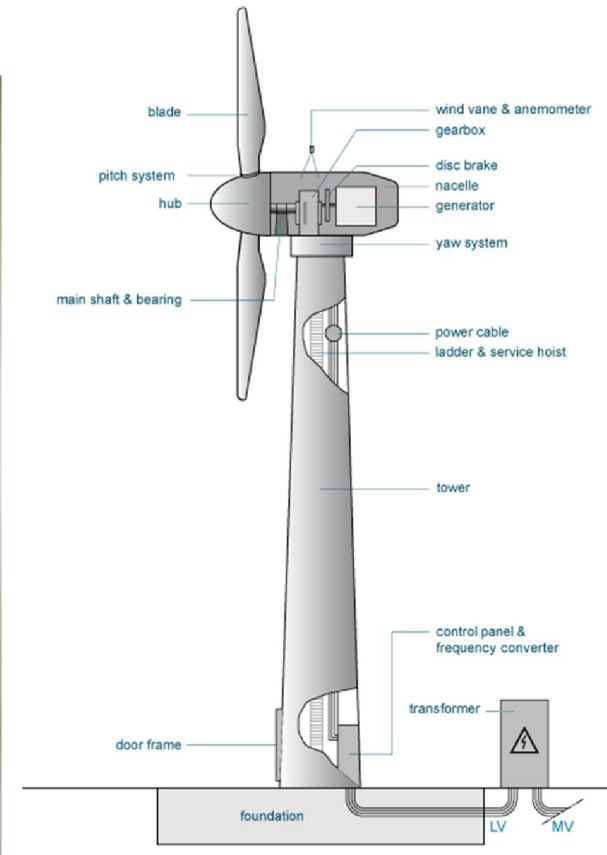
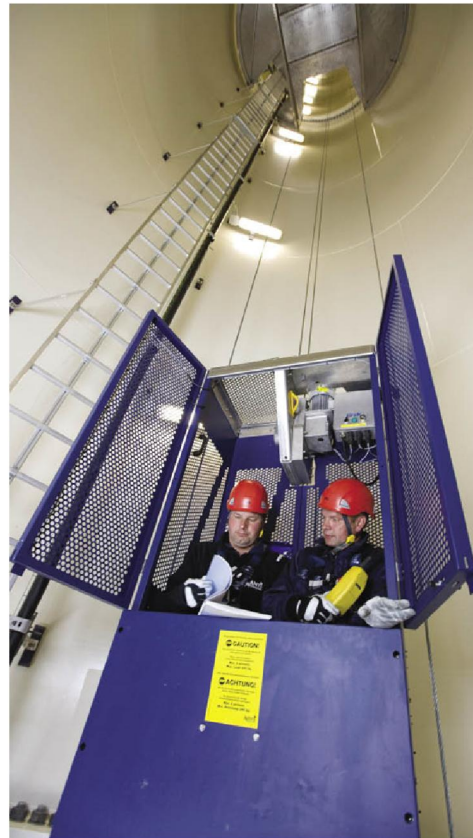
CAIXA DE ENGRENAGENS

CUBO

PÁS

GERADOR

➤ Estrutura interna da torre



Os aerogeradores

TORRE

NACELE

CAIXA DE ENGRENAGENS

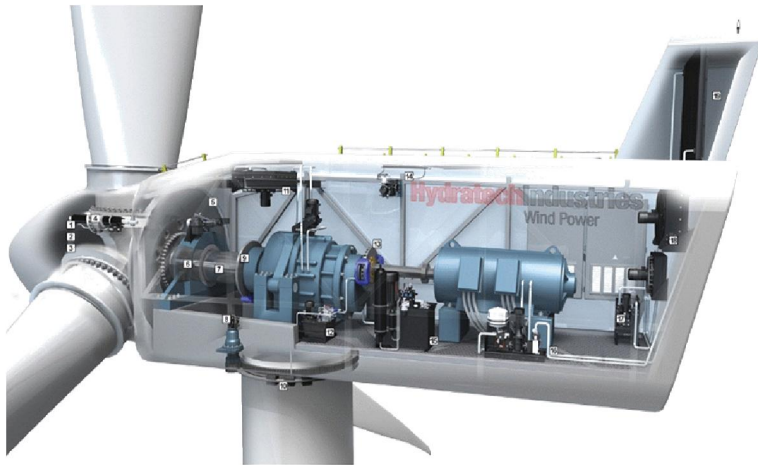
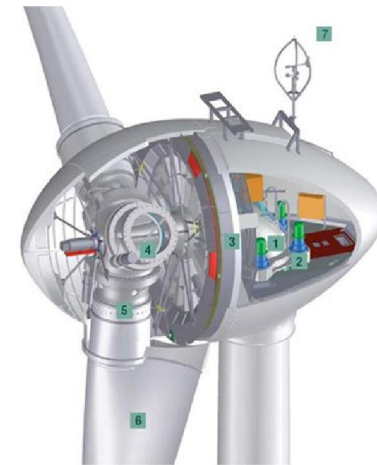
CUBO

PÁS

GERADOR

➤ Funcionalidades:

- Em linhas gerais, abriga o gerador e caixa de engrenagens;
- Dentro da nacele há um sistema de controle azimutal do aerogerador;
- Sob a nacele estão o anemômetro e biruta (*windvane*).



Os aerogeradores

TORRE

NACELE

CAIXA DE ENGRENAGENS

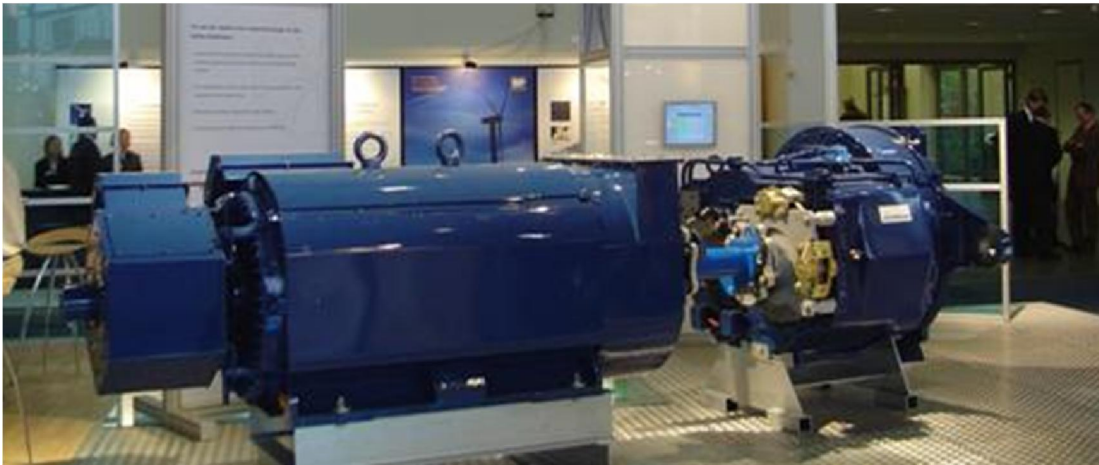
CUBO

PÁS

GERADOR

➤ Funcionalidades:

- Interface entre a baixa velocidade da turbina e alta velocidade do gerador;



Com caixa de engrenagem



Sem caixa de engrenagem

Os aerogeradores

TORRE

NACELE

CAIXA DE ENGRENAGENS

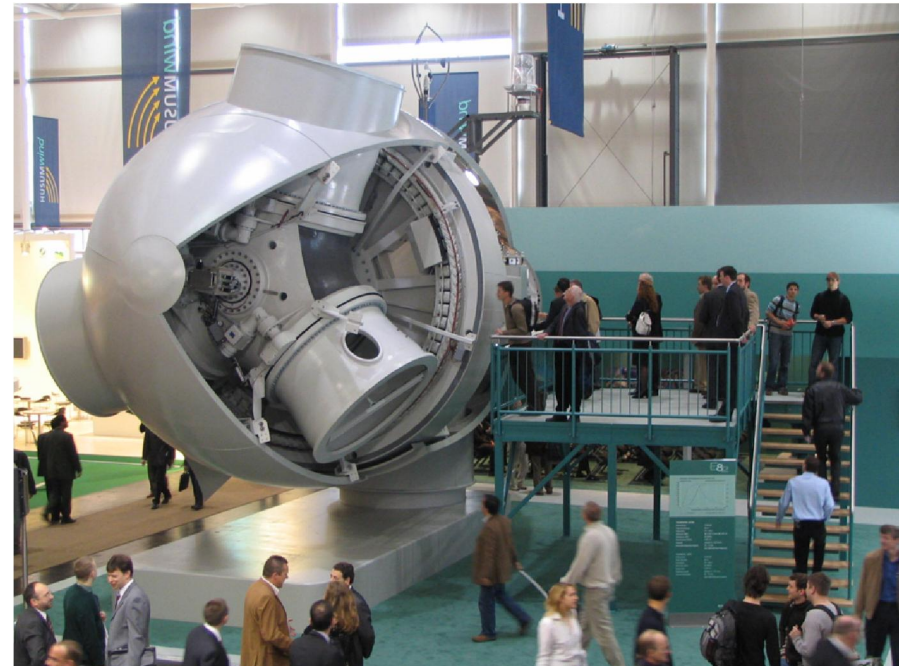
CUBO

PÁS

GERADOR

➤ Funcionalidades:

- É a estrutura na qual são fixadas as pás, sendo construído em aço ou liga metálica de alta resistência.



Os aerogeradores

TORRE

NACELE

CAIXA DE ENGRENAGENS

CUBO

PÁS

GERADOR

➤ Funcionalidades:

- É a estrutura que é movimentada pelo vento. As pás são construídas em fibra de vidro e reforçadas em epóxi e/ou madeira. Na fixação com o cubo, a pá pode ter rolamentos, no caso das turbinas com controle de passo.



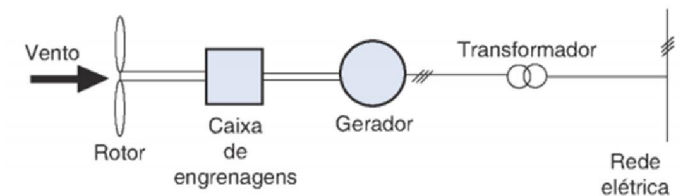
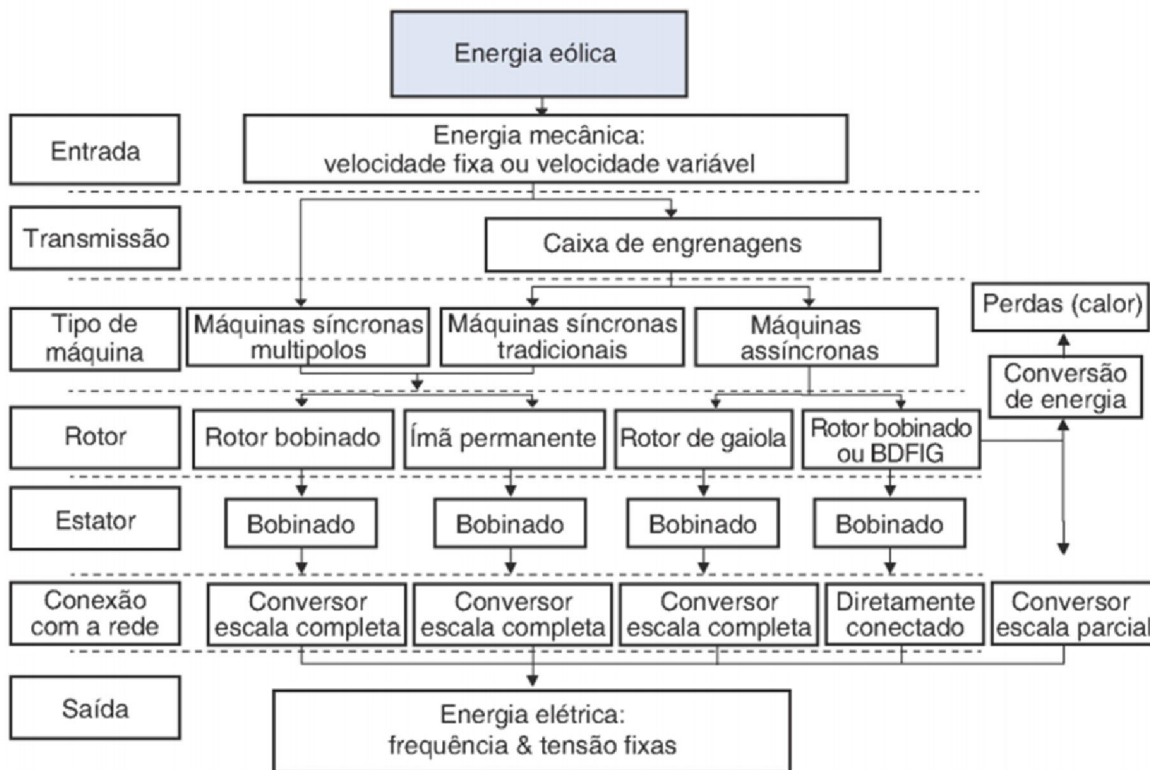
B75 da Siemens

Os aerogeradores

TORRE NACELE CAIXA DE ENGRENAGENS CUBO PÁS GERADOR

➤ Funcionalidades:

- É a máquina responsável pela produção de energia elétrica propriamente dita. Há dois modelos usados pelos aerogeradores: **MÁQUINAS SÍNCRONAS E ASSÍNCRONAS.**



Os aerogeradores

VÍDEO – VISÃO GERAL DOS AEROGERADORES



Os aerogeradores

VÍDEO – GERADOR EÓLICO COM CAIXA DE ENGENHAGEM



Os aerogeradores

VÍDEO – GERADOR EÓLICO SEM CAIXA DE ENGRENAGEM

