



Energia Eólica

Estado da Arte e Princípios Físicos

Ricardo Marques Dutra

Departamento de Tecnologias Especiais - DTE

Sumário

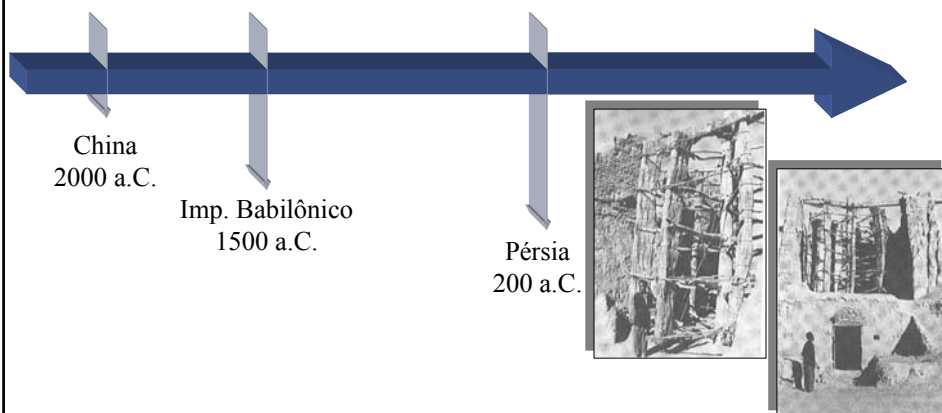
- Estado da Arte
- Tecnologia Eólica
- Viabilidade Técnica de Projetos Eólicos
- Viabilidade Econômica de Projetos Eólicos

Estado da Arte da Energia Eólica no Brasil e no Mundo



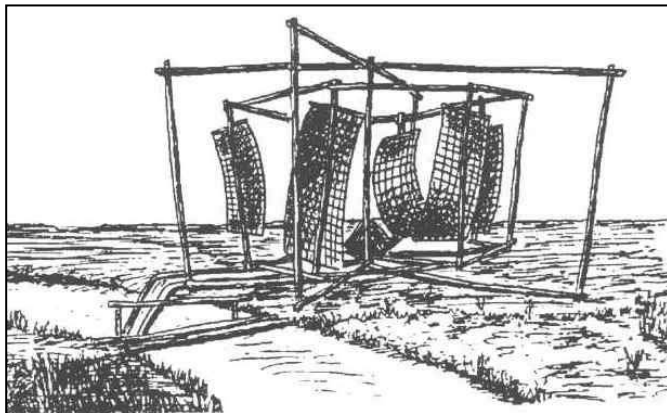
Utilização da Energia Eólica (A.C.)

- Substituição da força motriz humana e animal nas atividades agrícolas



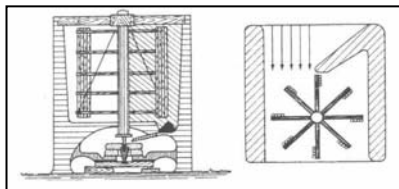
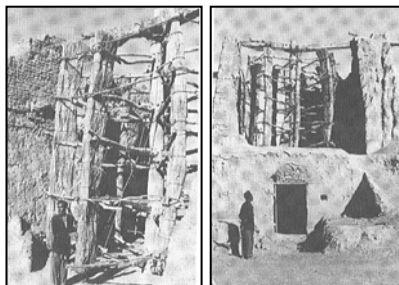
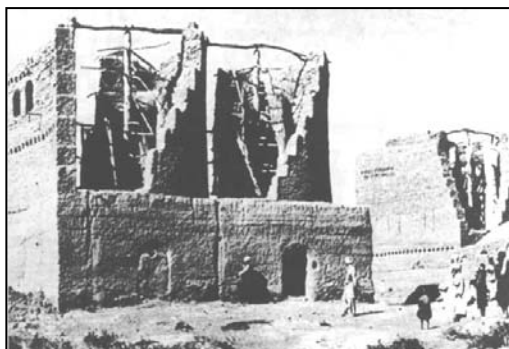
Utilização da Energia Eólica (A.C.)

Utilização rudimentar para bombeamento de água na China
(2000 a.C.)



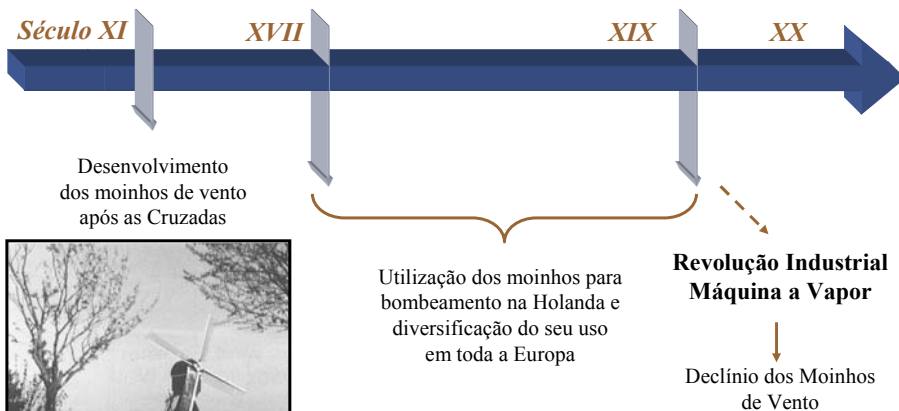
Utilização da Energia Eólica (A.C.)

Ruínas de um moinho de vento para moagem de grãos na Pérsia
(700 a.C.)



Utilização da Energia Eólica (D.C.)

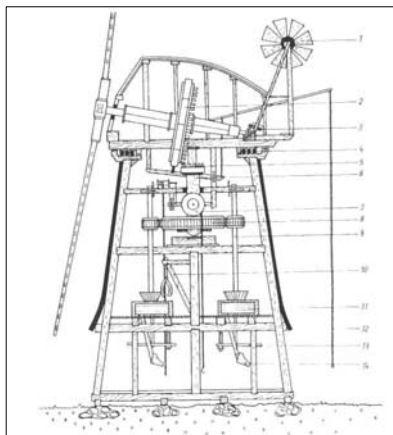
- Substituição da força motriz humana e animal nas atividades agrícolas
- Bombeamento de água e diversificação no uso de moinhos de vento



Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - Cepel

Estrutura dos Moinhos de Vento

Estrutura típica de um moinho de vento utilizado para moagem de grãos



Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - Cepel

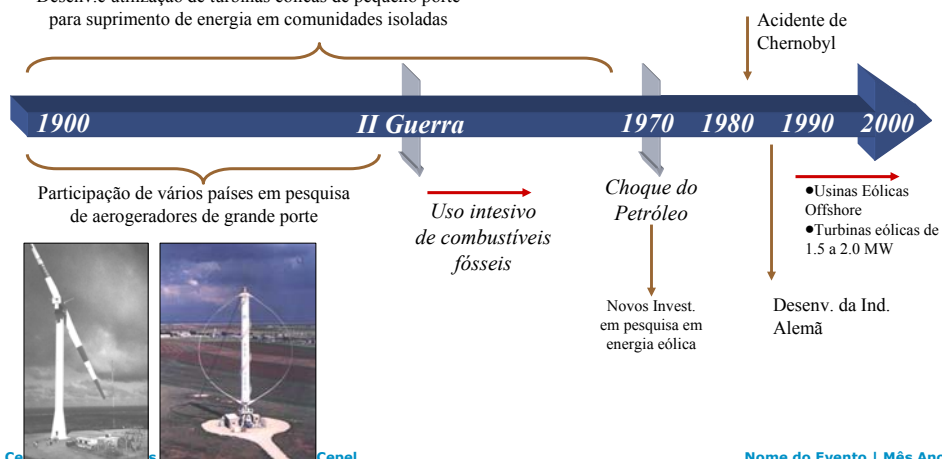
Utilização da Energia Eólica no Transporte Marítimo



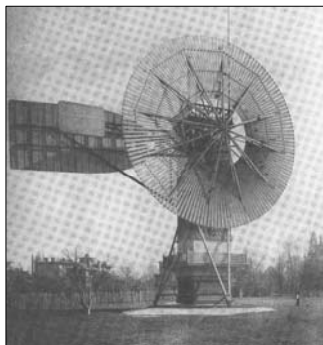
Utilização da Energia Eólica no Século XX

- Aerogeradores de Pequeno Porte (expansão territorial e sist. isolados)
- Aerogeradores de Grande Porte (pesquisas e desenv. industrial)

Desenv. e utilização de turbinas eólicas de pequeno porte para suprimento de energia em comunidades isoladas



Utilização da Energia Eólica no Século XX



*Turbina Brush (1888 – 1908)
USA - 12kW*



*Turbina Balaclava (1931 – 1934)
Rússia – 100 kW*



*Smith-Putnam (1941 - 1945)
USA - 1.25 MW*

Utilização da Energia Eólica no Século XX



*Turbina Eólica de Gedser
(1977 – 1979)
Dinamarca - 200kW*

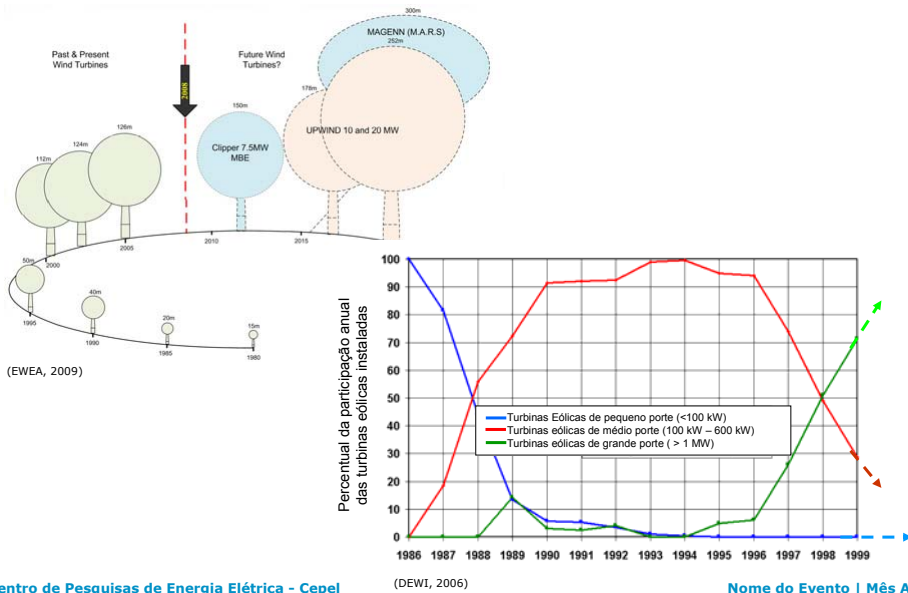


*Turbina MOD-5B (1987 – 1993)
Estados Unidos - 3.5 MW*



*Turbina Eixo Vertical(1984-1987)
USA - 625 kW*

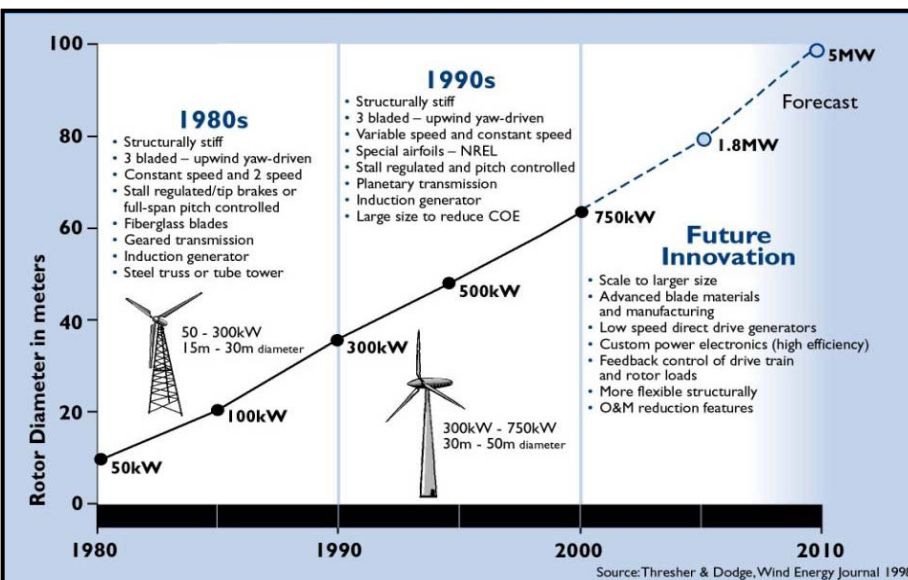
Evolução do Tamanho dos Aero geradores



Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - Cepel

Nome do Evento | Mês Ano

Evolução do Tamanho dos Aero geradores



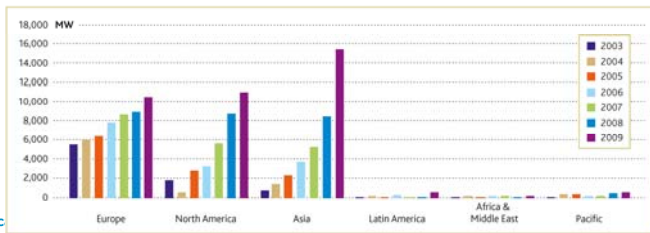
Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - Cepel

Nome do Evento | Mês Ano

Potência Eólica Instalada no Mundo (MW)

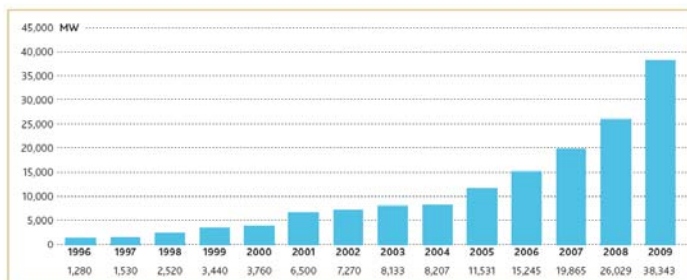
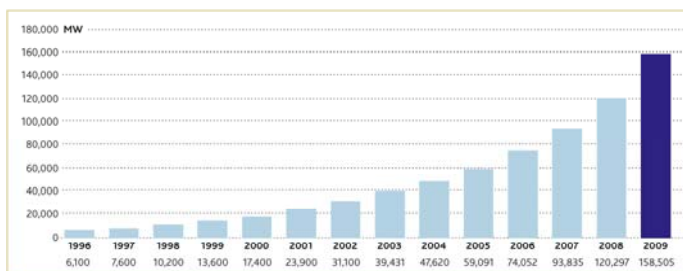
	Fim de 2004	Fim de 2005	Fim de 2006	Fim de 2007	Fim de 2008	Fim de 2009
Europa	34.630	40.898	48.545	57.279	65.741	76.152
América do Norte	7.196	9.832	13.062	18.780	27.437	38.383
Ásia	3.774	6.990	10.667	15.963	24.188	39.610
América Latina	212	232	530	563	653	1.274
Região do Pacífico	1.501	2.104	2.431	2.645	1.643	2.221
África	246	271	441	468	635	865
Total	47.574	59.091	74.223	93.849	120.297	158.505

www.windpower-monthly.com/
WWW.GWEC.NET, 2010



Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

Potência Eólica Instalada no Mundo (MW)



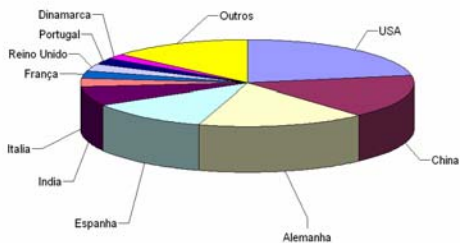
Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - Cepel

Nome do Evento | Mês Ano

Potência Eólica Instalada 10+ - Potência Instala até 2009

	MW	%
USA	35.064	22,1%
China	25.805	16,3%
Alemanha	25.777	16,3%
Espanha	19.149	12,1%
India	10.926	6,9%
Italia	4.850	3,1%
França	4.492	2,8%
Reino Unido	4.051	2,6%
Portugal	3.535	2,2%
Dinamarca	3.465	2,2%
Outros	21.391	13,5%
Total 10+	137.114	86,5%
Total	158.505	

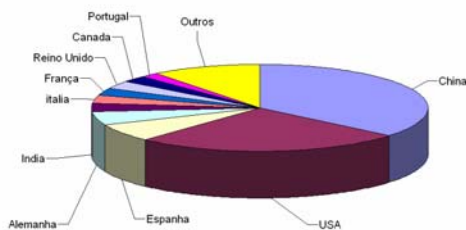
(GWEC, 2010)



Potência Eólica Instalada 10+ - Potência Instala somente em 2009

	MW	%
China	13.803	90,8%
USA	9.996	65,8%
Espanha	2.459	16,2%
Alemanha	1.917	12,6%
India	1.271	8,4%
Italia	1.114	7,3%
França	1.088	7,2%
Reino Unido	1.077	7,1%
Canada	950	6,3%
Portugal	673	4,4%
Outros	3.994	26,3%
Total 10+	12.792	84,2%
Total	15.197	

(GWEC, 2010)

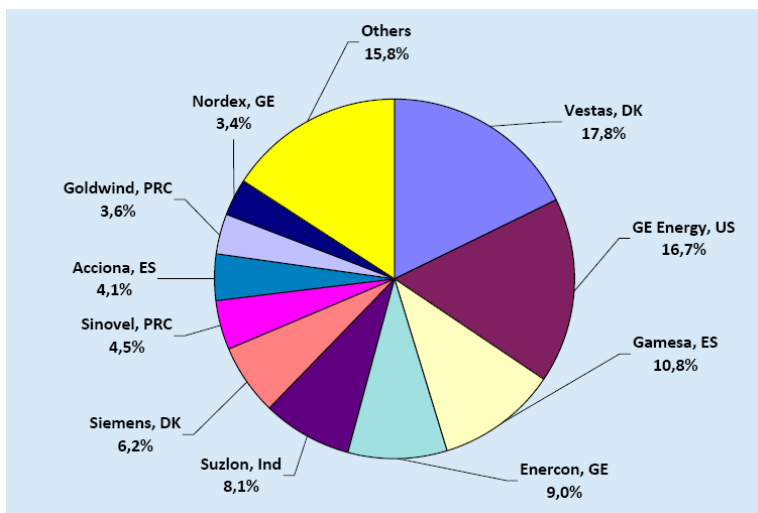


Potência Instalada 10 maiores mercados eólicos

Países	Final 2008	Final de 2009
USA	25.170	35.064
China	12.210	25.805
Alemanha	23.903	25.777
Espanha	16.754	19.149
India	9.645	10.926
Italia	3.736	4.850
França	3.404	4.492
Reino Unido	3.241	4.051
Portugal	2.862	3.535
Dinamarca	3.180	3.465

(GWEC, 2009, 2010)

Empresas líderes na fabricação de aerogeradores (2008)



(DEWI, 2009)

Potência Eólica Offshore

TABLE 1. OPERATIONAL OFFSHORE WIND POWER PLANTS, TO JUNE 2009

Project	Country	MW	Turbines	Date on-line
Vindby	Denmark	5	11	1991
Løly	Netherlands	2	4	1994
Tunø Knob	Denmark	5	10	1995
Irene Vorrink (Dronter)	Netherlands	17	28	1996
Gotland (Bockstigen)	Sweden	3	5	1998
Blyth Offshore	UK	4	2	2000
Middelgrunden	Denmark	40	20	2001
Utgrunden	Sweden	11	7	2001
Yttre Stengrund	Sweden	10	5	2001
Horns Rev	Denmark	160	80	2002
Fredrikshavn phase 1	Denmark	3	1	2002
Fredrikshavn phase 2	Denmark	8	3	2003
Nysted Havmøllepark	Denmark	166	72	2003
Renland	Denmark	17	8	2003
Samsø	Denmark	23	10	2003
North Hoyle	UK	60	30	2004
Arklow Bank phase 1	Ireland	25	7	2004
Embs Emden	Germany	5	1	2004
Hokkaido	Japan	1	2	2004
Scroby Sands	UK	60	30	2004
Kentish Flats	UK	90	30	2005
Barrow Offshore Wind	UK	90	30	2006
Brotting	Germany	3	1	2006
Egmond aan Zee	Netherlands	108	36	2006
Beatrice Demonstration	UK	10	2	2007
Burbo Offshore Wind Farm	UK	90	25	2007
Kemi Ajos phase I	Finland	9	3	2007
Lillgrund	Sweden	110	48	2007
Suizhong 36-1	China	2	1	2007
Insee Dowling	UK	97	27	2008
Kemi Ajos phase II	Finland	15	5	2008
Princess Amalia (Q7)	Netherlands	120	60	2008
Lynn	UK	97	27	2008
Hooksiel Demonstrator	Germany	5	1	2008



2.055,9 MW Offshore (2010)

882 MW (Reino Unido)

639 MW (Dinamarca)

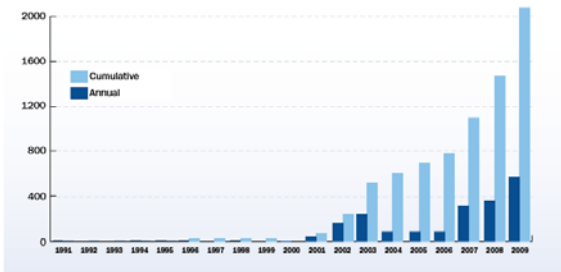
246 MW (Holanda)

www.renewable-energy-world.com/articles
www.dw-1.com/assets/documents/A%20May%202007.pdf

Cer

Nome do Evento | Mês Ano

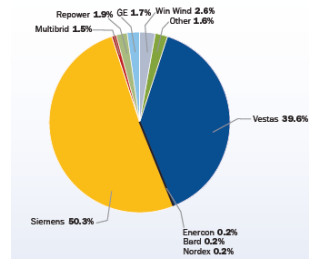
Potência Eólica Offshore



NATIONAL BREAKDOWN OF OFFSHORE WIND INSTALLATIONS END 2009

FIGURE 3.1

Country	UK	Denmark	Sweden	Netherlands	Germany	Belgium	Ireland	Finland	Norway	Total
N° of farms	12	9	5	4	4	1	1	1	1	38
N° of turbines	287	305	75	130	9	6	7	8	1	828
N° of MW	882.8	639.15	163.65	246.8	42	30	25.2	24	2.3	2,056



Participação dos principais fabricantes de aerogeradores

Evolução da Potência Instalada e participação dos principais mercados

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - Cepel

Nome do Evento | Mês Ano

Usinas Eólicas em Operação no Brasil

USINAS EÓLICAS em Operação			
Usina	Potência (kW)	Proprietário	Município
Praia Formosa	104.400	Eólica Formosa Geração e Comercialização de Energia S.A.	Camocim - CE
Parque Eólico de Osório	50.000	Ventos do Sul Energia S/A	Osório - RS
Parque Eólico Sangradouro	50.000	Ventos do Sul Energia S/A	Osório - RS
Parque Eólico dos Índios	50.000	Ventos do Sul Energia S/A	Osório - RS
RN 15 - Rio do Fogo	49.300	Energias Renováveis do Brasil S.A.	Rio do Fogo - RN

Situação Atual dos Empreendimentos de Energia Eólica		
N.º de empreendimentos	Situação	Potência Associada [MW]
38	outorgada	1.996,3
2	em construção	70,0
45	em operação	797,9

Potência Total:
797,9 MW Instalados (0,73%)
Total:
45 Usinas em Operação

PROINFA - Eólica (Potência)	
Contratado	1.422,96 MW
Em Operação	737,98 MW
Em Obras	103,35 MW

PROINFA - Eólica (nº de empreendimentos)	
Contratado	54
Em Operação	36
Em Obras	4

(Fonte: Acompanhamento das Centrais Geradoras do PROINFA. ANEEL, 01/06/2010)

(Fonte: Banco de Informações de Geração. ANEEL, 1/06/2010)

Nome do Evento | Mês Ano

Usina Eólica de Taíba - CE



5 MW

(WOBENWINDPOWER, 2008)

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - Cepel

Nome do Evento | Mês Ano

Usina Eólica de Prainha - CE



10 MW

(WOBENWINDPOWER, 2008)
Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - Cepel

Nome do Evento | Mês Ano

Usina Eólica de Mucuripe - CE



2,4 MW

(WOBENWINDPOWER, 2008)
Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - Cepel

Nome do Evento | Mês Ano

Parque Eólico-Elétrica de Palmas - PR



2,5 MW

(WOBENWINDPOWER, 2008)
Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - Cepel

Nome do Evento | Mês Ano

Usina Eólica de Bom Jardim - SC



0,6 MW

(WOBENWINDPOWER, 2008)
Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - Cepel

Nome do Evento | Mês Ano

Usina Eólica de Macau - RN



1,8 MW

(WOBENWINDPOWER, 2008)
Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - Cepel

Nome do Evento | Mês Ano

Usina Eólica de Água Doce - SC



4,8 MW

(www.ecodebate.com.br)
Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - Cepel

Nome do Evento | Mês Ano

Parque Eólico do Horizonte - SC



9 MW

(WOBENWINDPOWER, 2008)
Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - Cepel

Nome do Evento | Mês Ano

Usina Eólica de Rio do Fogo - RN



49,3 MW

(CRESESB, 2006)
Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - Cepel

Nome do Evento | Mês Ano

Parque Eólico de Osório, Sangradouro e Índios - RS



50 MW
50 MW
50 MW

(CRESESB, 2006)
Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - Cepel

Nome do Evento | Mês Ano

Central Geradora Eólica Millennium - PB



10,2 MW

(WOBENWINDPOWER, 2008)
Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - Cepel

Nome do Evento | Mês Ano

Usina Eólica de Beberibe - CE



25,6 MW

(<http://fotos.passaura.com.br/main.php>)

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - Cepel

Nome do Evento | Mês Ano

Eólica Paracuru - CE



23,5 MW

(http://flickr.com/photos/evelin_lima/2897091979/)

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - Cepel

Nome do Evento | Mês Ano

Processo Licitatório para Contratação de Empreendimentos Eólicos - Dezembro 2009

Resultados:

Preço inicial: R\$ 189.00/MWh

Preço final: R\$ 148.39/MWh (Média) (-21.49%)

PPA = 20 anos

Estados	Projetos		Potência	
	#	%	(MW)	%
Bahia	18	25.4	390.0	21.6
Ceará	21	29.5	542.7	30.0
Rio Grande do Norte	23	32.4	657.0	36.4
Rio Grande do Sul	8	11.6	186.0	10.3
Sergipe	1	1.4	30.0	1.7
Total	71	100	1805.7	100

Tecnologia Eólica

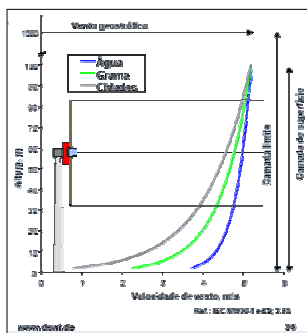
- Princípios físicos
- Principais componentes/aplicações
- Tipos de aerogeradores
- Instalações on-shore e off-shore



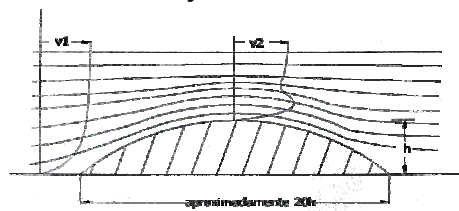
© Mike Theiss
UltimateChase.com

Fatores de Influência na Velocidade do Vento

Variação do perfil da velocidade do vento em relação a altura:

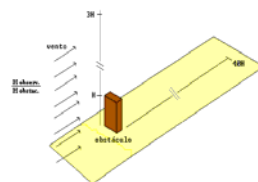


Variação do perfil da velocidade do vento em relação ao relevo:



(Gasch & Twele, 2002)

Variação do perfil da velocidade do vento em relação aos obstáculos:



Potência extraída do vento

$$P = 1/2 \rho A V^3$$

Potência Máxima Aproveitada (Teórica)

$$P = C_p 1/2 \rho A V^3$$

Máxima potência teórica aproveitável:

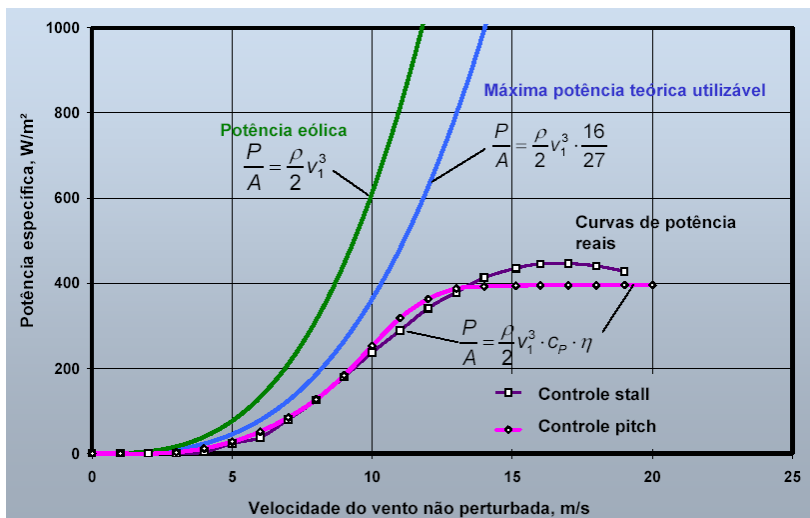
$$C_p = 16/27 \text{ aprox. } 0.59$$

Potência Máxima Aproveitada (Real)

$$P = \eta C_p 1/2 \rho A V^3$$

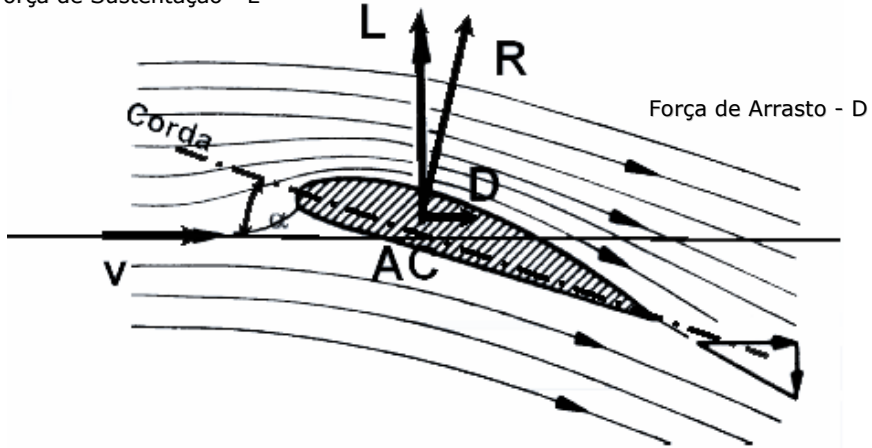
Eficiência da Máquina Eólica: η

Curva de Potência

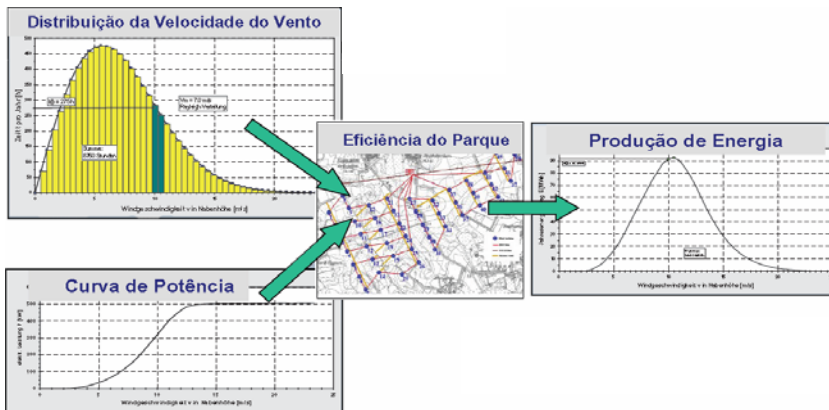


Forças Aerodinâmicas no Corte de uma Pá

Força de Sustentação - L



Produção de Energia Elétrica



(DEWI, 2006)

$$\text{Fator de Capacidade (FC)} = \frac{\text{Produção Anual de Energia Elétrica}}{8760 * (\text{Potência Nominal})}$$

Aerogerador



Eixo Vertical

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - Cepel



Eixo Horizontal

Nome do Evento | Mês Ano

Aplicações da Energia Eólica



Catavento – Bombeamento d'água

- Residências
- Fazendas
- Aplicações Remotas

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - Cepel

Nome do Evento | Mês Ano

Aplicações da Energia Eólica



Pequeno Porte ($\leq 10\text{kW}$)

- Residências
- Fazendas
- Aplicações Remotas



Intermediário (10-250 kW)

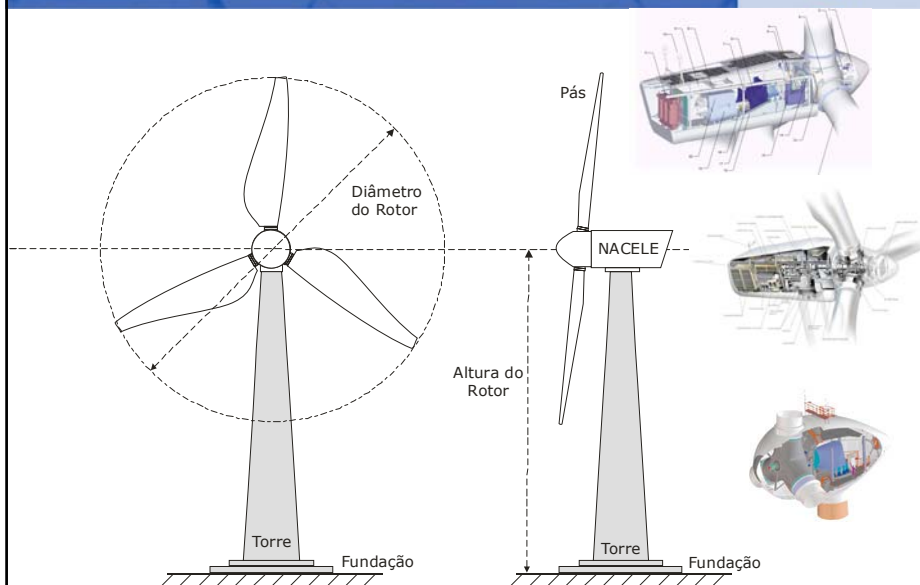
- Village Power
- Sistemas Híbridos
- Geração Distribuída



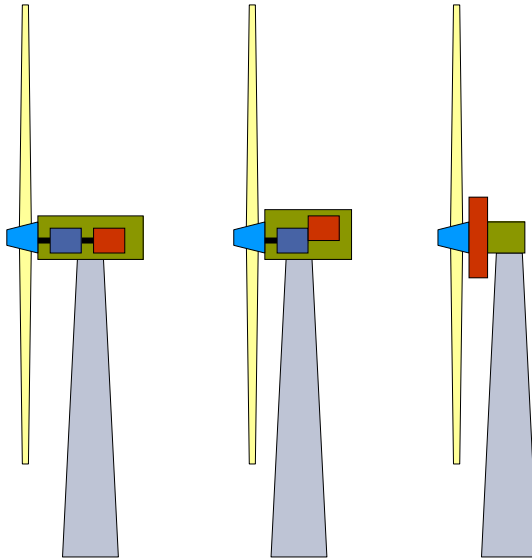
Grande Porte (250 kW - +2MW)








- Fazendas Eólicas
- Geração Distribuída

Elementos do Aerogerador de Eixo Horizontal

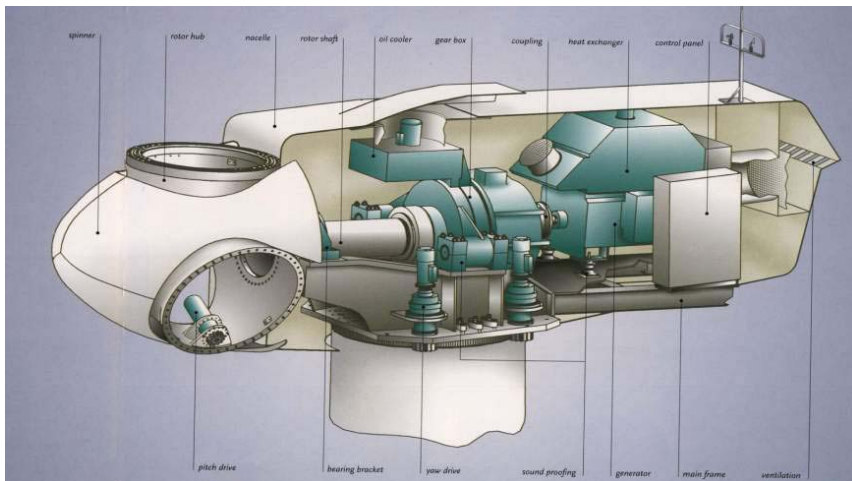


Configurações de Aerogeradores



-  Cubo
-  Rotor
-  Eixo
-  Multiplicador
-  Gerador
-  Nacele
-  Torre

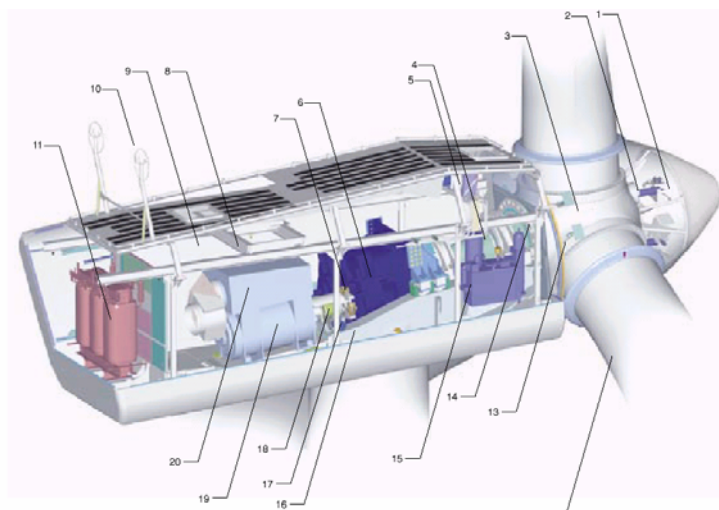
Concepção Dinamarquesa de Aerogeradores (com caixa de engrenagem)



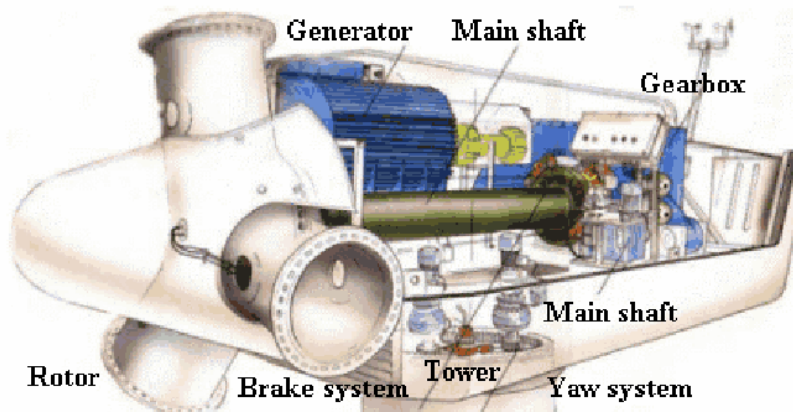
Concepção Dinamarquesa de Aerogeradores (com caixa de engrenagem)



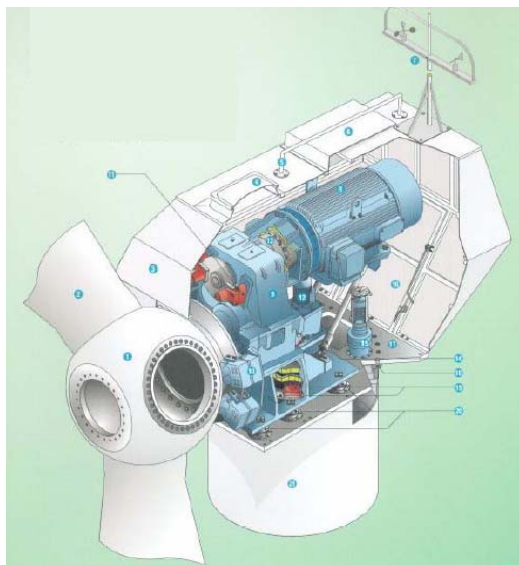
Concepção Dinamarquesa de Aerogeradores (com caixa de engrenagem)



Caixa de Engrenagem ao Fundo da Nacele



Redução de Espaço na Nacele Utilizando Caixa de Engrenagem Acoplado ao Gerador



Caixa de Engrenagens

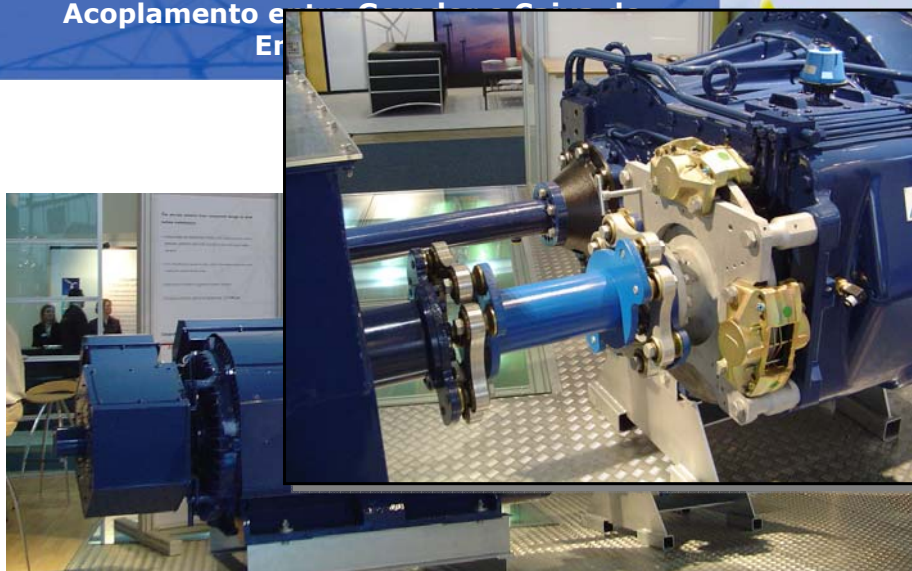


Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - Cepel

Nome do Evento | Mês Ano

Acoplamento e

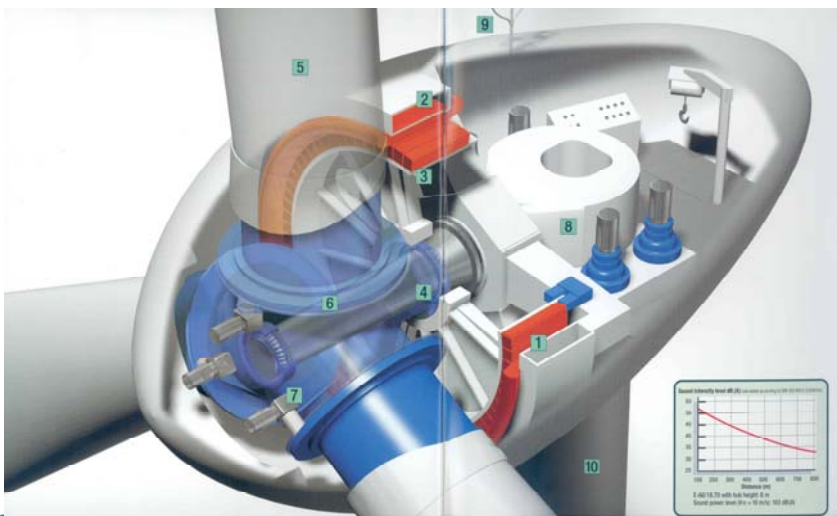
Er



Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - Cepel

Nome do Evento | Mês Ano

Concepção Enercon Sem Caixa de Engrenagens



Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - Cepel

Nome do Evento | Mês Ano

Instalações On-Shore - Transporte



(DEWI,2005)

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - Cepel

Nome do Evento | Mês Ano

Instalações On-Shore - Transporte



Enercon E-112

Instalações On-Shore - Fundação



Instalações On-Shore - Torre



Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - Cepel

Nome do Evento | Mês Ano

Instalações On-Shore - Nacele



Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - Cepel

Nome do Evento | Mês Ano

Instalações On-Shore - Nacele



(DEWI,2005)

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - Cepel

Nome do Evento | Mês Ano

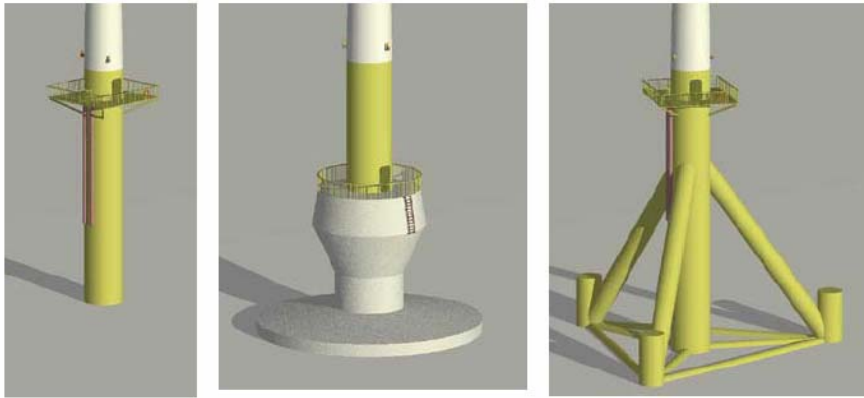
Instalações On-Shore - Pás



Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - Cepel

Nome do Evento | Mês Ano

Instalações Off-Shore - Fundação



Instalações Off-Shore - Transporte



Instalações Off-Shore - Transporte



© Gunnar Britse

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - Cepel

Nome do Evento | Mês Ano

Instalações Off-Shore Torre e Nacele



© Gunnar Britse

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - Cepel



Boekstigen, Sweden © Gunnar Britse

Nome do Evento | Mês Ano

Instalações Off-Shore – Transmissão e Conexão Elétrica



Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - Cepel

Nome do Evento | Mês Ano

Instalações Off-Shore – Transmissão e Conexão Elétrica



© Gunnar Britse / www.windpowerphotos.com

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - Cepel

Nome do Evento | Mês Ano

Instalações Off-Shore

Vidby Offshore Wind Farm – DK (1991)
(450 kW x 11 = 4,95 MW) 2-3km da costa



Instalações Off-Shore

Horns Ver Offshore Wind Farm (2002)
(2MW x 80 = 160 MW) 14-20km da costa



Soluções para Projetos Off-Shore



Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - Cepel

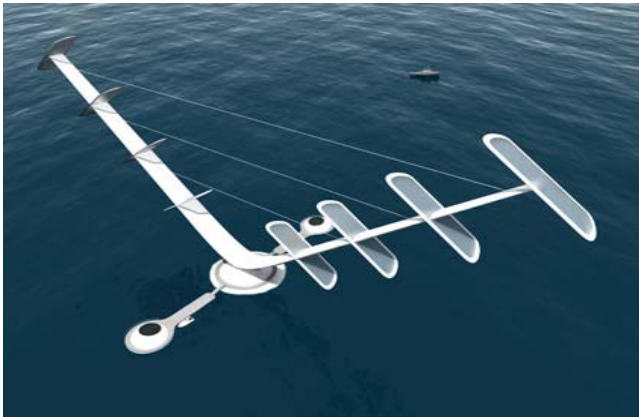
Nome do Evento | Mês Ano

Soluções para Projetos Off-Shore



Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - Cepel

Nome do Evento | Mês Ano



Altura: 144 m.
Potência: 9 MW.
Previsão de
Operação: 2015

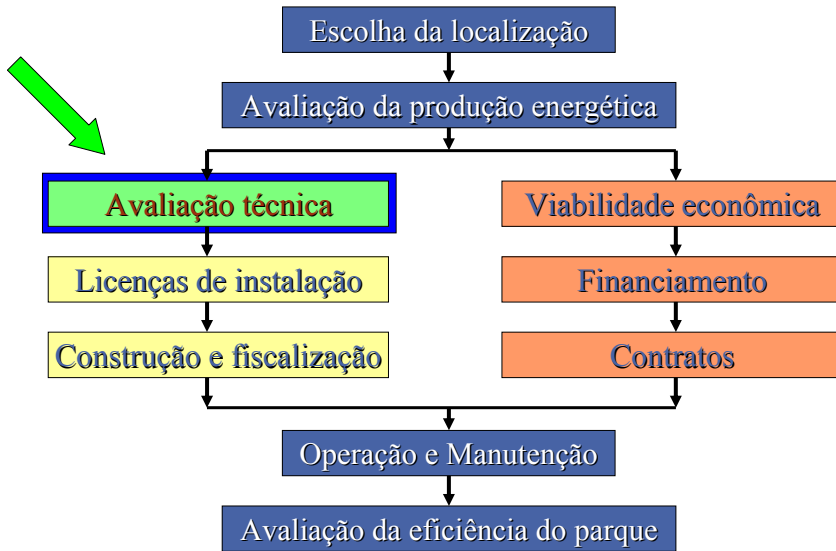
Planta Piloto: UK

(NEW ENERGY, nº 3/July 2008)

Viabilidade Técnica de Projetos Eólicos

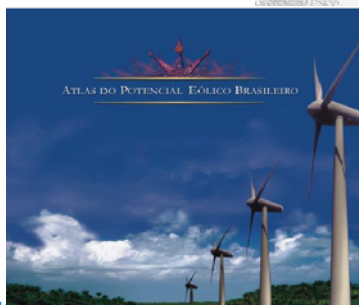
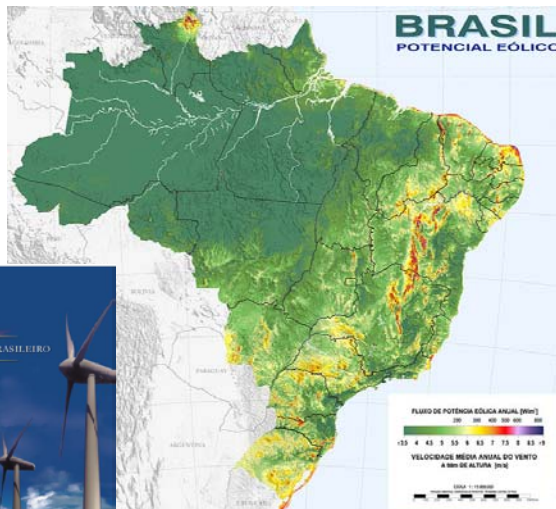
- Medição de vento - anemometria
- Atlas do potencial eólico brasileiro
- Avaliação de sítios eólicos

Etapas do Planejamento de um Empreendimento Eólico



Atlas do Potencial Eólico Brasileiro

Início da Pesquisa pelo Atlas Eólico



Dúvidas

O Atlas indica as regiões com os melhores ventos

Onde estão os melhores locais?

São planos?

Estão disponíveis?

Existe rede de distribuição?

Existem rodovias?

Existem subestações?



Como Responder as Dúvidas ?

1. Forma manual – Prossequindo a investigação no Atlas Eólico, nos Mapas Cartográficos, nas imagens de satélite disponíveis, nos diagramas elétricos existentes, procurando evidências de vento, obtendo informações com terceiros...








Programar uma visita técnica à cada um das regiões, para identificar as áreas que apresentam os melhores ventos, de modo a realizar as investigações complementares:

- Procurar pelo local promissor, através de consulta aos moradores da região;
- Procurar por evidências objetivas (árvores curvadas na mesma direção, formato de dunas, locais onde não existem moradias, etc);
- Procurar por estações meteorológicas na região e analisar os dados disponíveis.

Incertezas na medição da velocidade do vento, durante a avaliação do potencial eólico de um sítio promissor, durante a calibração de um sítio ou durante o teste de desempenho de uma turbina eólica (medição da curva de potência de aerogerador), contribuem para que ocorram incertezas no prognóstico de energia produzida. Ou seja, significa risco para o empreendimento eólico.

Não existe uma outra área de atuação onde a precisão na medição da velocidade do vento tenha tanta importância.

Tipos de Anemômetros de Copo

				
NRG Maximum 40 (NRG)	Risø P2546 (RIS)	Thies First Class (THF)	Vaisala WAA151 (VAI)	Vector L100K (VEC)

Sensores de Direção



Tipos de Anemômetros Ultrasônico



Figura: http://www.campbellsci.com/documents/lit/b_csat3.pdf

Torre Tubular e Fixação do Datalogger



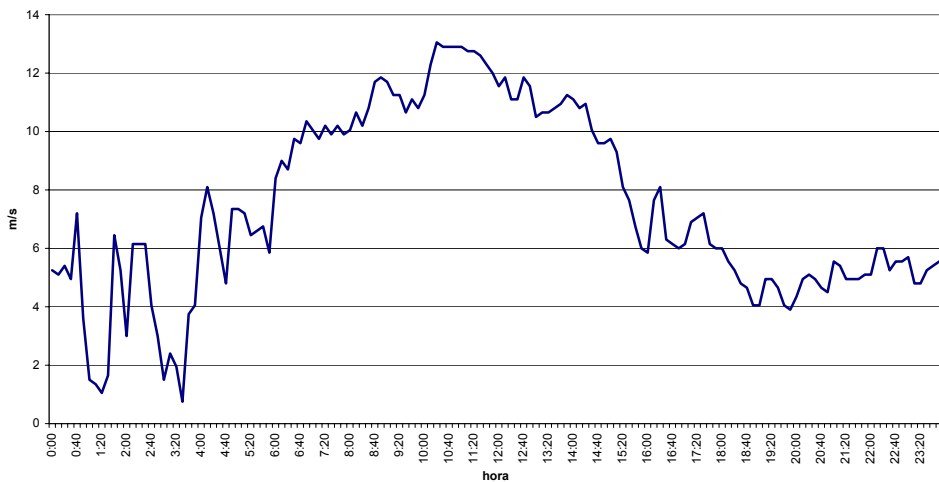
Detalhe do Datalogger



Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - Cepel

Nome do Evento | Mês Ano

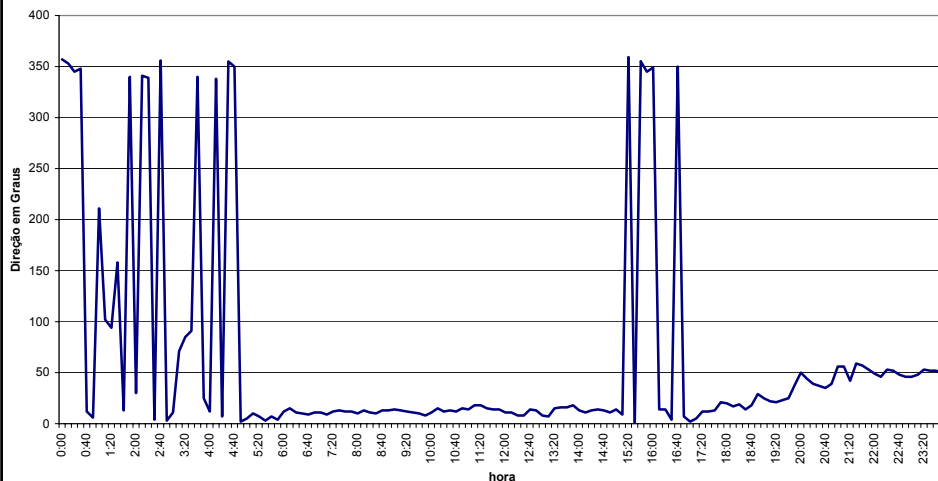
Exemplo da Distribuição de Velocidade ao Longo de um Dia



Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - Cepel

Nome do Evento | Mês Ano

Exemplo da Distribuição da Direção do Vento ao Longo de um Dia

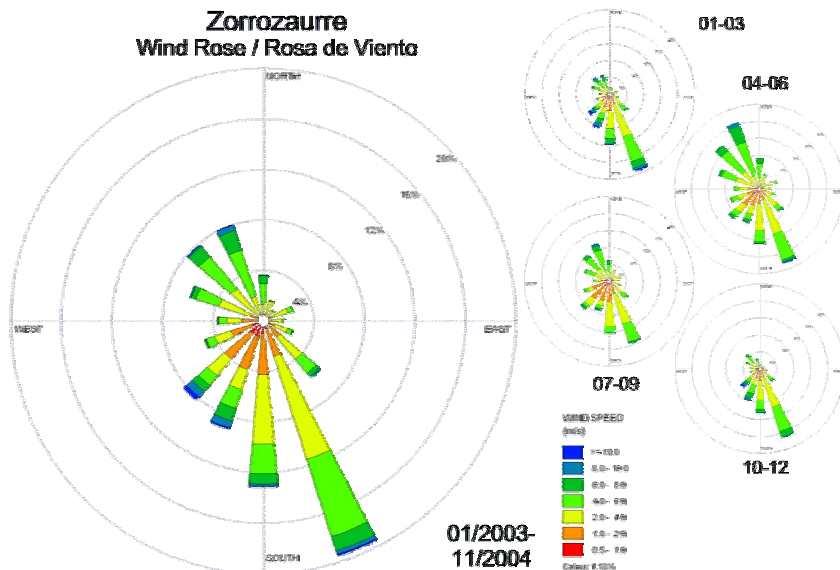


Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - Cepel

Nome do Evento | Mês Ano

Exemplo de Rosa dos Ventos

Zorrozaurre Wind Rose / Rosa de Viento



Ricardo Marques Dutra
dutra@cepel.br
21 2598-6174



Ministério de
Minas e Energia

