

Sustentabilidade na Geração e uso de Energia no Brasil: Os próximos 20 anos.



# Energia Eólica no Brasil: Situação atual e Perspectivas

*Everaldo Alencar Feitosa*

**Centro Brasileiro de Energia Eólica**

Recife – PE

[www.eolica.com.br](http://www.eolica.com.br)

# Turbina Eólica de Pequeno Porte X Turbina Eólica de Grande Porte



## Características:



- Controle: microprocessador
- Conexão com rede elétrica



## Turbinas de Pequeno Porte

### Características:

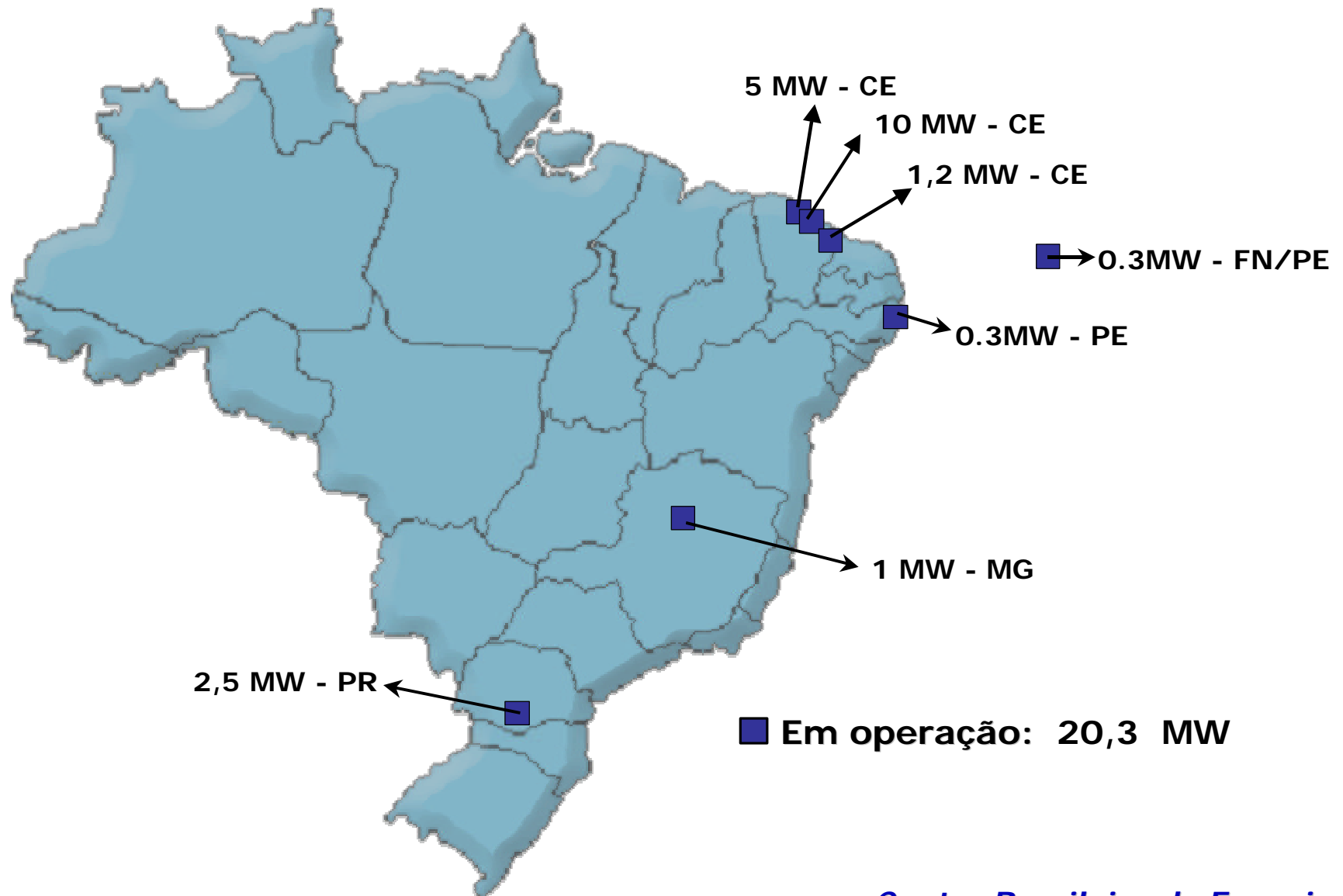
- Potência: 100W – 50kW
- Controle: mecânico
- Independente da rede



# Centrais Eólicas



# Localização de Projetos Eólicos no Brasil



# Centrais Eólicas



# Centrais Eólicas

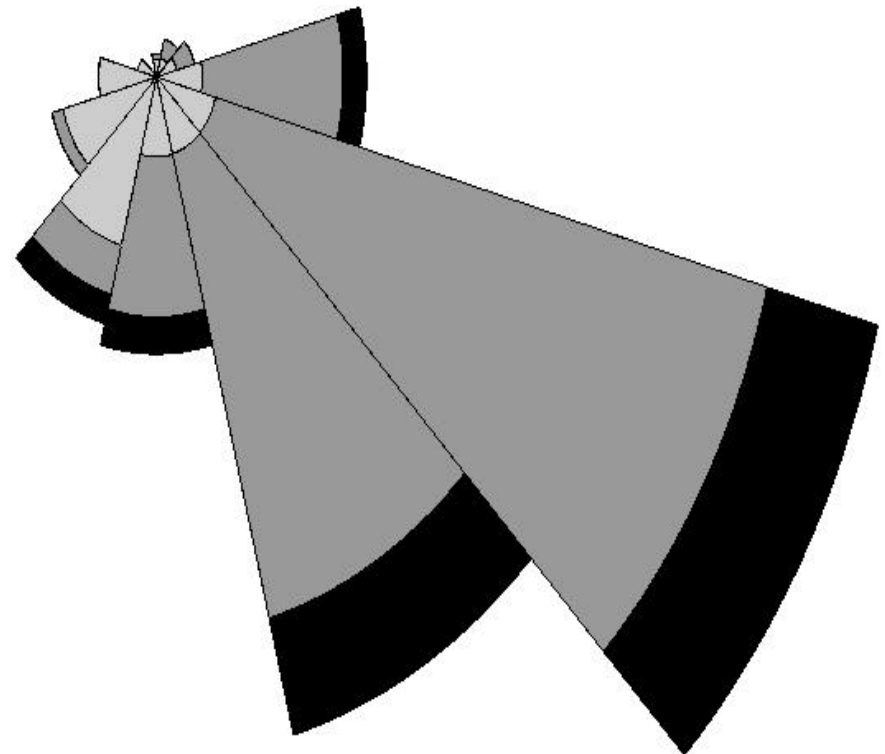
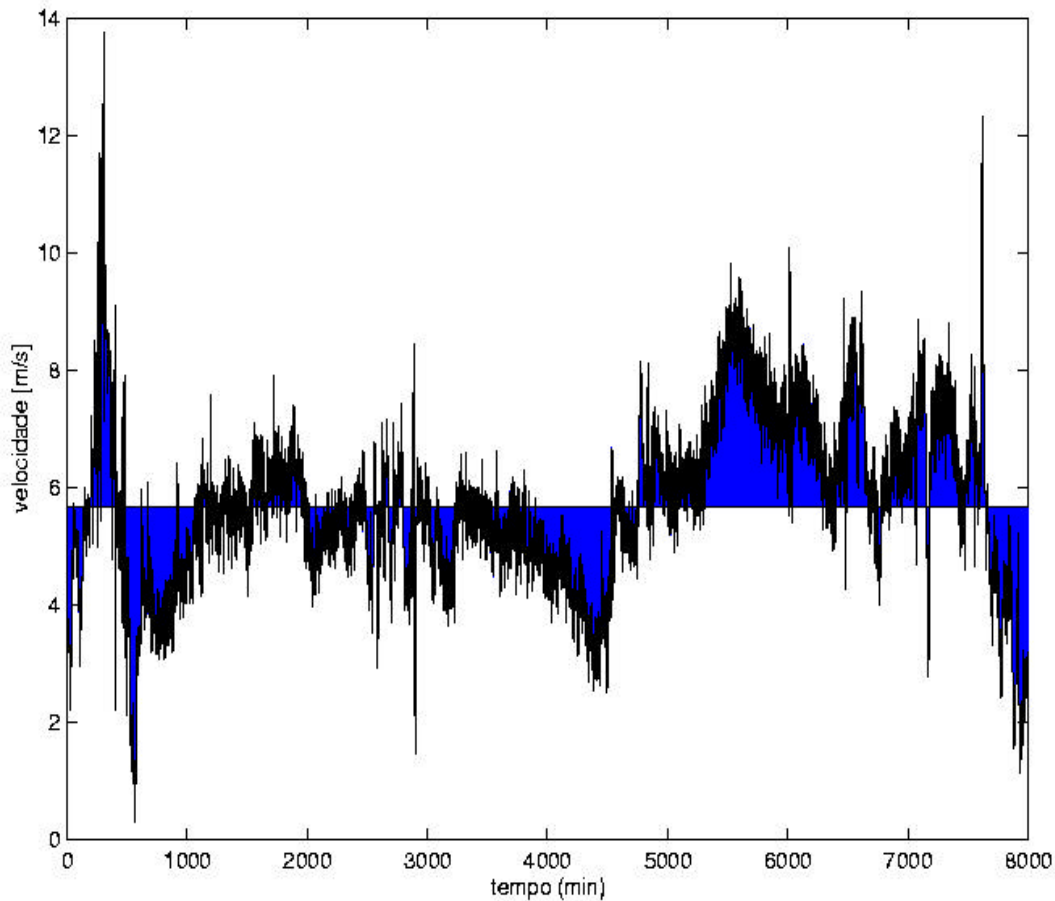


# eteorologia Eólica

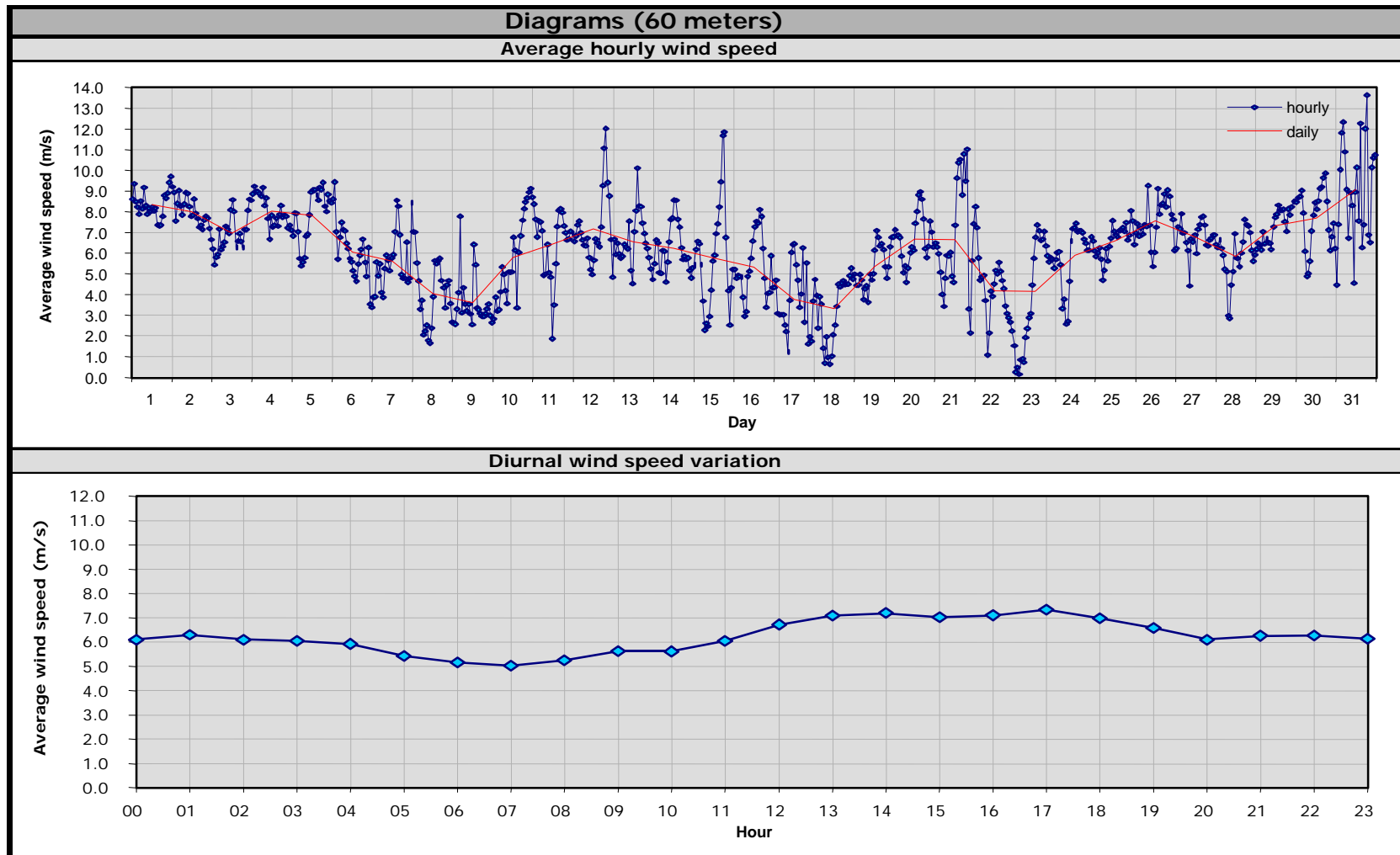
## idos de vento - anemógrafo computadorizado



### Velocidade de vento

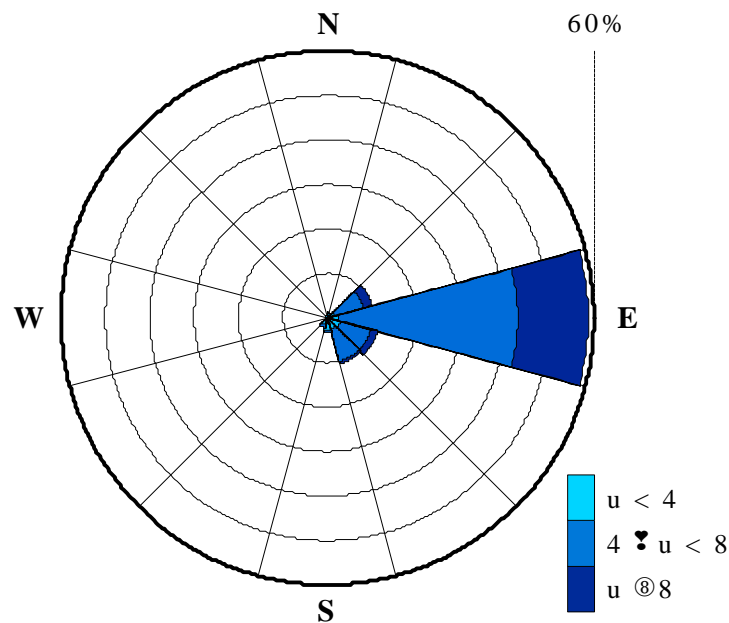


# Wind Analysis

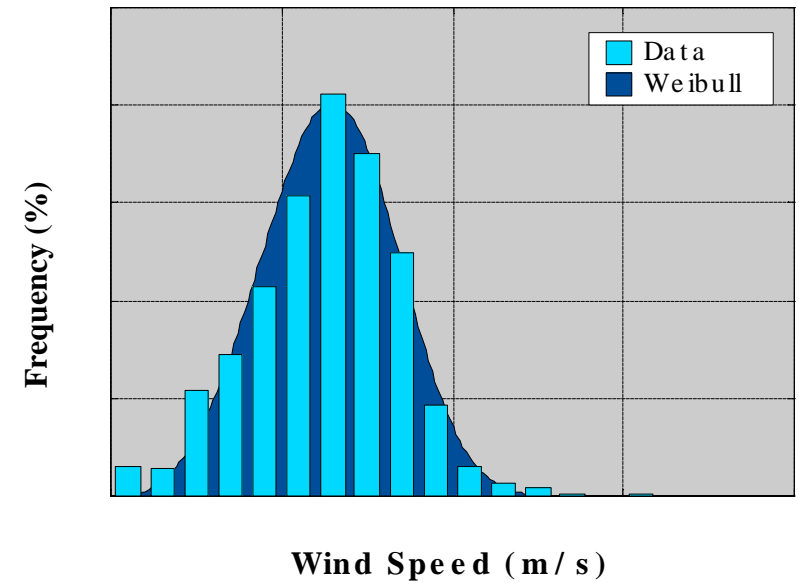


# Wind Analysis

## Wind Direction

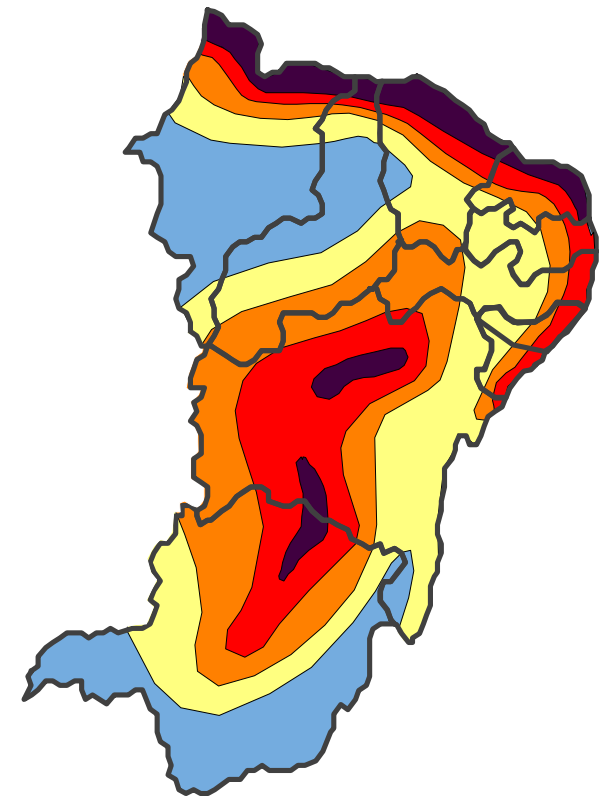
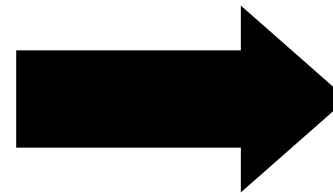
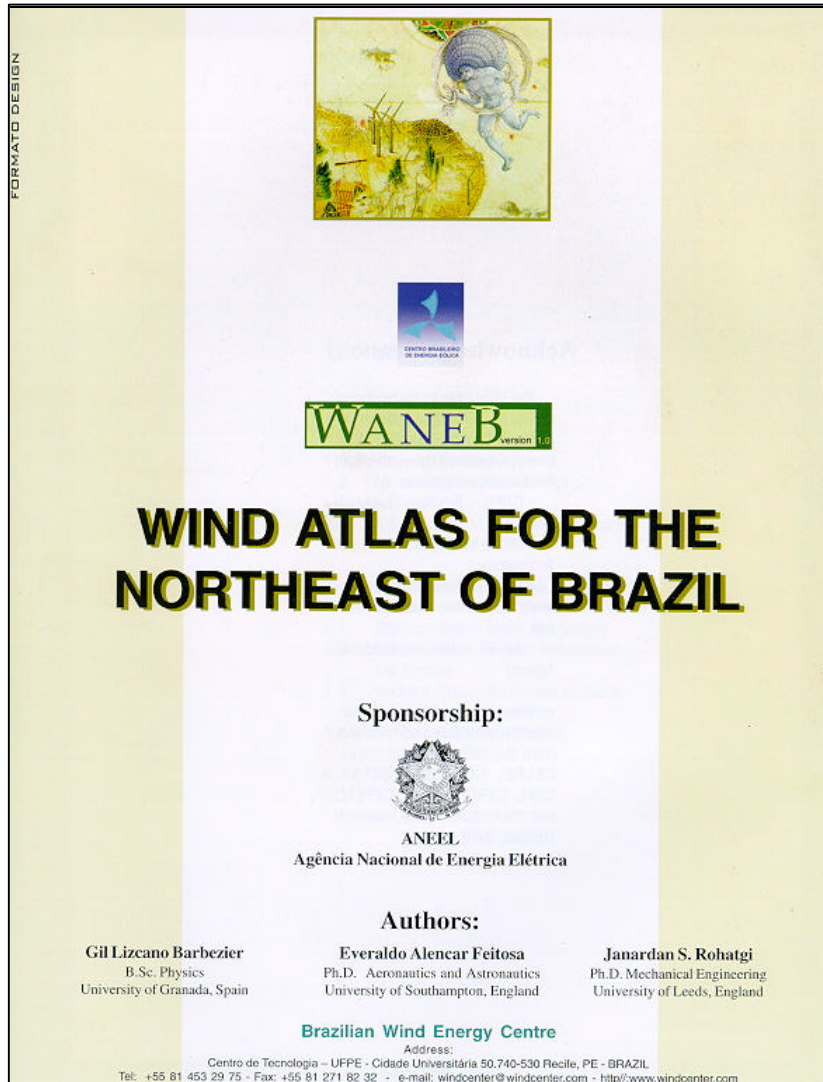


## Wind Speed Frequency Distribution



# Meteorologia Eólica

## ANEB - Wind Atlas of Northeast of Brazil

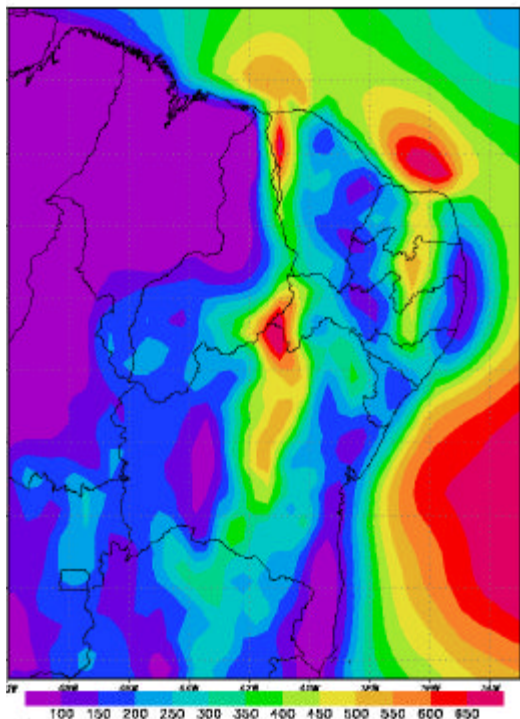


Velocidade do vento em m/s, à 50m de altura.

	Terreno Obstáculos	Terreno Plano	Litoral	Mar aberto	Topografia favorável
	> 6.0	> 7.5	> 8.5	> 9.0	> 11.5
	5.0 - 6.0	6.5 - 7.5	7.0 - 8.5	8.0 - 9.0	10.0 - 11.5
	4.5 - 5.0	5.5 - 6.5	6.0 - 7.0	7.0 - 8.0	8.5 - 10.0
	3.5 - 4.5	4.5 - 5.5	5.0 - 6.0	5.5 - 7.0	7.0 - 8.5
	< 3.5	< 4.5	< 5.0	< 5.5	< 7.0

# Potencial Eólico

## Análise de potencial eólico - medidas e simulações - Atlas Eólico



**Modelo  
atmosférico de  
mesoscala MM5**  
(simulações realizadas pelo  
CBEE)

Densidade de Potência,  $DP = \frac{1}{2} \rho \Sigma_{\text{malha}} \langle V^3 \rangle$  [W/m<sup>2</sup>]

Potência Total,  $P_t = DP \times \text{Área (NE)} = 1.2 \text{ TW}$

Fator de Uso do Solo,  $f_s = 50 \%$

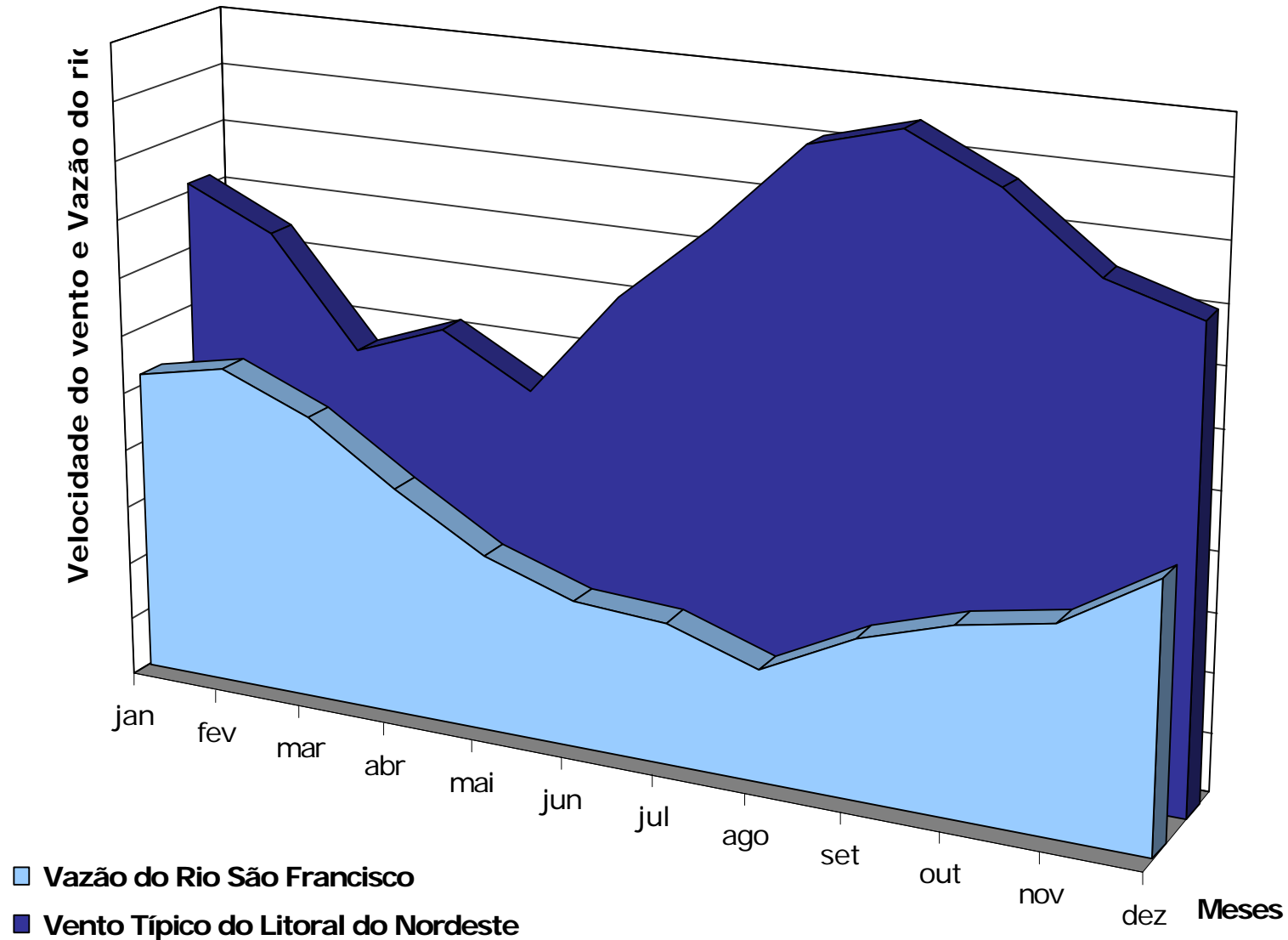
Potencial Energético Bruto,  $P_e = f_s \times P_t = 0.6 \text{ TW}$

Fator de Turbulência,  $f_t = 1 \%$

Potencial Disponível,  $P = f_t \times P_e = 6.000 \text{ MW}$

# Energia Eólica e Geração Hidrelétrica

## Geração Nordeste e o dilema do uso da água



# Proeólica

## Programa Emergencial de Geração de Energia Eólica

---



- 1050 MW até 2003
- PPA - Contrato de compra de eletricidade (15 anos): Eletrobrás
- Prêmio: Adicional variável em função do início

# Energia Renovável

**PROEÓLICA**

**1 050 MW**

**PROINFRA: 3 300 MW**

# PROJETOS APROVADOS PELA ANEEL EM 14/12/2001

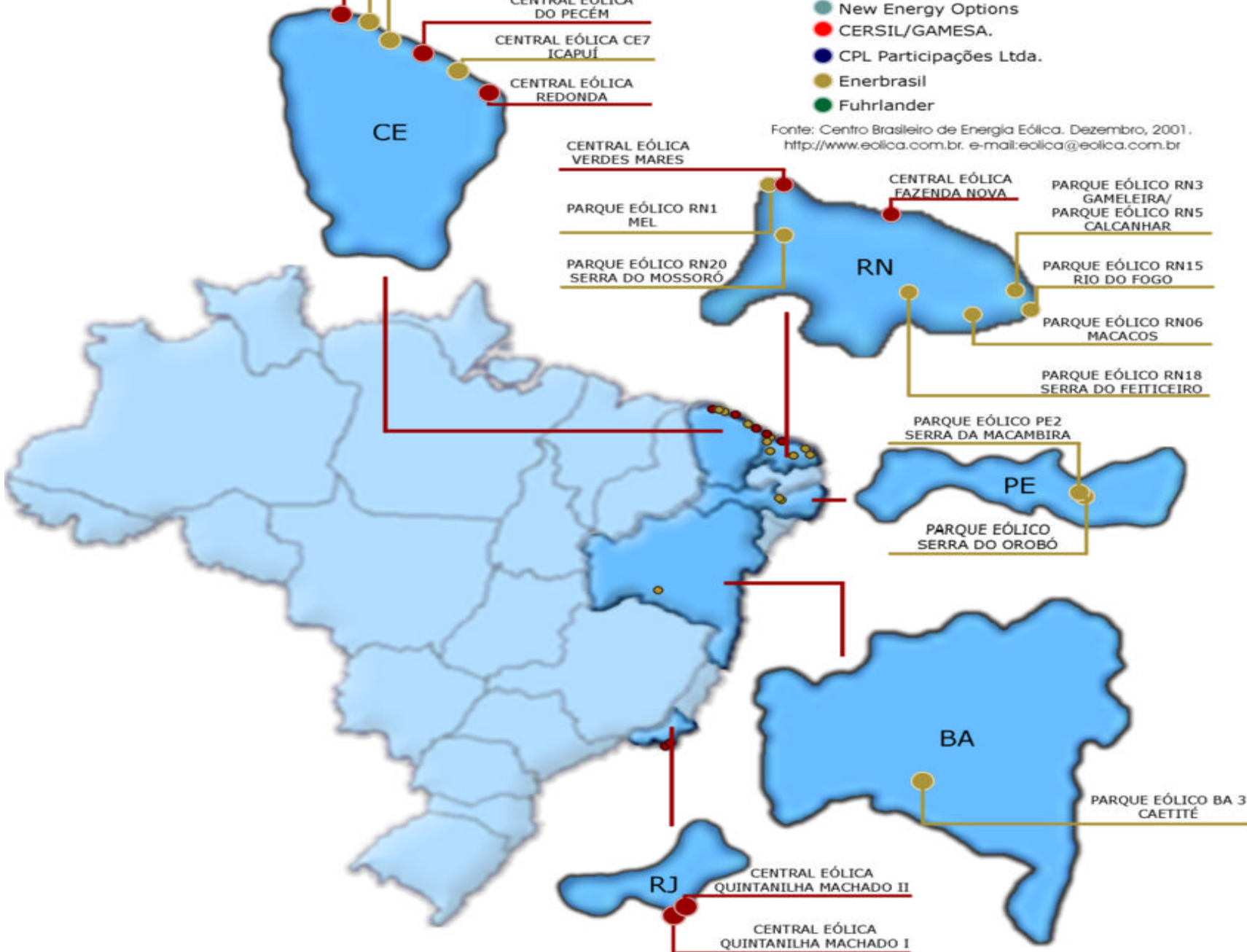


PARQUE EÓLICO CE4 LAGOINHA  
 CENTRAL EÓLICA MACEIÓ  
 PARQUE EÓLICO SALGADA  
 CENTRAL EÓLICA DO PECÉM  
 CENTRAL EÓLICA CE7 ICAPUÍ  
 CENTRAL EÓLICA REDONDA

## LEGENDA EMPREENDEDORES

- SIIF energies.
- New Energy Options
- CERSIL/GAMESA.
- CPL Participações Ltda.
- Enerbrasil
- Fuhrlander

Fonte: Centro Brasileiro de Energia Eólica. Dezembro, 2001.  
<http://www.eolica.com.br> e-mail: [eolica@eolica.com.br](mailto:eolica@eolica.com.br)



# PROJETOS APROVADOS PELA ANEEL EM 21/12/2001



PARQUE EÓLICO CE10  
ACARAÚ

CENTRAL EÓLICO  
VOLTA DO RIO

CENTRAL EÓLICA  
PRAIA DO MORGADO

PARQUE EÓLICO CE11  
CAMOCIM

CENTRAL EÓLICA  
PECÉM

CENTRAL EÓLICA  
PECÉM

PARQUE EÓLICO CES  
APODI

PARQUE EÓLICO CES  
BOCA DO POÇO

CE

## LEGENDA EMPREENDEDORES

- SIIF energies.
- New Energy Options
- CERSIL/GAMESA.
- CPL Participações Ltda.
- Enerbrasil
- Fuhrlander

Fonte: Centro Brasileiro de Energia Eólica. Dezembro, 2001.  
<http://www.eolica.com.br> e-mail: [eolica@eolica.com.br](mailto:eolica@eolica.com.br)

PARQUE EÓLICO RN11  
GUAMARÉ FASE 1 E 2

CENTRAL EÓLICO  
ALEGRIA II

CENTRAL EÓLICO  
ALEGRIA I

PARQUE EÓLICO RN10  
TRÊS IRMÃOS

PARQUE EÓLICO RN14  
SÃO BENTO DO NORTE

PARQUE EÓLICO RN4  
PITITINGA

PARQUE EÓLICO RN17  
SERRA DE SANTANA

RN

PARQUE EÓLICO RN19  
JUREMAL

CENTRAL EÓLICA  
PIRAUÁ

PARQUE EÓLICO PE5  
SERRA DO PAU D'ARCO

PE

PARQUE EÓLICO PE1  
MARCOLÂNDIA

PARQUE EÓLICO PE3  
POÇÃO

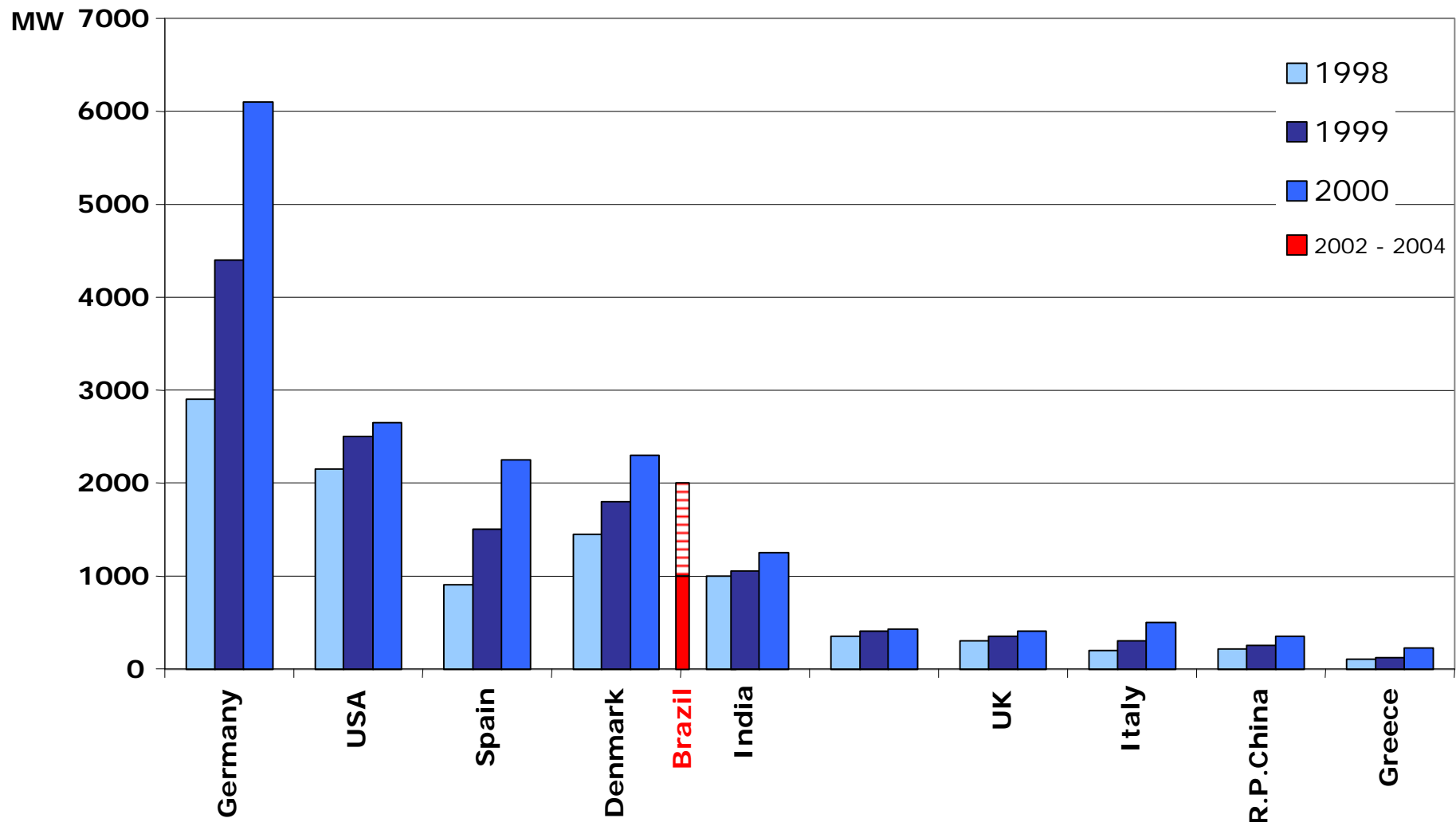
PARQUE EÓLICO PE6  
BUIQUE

BA

PARQUE EÓLICO BA1  
CONDE

PARQUE EÓLICO BA 2  
COSTA DOURADA

# The Top-10 Markets in the World



Source: BTM Consult ApS - March 2001 - EWEA

# Aspectos Econômicos

## União Européia



- Potência Total Instalada :  $\pm 600.000$  MW
- Introduzir 10% Eólica até 2010:  $\pm 60.000$  MW
- Capacidade total Instalada no Brasil:  $\pm 73.000$  MW

### Mercado Europeu - Energia Eólica

<b>Portugal:</b>	R\$ 180,00 / MWh
<b>Espanha:</b>	R\$ 170,00 / MWh
<b>Alemanha:</b>	R\$ 175,00 / MWh
<b>Itália:</b>	R\$ 225,00 / MWh

**Externalidades (ambiente, saúde, etc.) Externe, vol 10, EUR 18528, 1999**

**GÁS** → 20 Euro / MWh

**CARBÃO** → 50 Euro / MWh

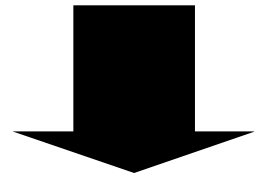
# Aspectos Econômicos

## Brasil



### Energia Eólica

**Brasil:**



US\$ 60 - 66 / MWh

- Combustível gratuito;
- Indepe de instabilidades políticas e econômicas;
- Curto prazo de implantação.

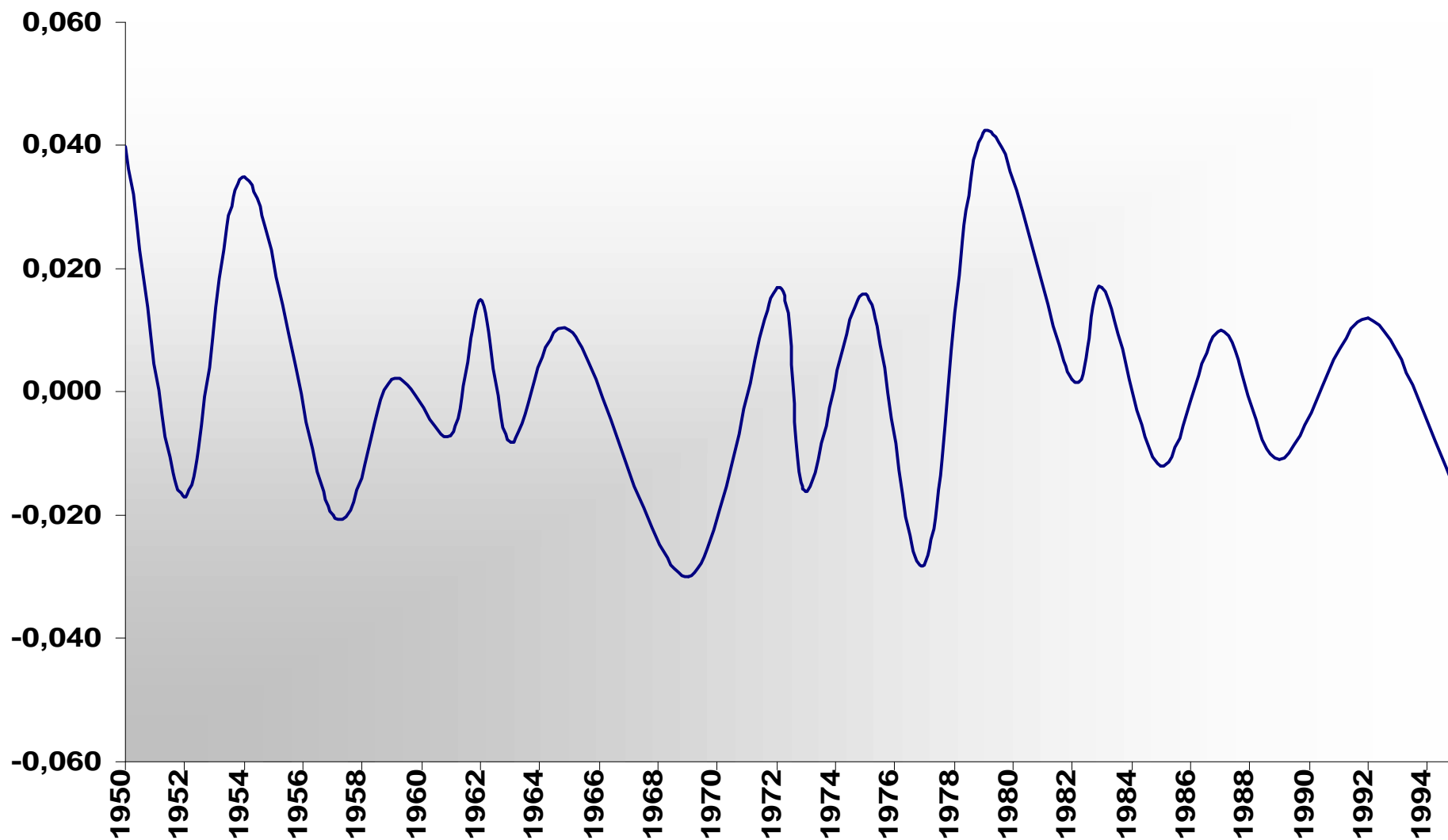
### Gás Natural

**Brasil:**

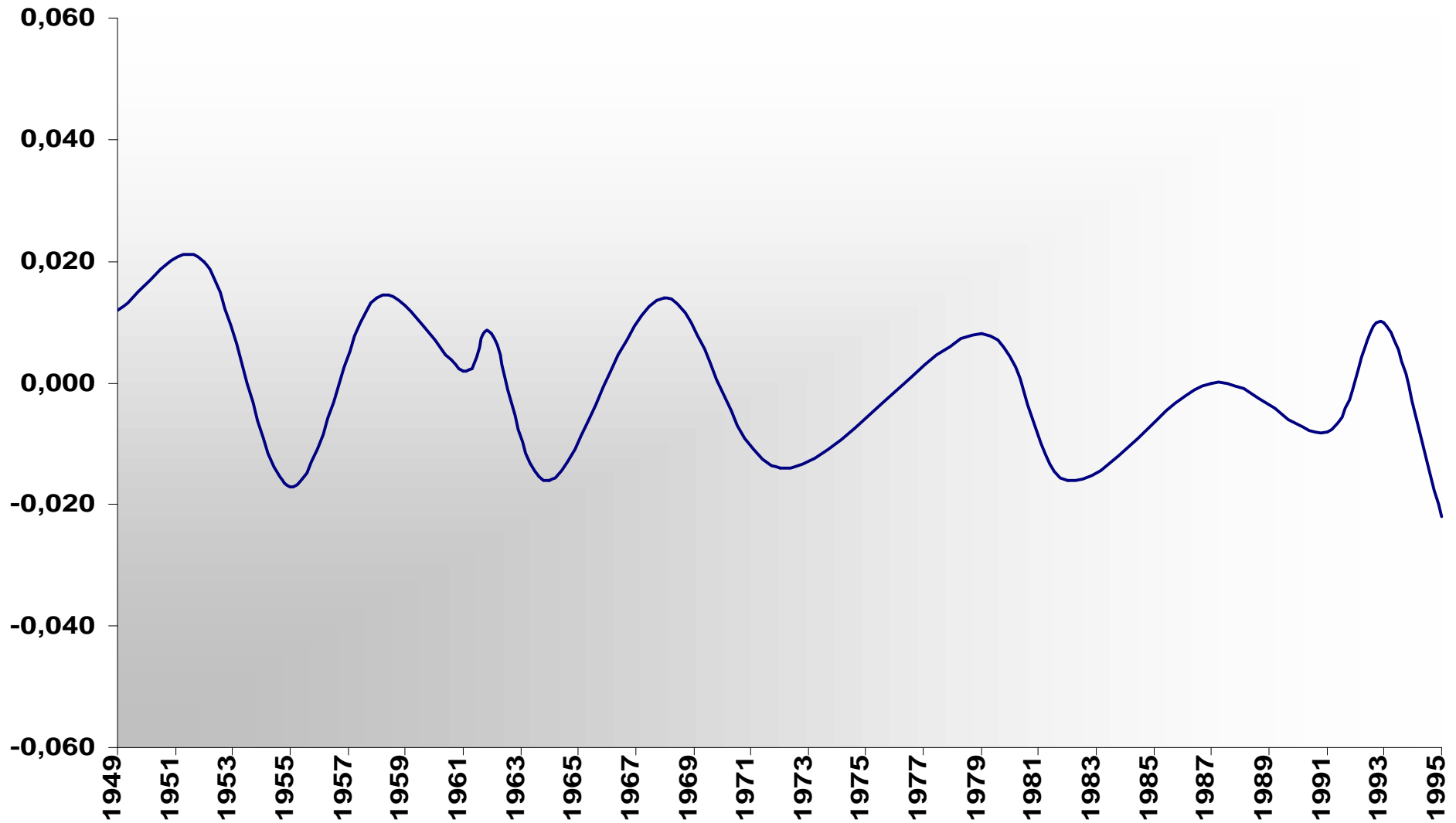
restrições  
ambientais ??

- Combustível dolarizado; tendência de aumento
- Depende de instabilidades políticas e econômicas;
- Médio - longo prazo de implantação.

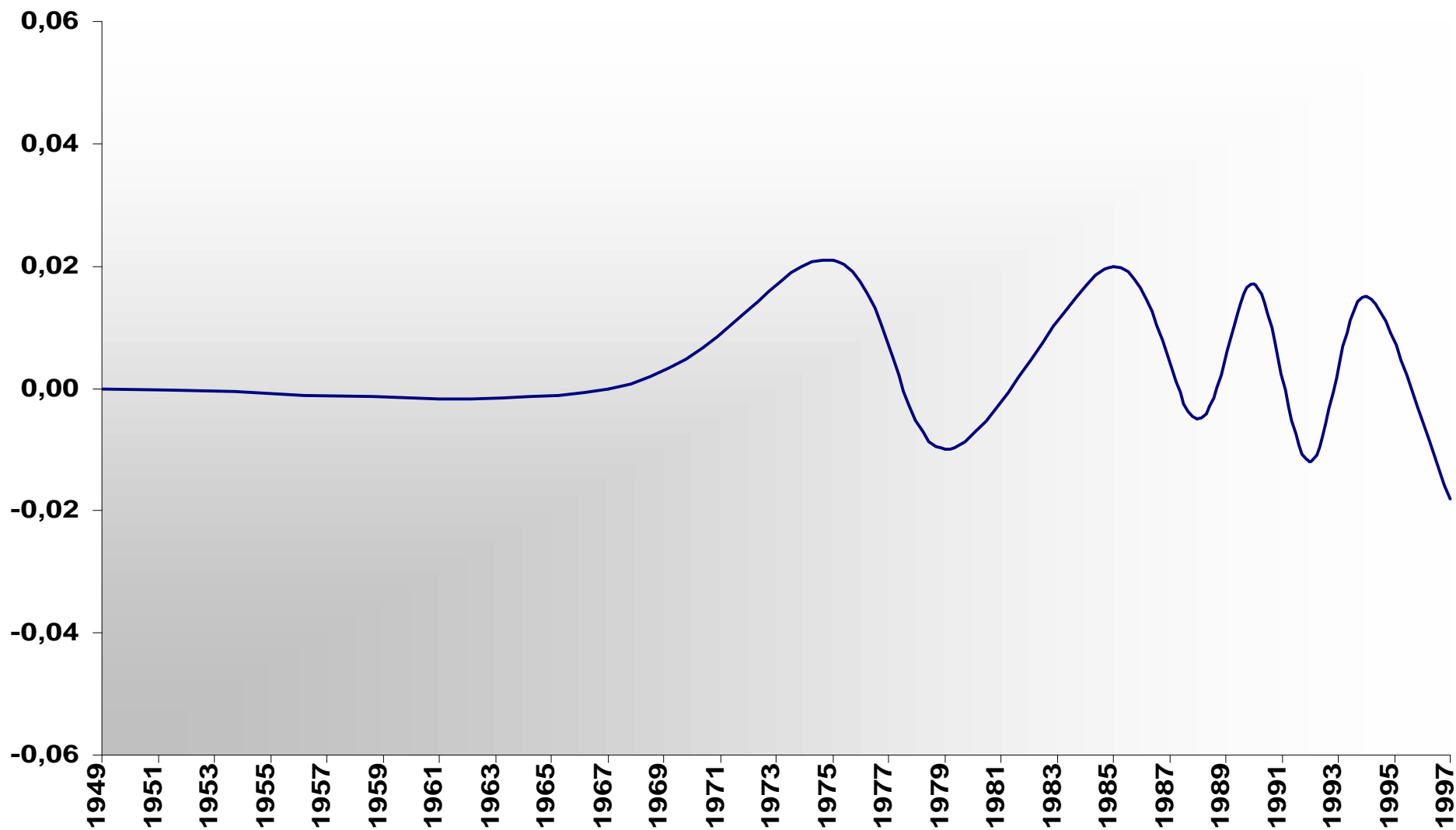
# Change in coal market shares (%)



# Change in natural gas market shares(%)



# Change in nuclear market shares (%)



# Sistemas Isolados

---

- Sistema Híbrido Eólico – Diesel

CCC – Subsídio ao Diesel em sistemas isolados

+/- R\$ 500 milhões / ano

Confiabilidade na tecnologia

# Fernando de Noronha/PE

## Projeto CBEE / ANEEL



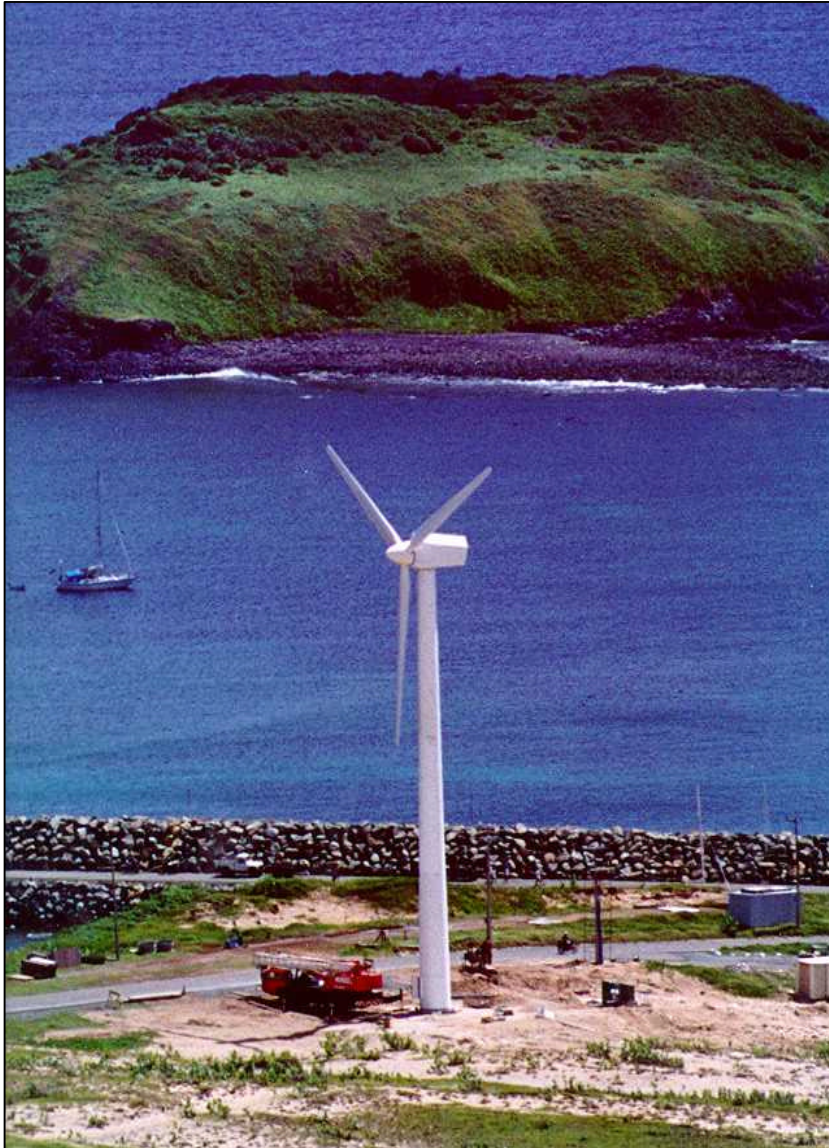
*Maior sistema híbrido eólico/diesel da America do Sul*

Características:

- Torre: tubular de 30m de altura
- Rotor: fibra de vidro/poliéster, 27m diâmetro
- Controle de potência: ângulo de passo
- Geradores: 225kW/50kW assíncrono

# Fernando de Noronha/PE

## Projeto CBEE / ANEEL



*Maior sistema híbrido eólico/diesel da America do Sul*

- 
- Operacional desde Agosto de 2001
- Sistema especial de controle – Continente via satélite
- Instrumentação completa

---

**Médio – Longo Prazo**

# Otimização de turbinas eólicas tendo em vista as condições de vento no Brasil

# Otimização de um rotor

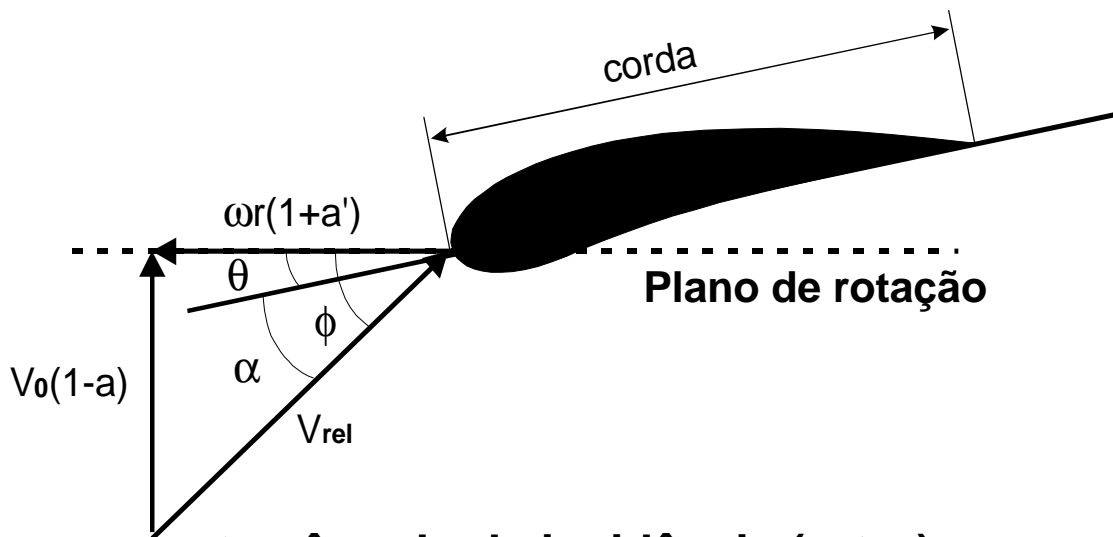
- **Ponto de Vista Econômico** - Projeto que produz o maior lucro em uma vida útil típica de 20 anos.

**Ponto de Vista Energético (Técnico??)** - Projeto que, para um dado diâmetro de rotor, produz o máximo de energia por ano. Nem sempre as modificações técnicas ótimas são viáveis economicamente. (Ex: Cargas, fadiga,



# Características aerodinâmicas

## Corte transversal de uma pá



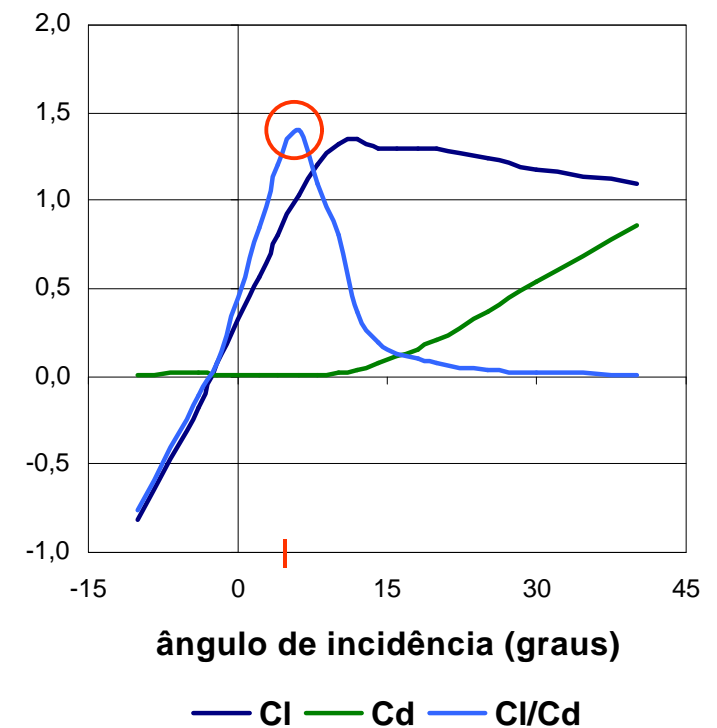
$\phi$  = ângulo de incidência (rotor)

$\alpha$  = ângulo de ataque (perfil)

$\theta$  = ângulo de passo

(local pitch/ global pitch)

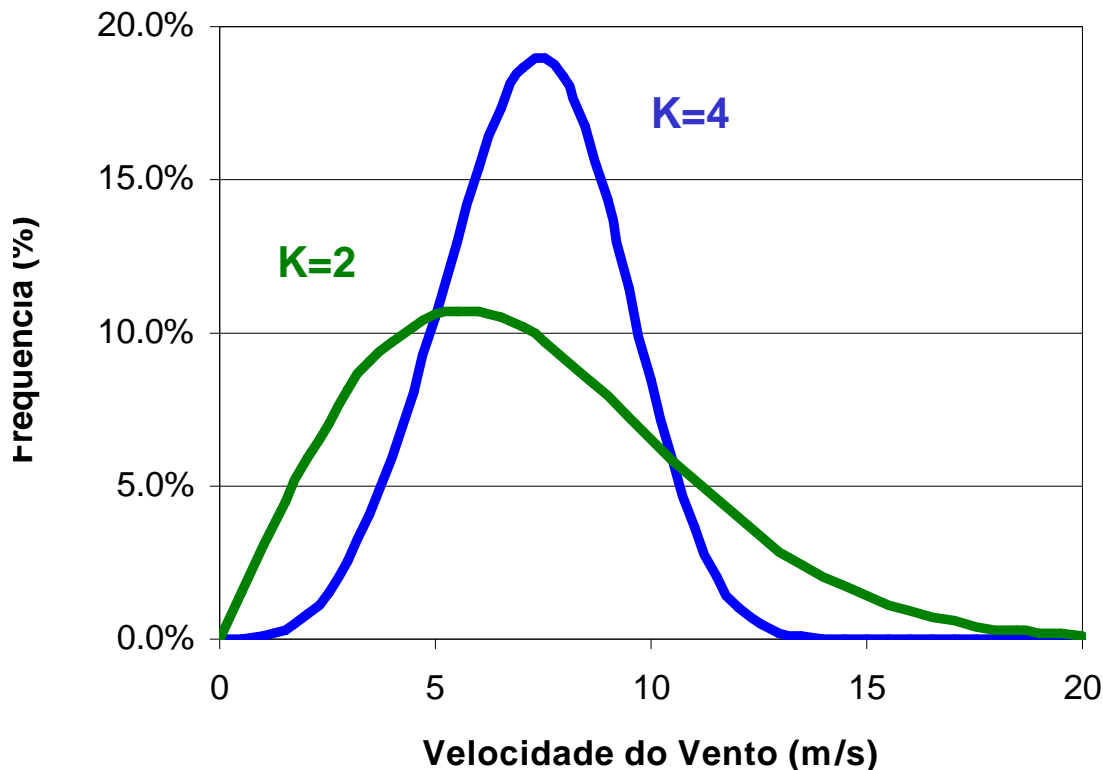
## Perfil LM22



$a$  (ótimo) = Máximo  $C_L / C_D$

# Ventos Diferentes

## Distribuição estatística dos Ventos



### Curva 1 (Brasil):

- Ventos com velocidade e direção bem definidos (Alta concentração em torno da velocidade predominante)
- Densidade do ar mais baixa.  
( $\rho = 1,17 \text{ kg/m}^3$  – Nordeste)

### Curva 2 (Europa):

- Ventos com grandes variações de velocidade e direção
- Densidade do ar mais alta.  
( $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$  – Dinamarca)

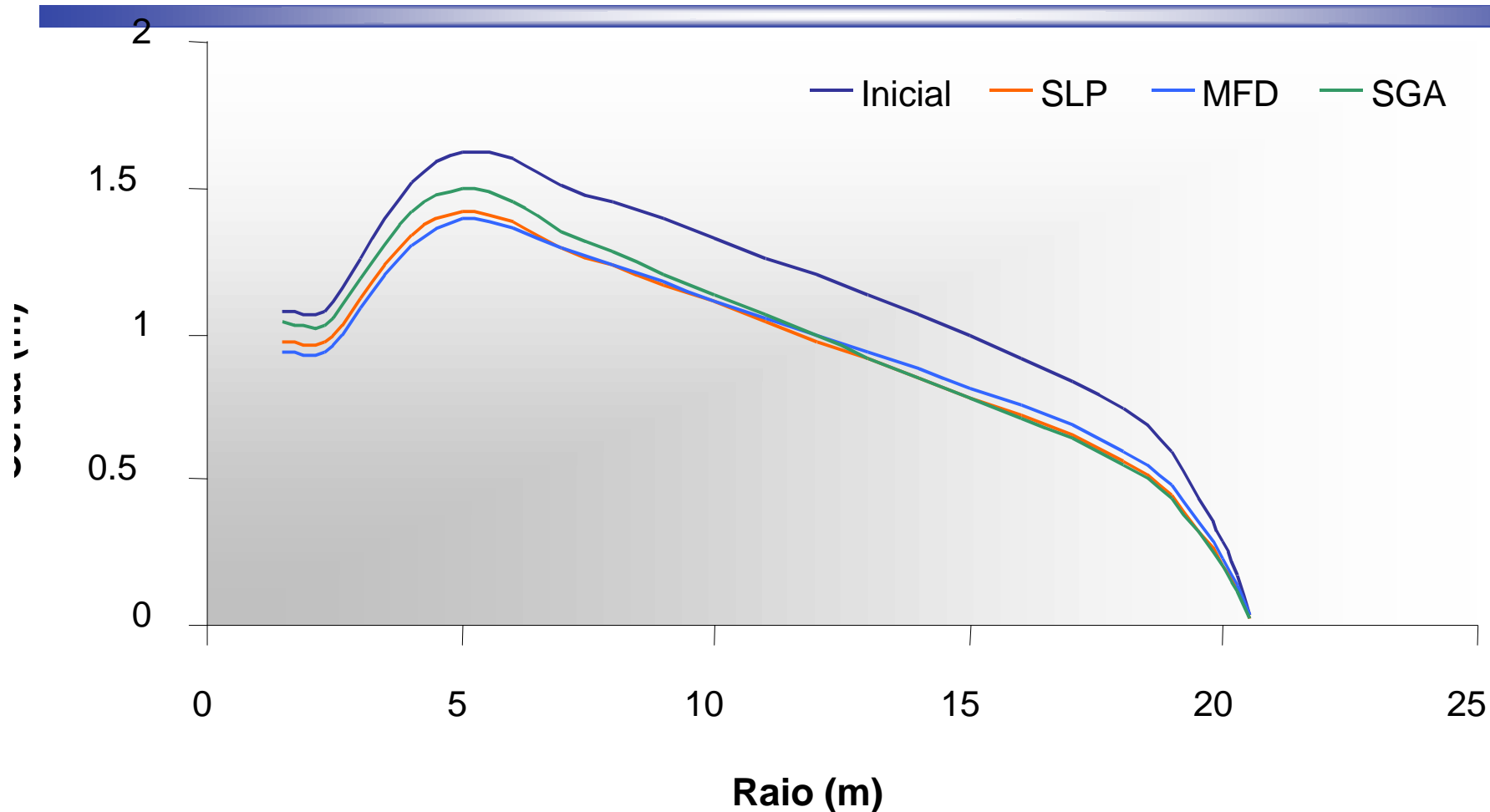
# Exemplo de Otimização



**Turbina Eólica Nordtank 500/41 instalada na Dinamarca.**

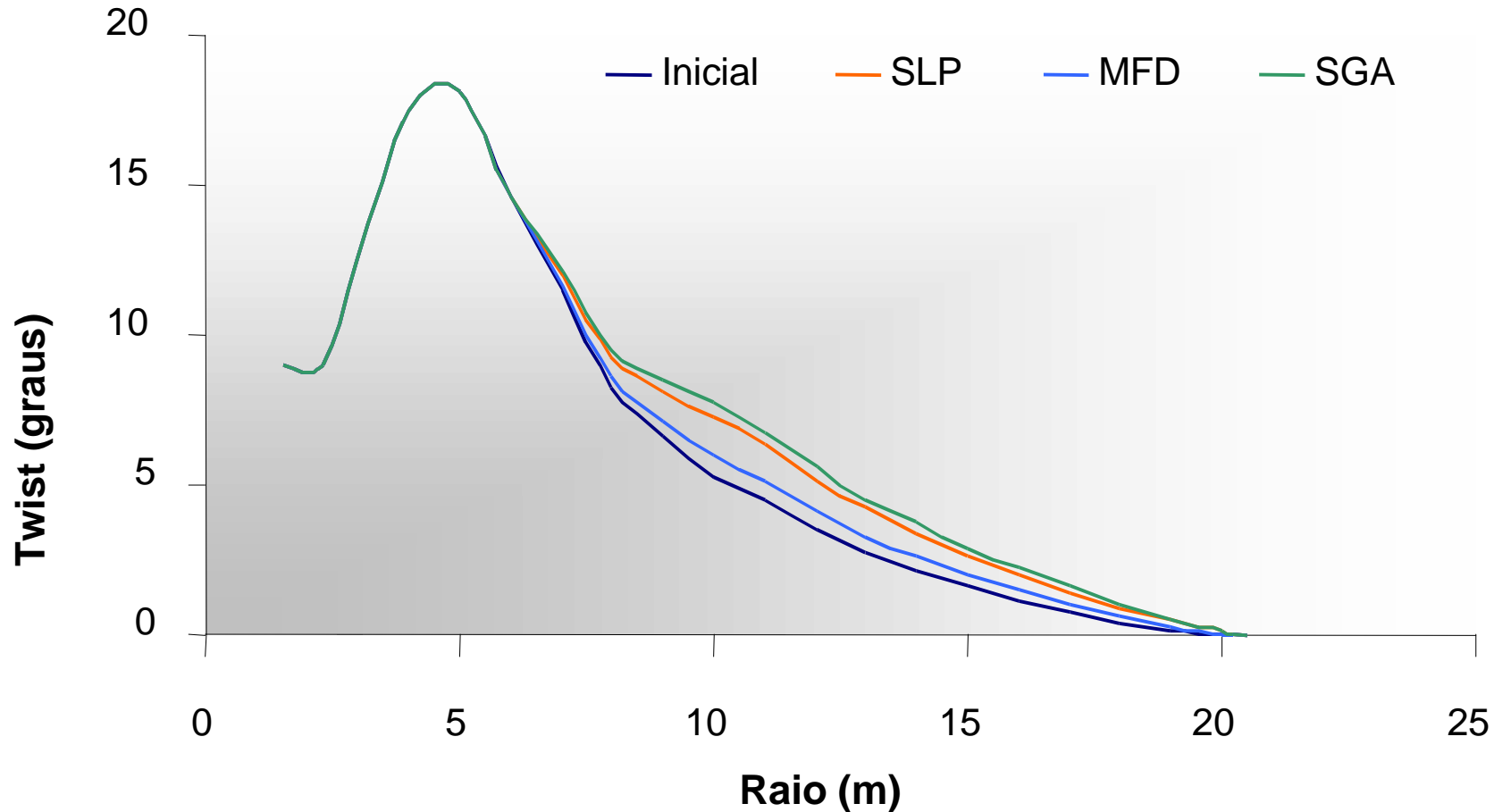
**Otimizada para as condições de um site brasileiro.**

# Distribuição da corda



**Comparação entre a distribuição da corda inicial e otimizada para a turbina eólica**

# Distribuição do ângulo de passo - *Twist*



**Comparação entre a distribuição do ângulo de passo “*twist*” e otimizada para a turbina eólica**

# Resultados

## Turbina Original (Instalada no Brasil)

## Turbina Otimizada (Instalada no Brasil)

		Pitch otimizado	Aumento na Produção Anual de Energia (%)
SLP	-3.7	-2.44	9.88%
MFD	-3.7	-2.09	9.51%
SGA	-3.7	-2.58	9.99%

# Resultado Financeiro



Otimização do Rotor para as condições específicas do local



Aumento de  $\pm 10\%$  na Produção de Energia

## Central Eólica 100 MW

Geração Anual:	300.000 MWh / ano
Preço estimado:	US\$ 60 / MWh
Receita Anual:	US\$ 18 Milhões / ano
Vida Útil da Central:	20 anos
Montante Adicionado:	10% x 20 anos x US\$18
Milhões	

---

**RESULTADO:** US\$ 36 Milhões

# Centrais Eólicas Off-shore



- European Wind Energy Association
- 150.000 MW em 2020 incluindo

Otimização para turbinas  
(condições especiais)

# Importante



- 1 - Brasil – Potencial de energia eólica superior a 70.000 MW

	Investimentos
Indústria Metal Mecânica	10 %
Indústria Eletro-Eletrônica	50 %
Infra-estrutura Civil	20 %
Rotor	20 %

- 4 - Dilema do uso da água/Nordeste  
Complementariedade entre os regimes hídricos e  
Reservatórios – baterias hipotéticas

# Importante

## **5 - Decisão política em favor de Eólica PROEÓLICA – 1 050 MW**

**Contratos de compra de eletricidade – PPA (15 anos)**

Curto prazo de implantação

Ex: Projeto de 100 MW - 9 a 12 meses

Mais rápido que térmica - Emergencial?

**Penetração Eólica na rede existente - desmistificação!**

**Nordeste: +- 3000 MW!!!**

Novas estratégias de definição / prioridade de linhas de

Transmissão dinâmica – vários usuários, produtores,  
armazenamento, controle inteligente

Transmissão estática – centrais de grande porte para

[www.eolica.com.br](http://www.eolica.com.br)  
e-mail: [eolica@eolica.com.br](mailto:eolica@eolica.com.br)