

# LEPTEN

Laboratórios de Engenharia de Processos  
de Conversão e Tecnologia de Energia



# Energia Eólica: Panorama Nacional e Novas Tecnologias



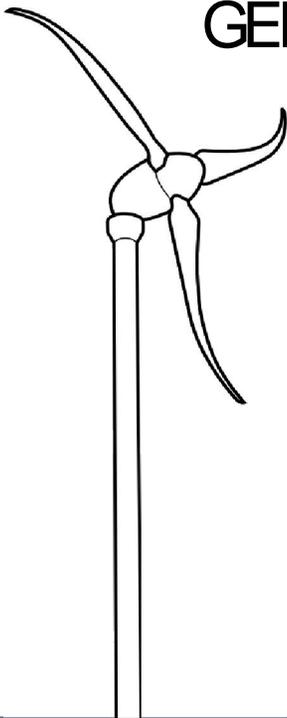
# LEPTEN

Laboratórios de Engenharia de Processos  
de Conversão e Tecnologia de Energia

# Projeto P&D Eólica UFSC

Projeto P&D ANEEL 0403-0020/2011

DESENVOLVIMENTO DE TECNOLOGIAS DE PREVISÃO DE  
GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA PARA PARQUES EÓLICOS  
EM OPERAÇÃO



# Energia Eólica: Panorama Nacional e Novas Tecnologias

1. (18:00 – 18:10) Abertura – Júlio Passos
2. (18:10 – 18:50) Panorama da Energia Elétrica no Brasil e no Mundo – Frederico Taves
3. (18:50 – 19:20) Panorama da Energia Eólica no Brasil e no Mundo – Leonardo Damas
4. (19:20 – 19:35) Micro e Mini-Geração Eólica – Pedro Alvim

(19:35 – 19:40) Perguntas e Respostas

------(19:40 – 20:00) INTERVALO -----

5. (20:00 – 20:45) Desenvolvimento de Projetos Eólicos – Leonardo Damas
- (20:45 – 20:50) Perguntas e Respostas
6. (20:50 – 22:00) Previsão Eólica de Curto Prazo
    - 6.1. (20:50 – 21:20) Tecnologias Disponíveis – Reinaldo Haas
    - 6.2. (21:20 – 21:30) Projeto P&D Eólica UFSC – Pedro Alvim / Frederico Taves
    - 6.3. (21:30 – 22:00) Resultados Preliminares – Yoshiaki Sakagami

# LEPTEN

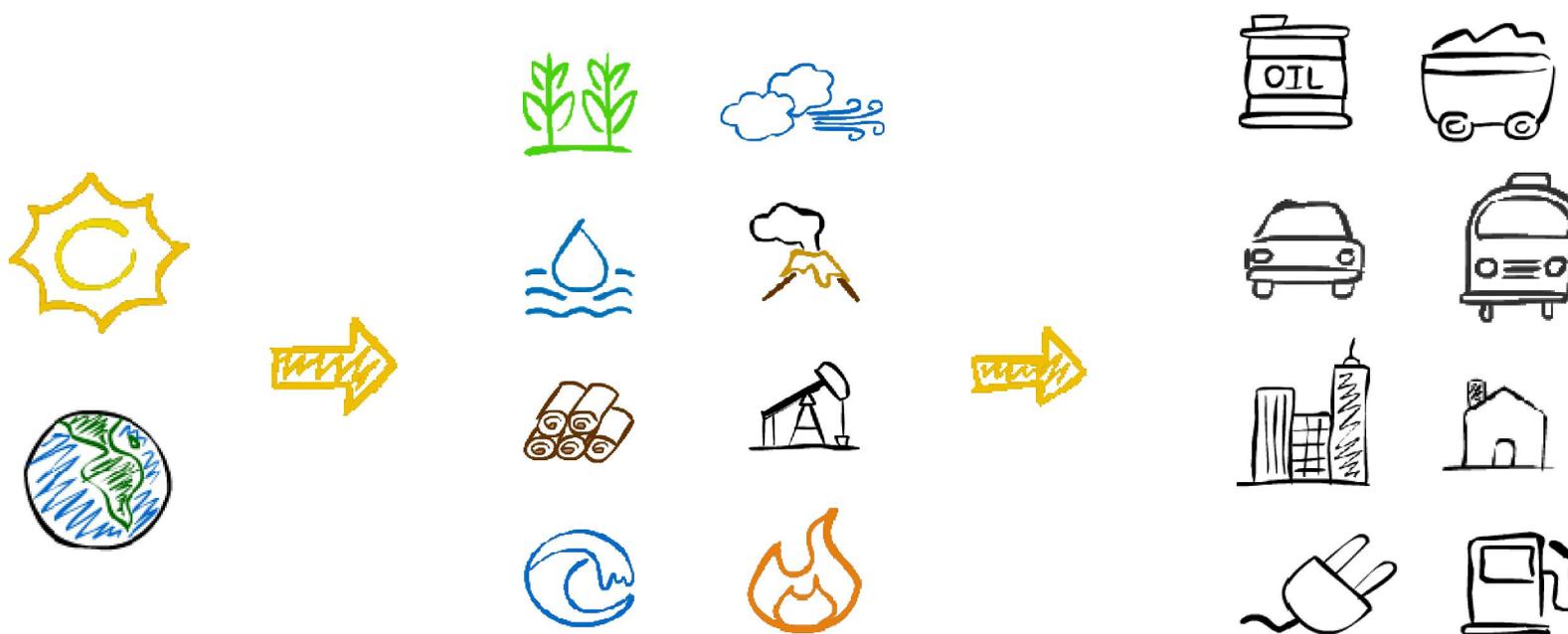
Laboratórios de Engenharia de Processos  
de Conversão e Tecnologia de Energia



# Panorama da Energia Elétrica no Brasil e no Mundo



# Fontes de Energia

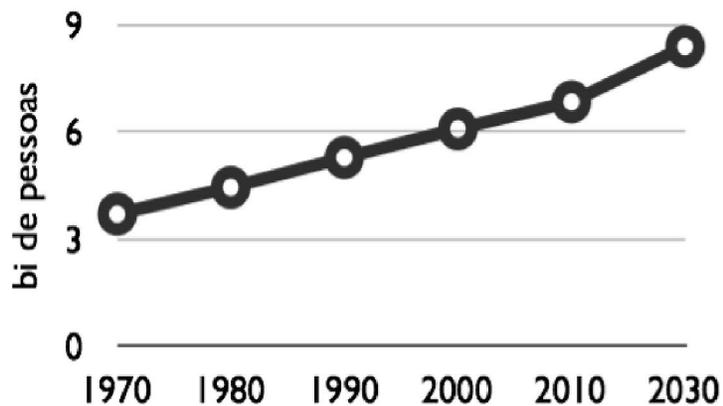


# População x PIB

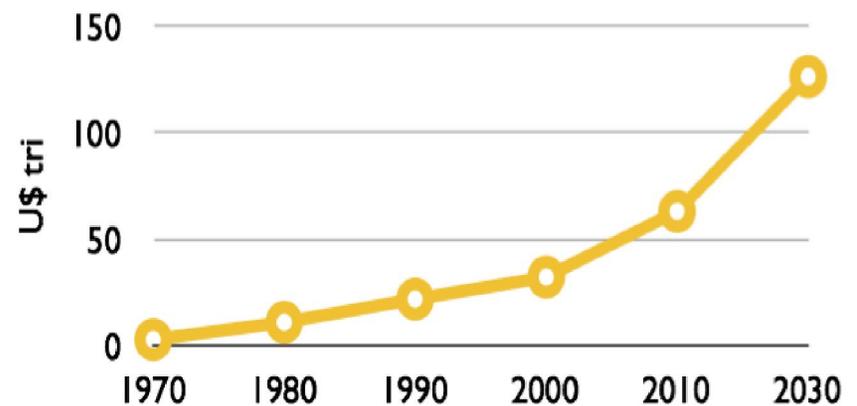
Nos últimos 20 anos, a população mundial aumentou em 1,6 bi, enquanto o PIB cresceu 87%.

Para os próximos 20 anos, estima-se que a população aumentará em 1,4 bi e que o PIB dobre.

## População

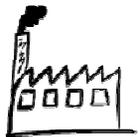


## PIB mundial



# Tendências

A longo prazo, a economia continuará crescendo, aumentando a necessidade de investimentos em



Industrialização



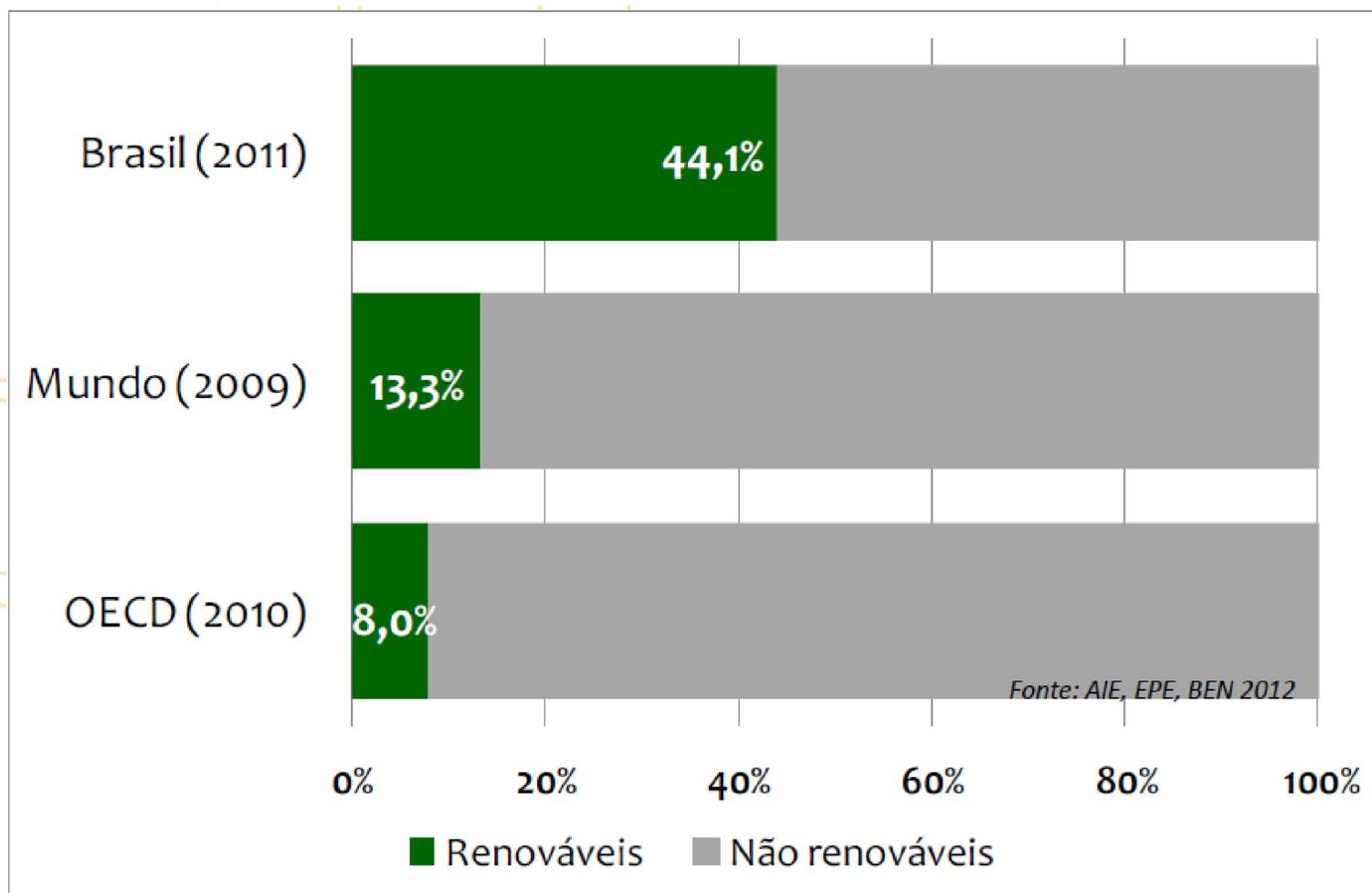
Transporte



Urbanização

- Tendência de aumentar
  - O **consumo** de energia per capita mundial
  - A demanda **próxima** do ponto de consumo
  - A **eficiência** no uso de energia (produção e consumo)
  - A **diversificação** de recursos de energia
  - A exigência por energia **limpa**

# Participação das Renováveis – Mundo



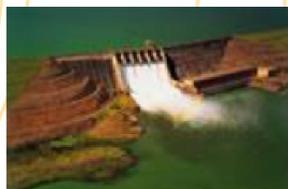
# Participação das Renováveis – Brasil

**RENOVÁVEIS ▶ 44,1%**

biomassa da  
cana  
15,7%



hidráulica  
14,7%



lenha e  
carvão vegetal  
9,7%



lixívia e outras  
renováveis  
4,1%



**NÃO RENOVÁVEIS ▶ 55,9%**

petróleo e  
derivados  
38,6%



gás  
natural  
10,1%



carvão  
mineral  
5,6%

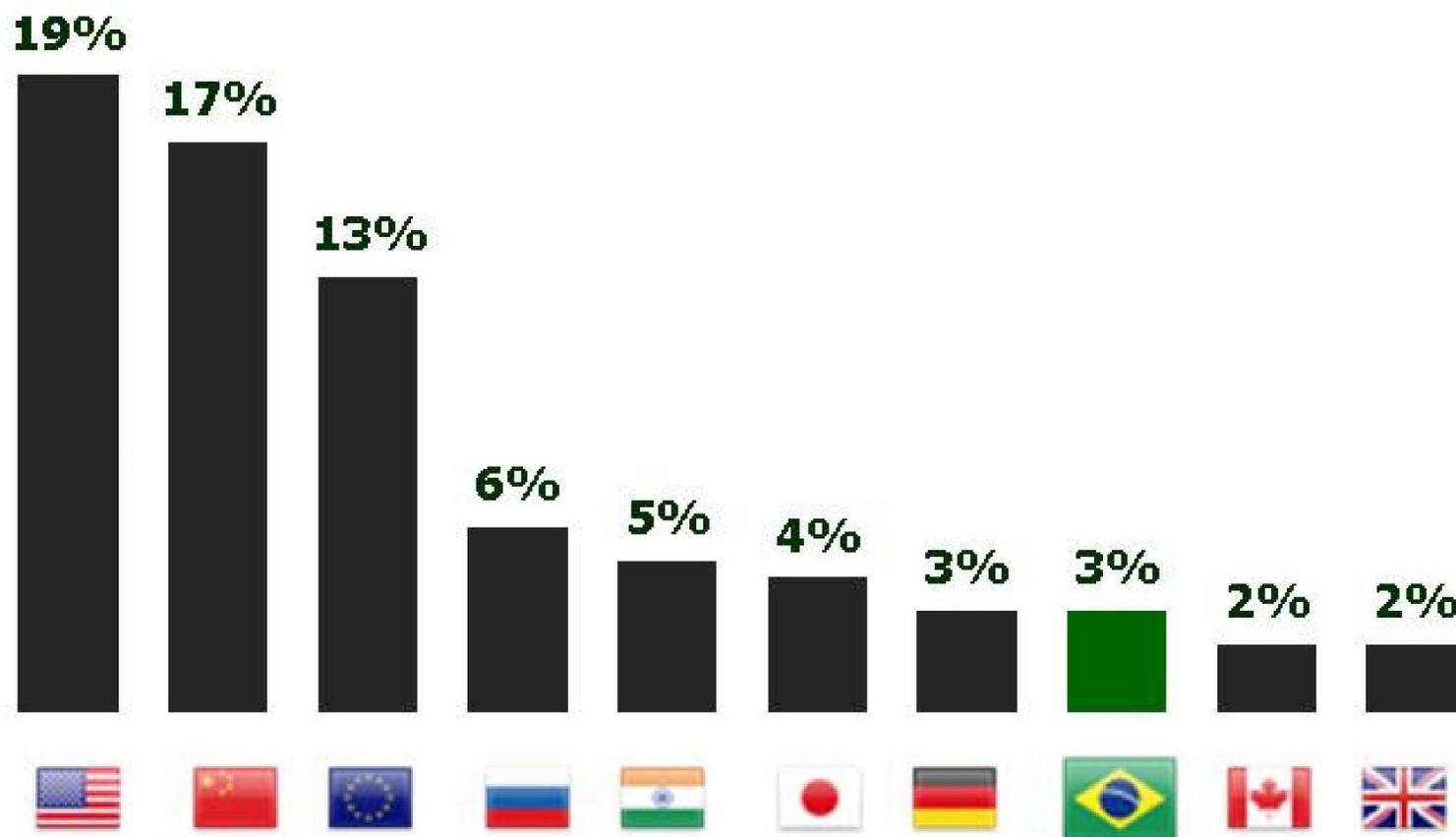


urânio  
1,5%

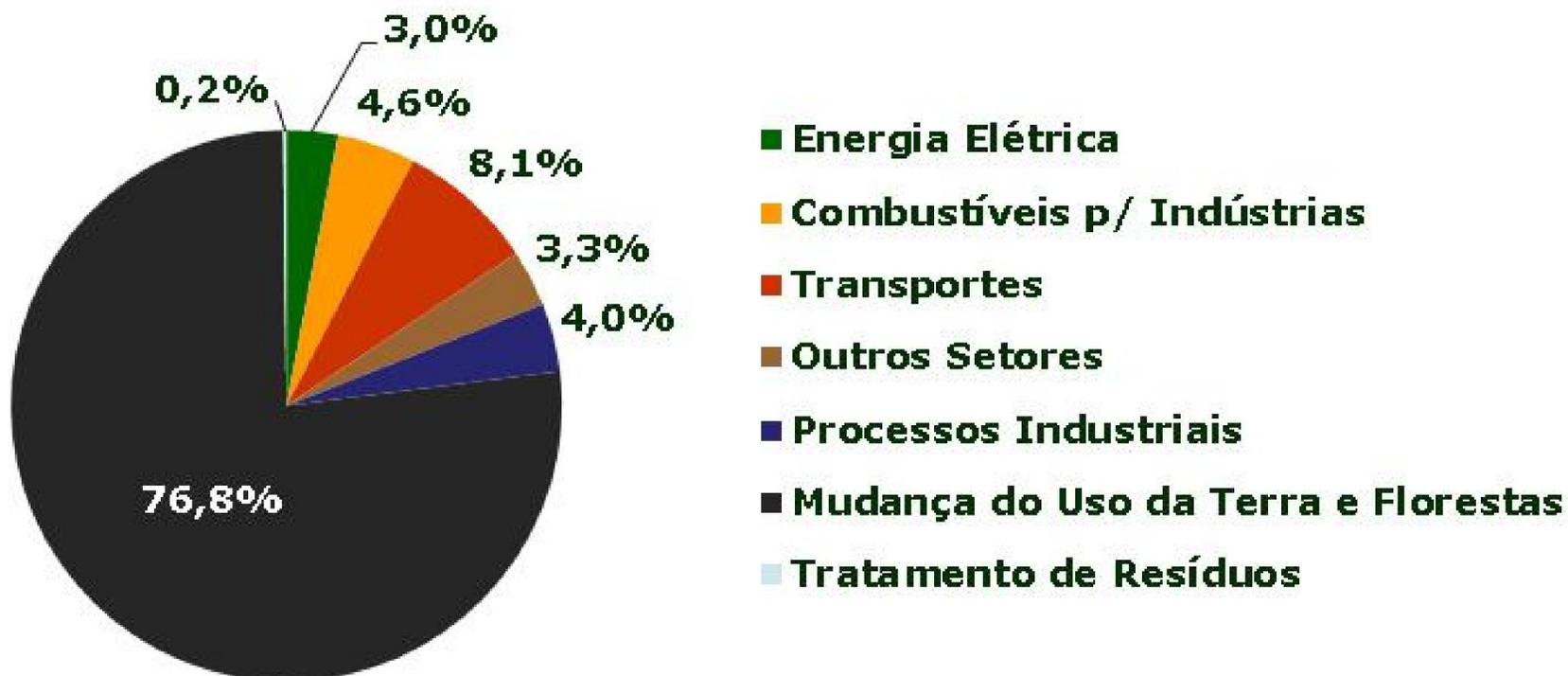


*Fonte: EPE, BEN 2012*

# Emissões de CO<sub>2</sub> Antropogênico

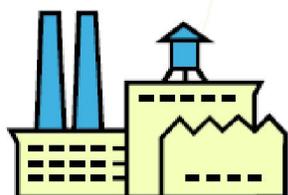


# Emissões de CO<sub>2</sub> no Brasil



# Uso da energia no Brasil

**indústrias**  
35,9%



**transportes**  
30,1%



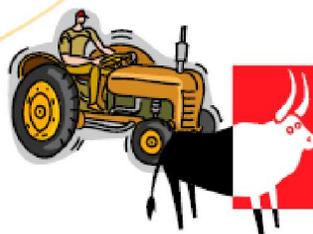
**residências**  
9,5%



**setor energético**  
8,9%



**agropecuária**  
4,0%



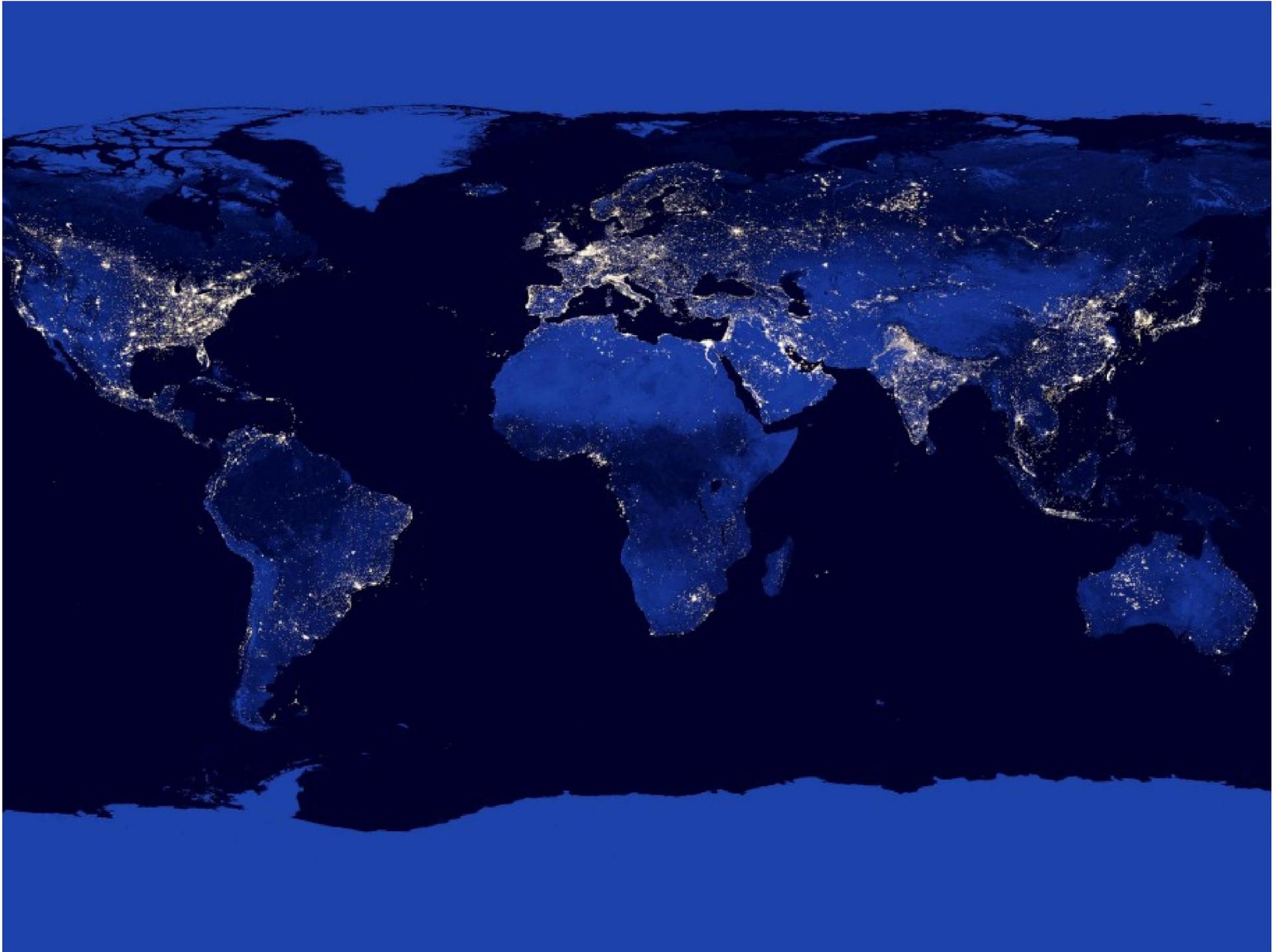
**serviços**  
4,4%



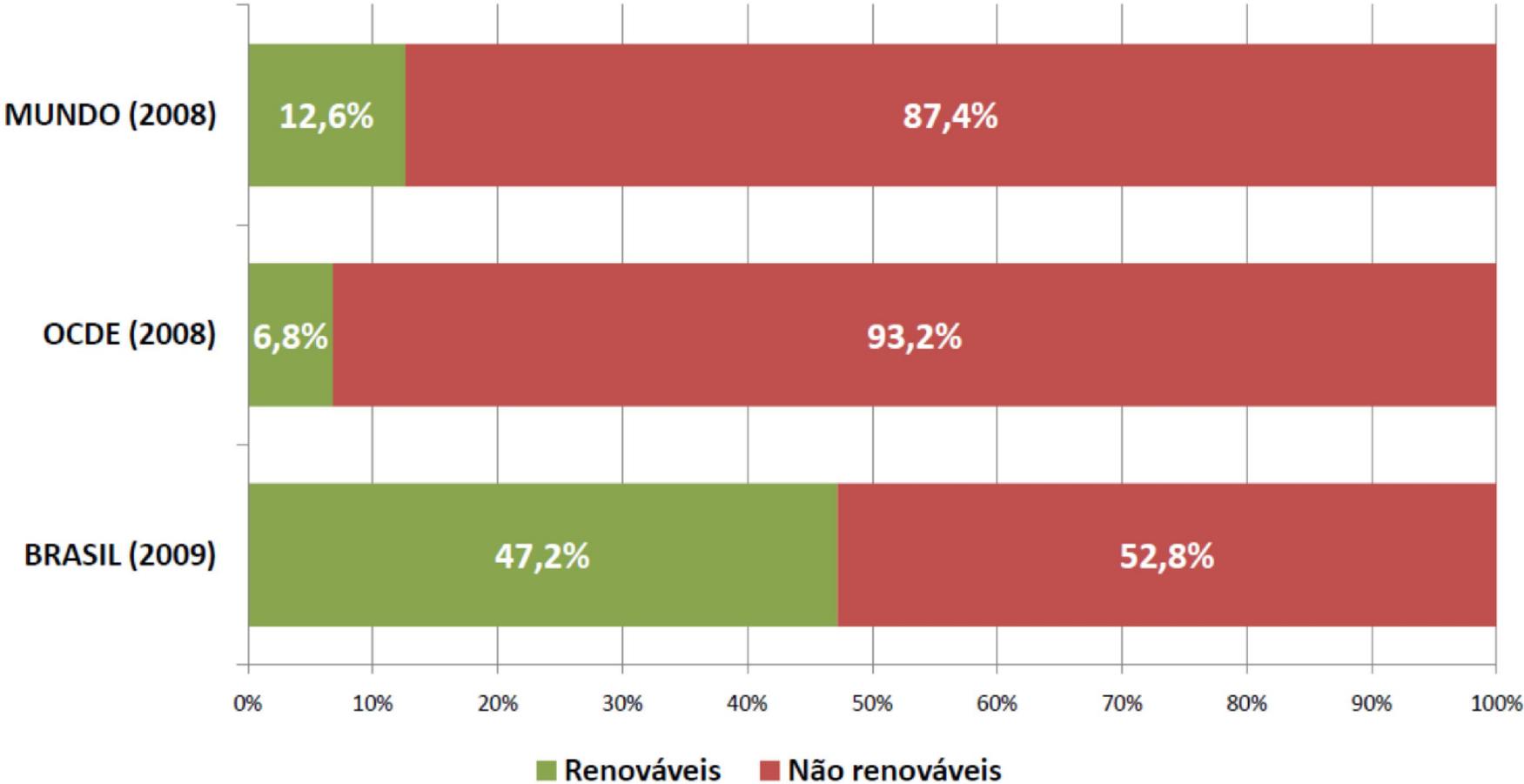
Produção industrial, transporte de carga e mobilidade das pessoas e famílias respondem por 66% do consumo de energia do país

*Dados referentes a 2011  
Fonte: EPE, BEN 2012*

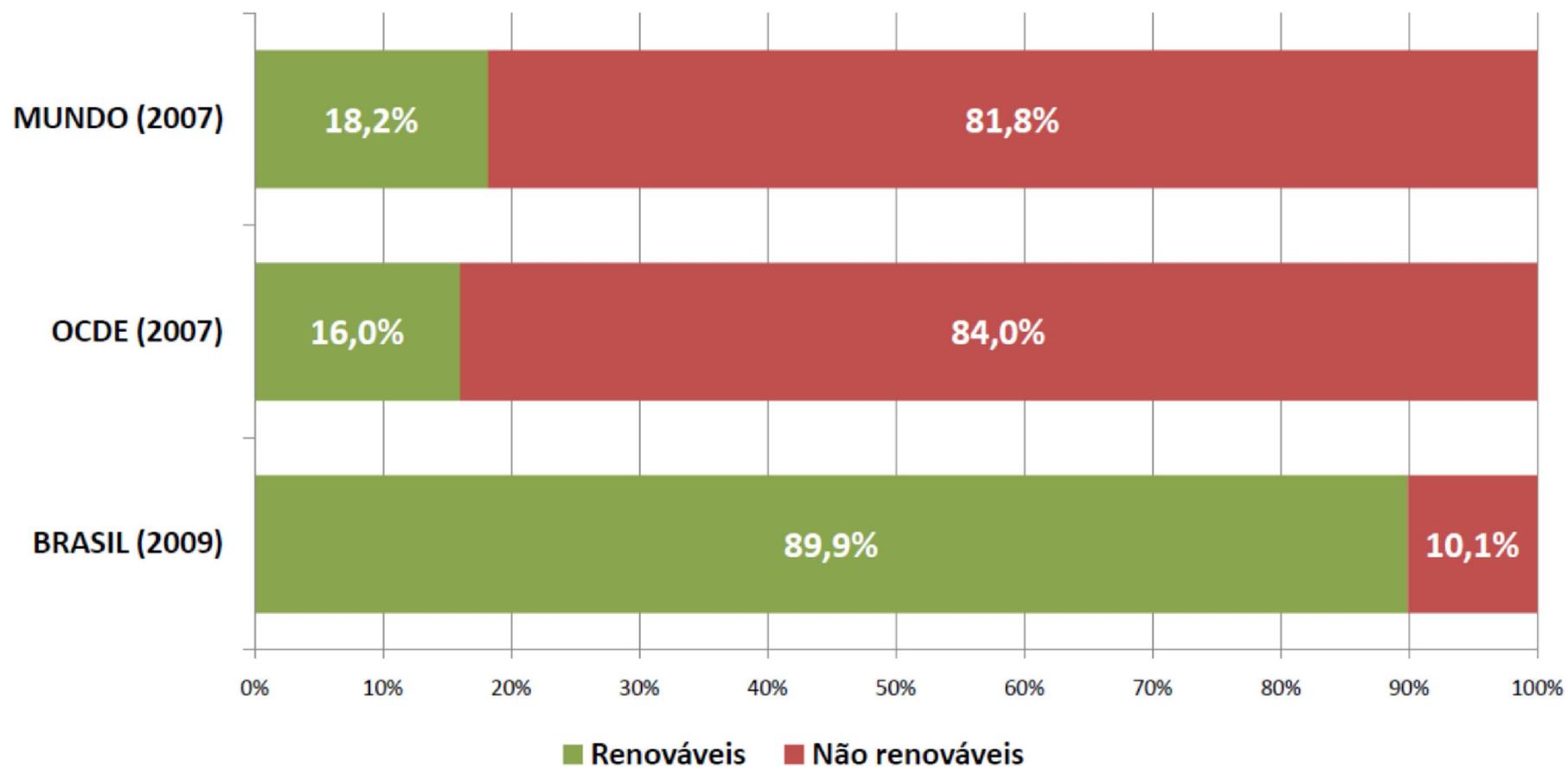
# Energia Eléctrica



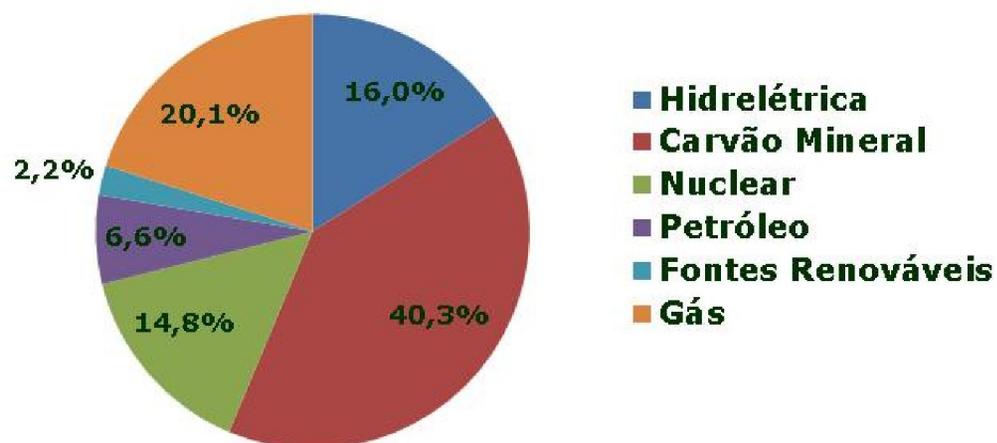
# Fontes Renováveis na Matriz Energética



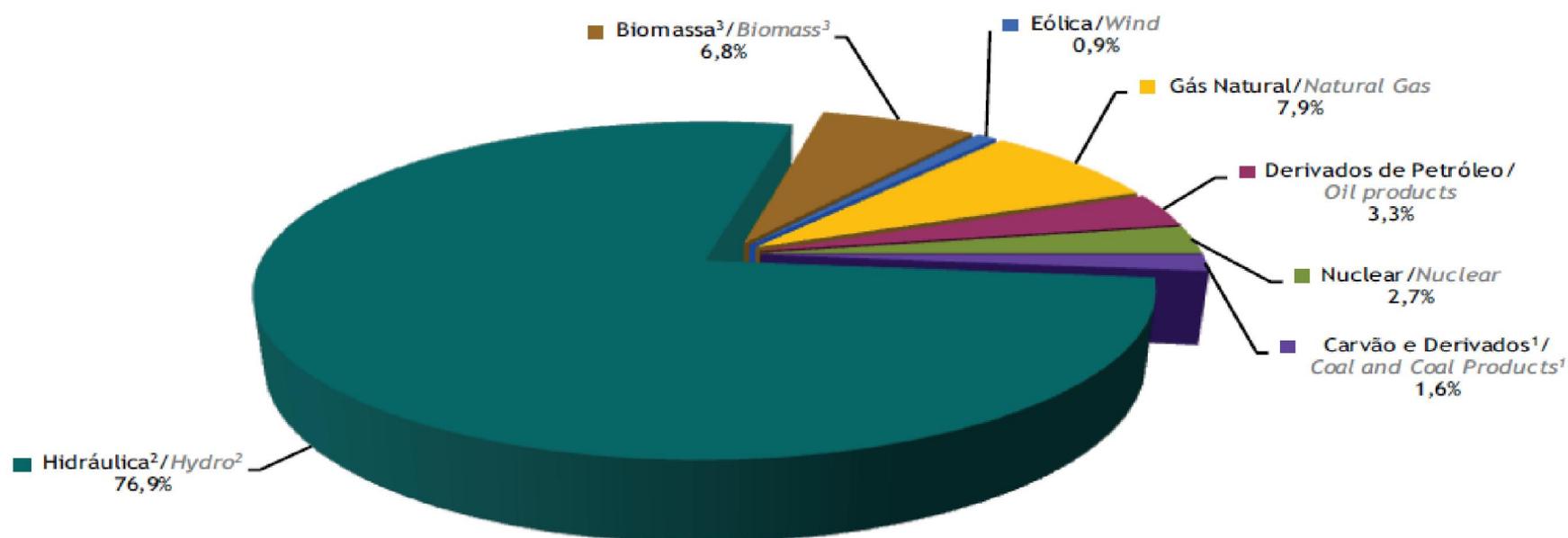
## Fontes Renováveis na Matriz de Energia Elétrica



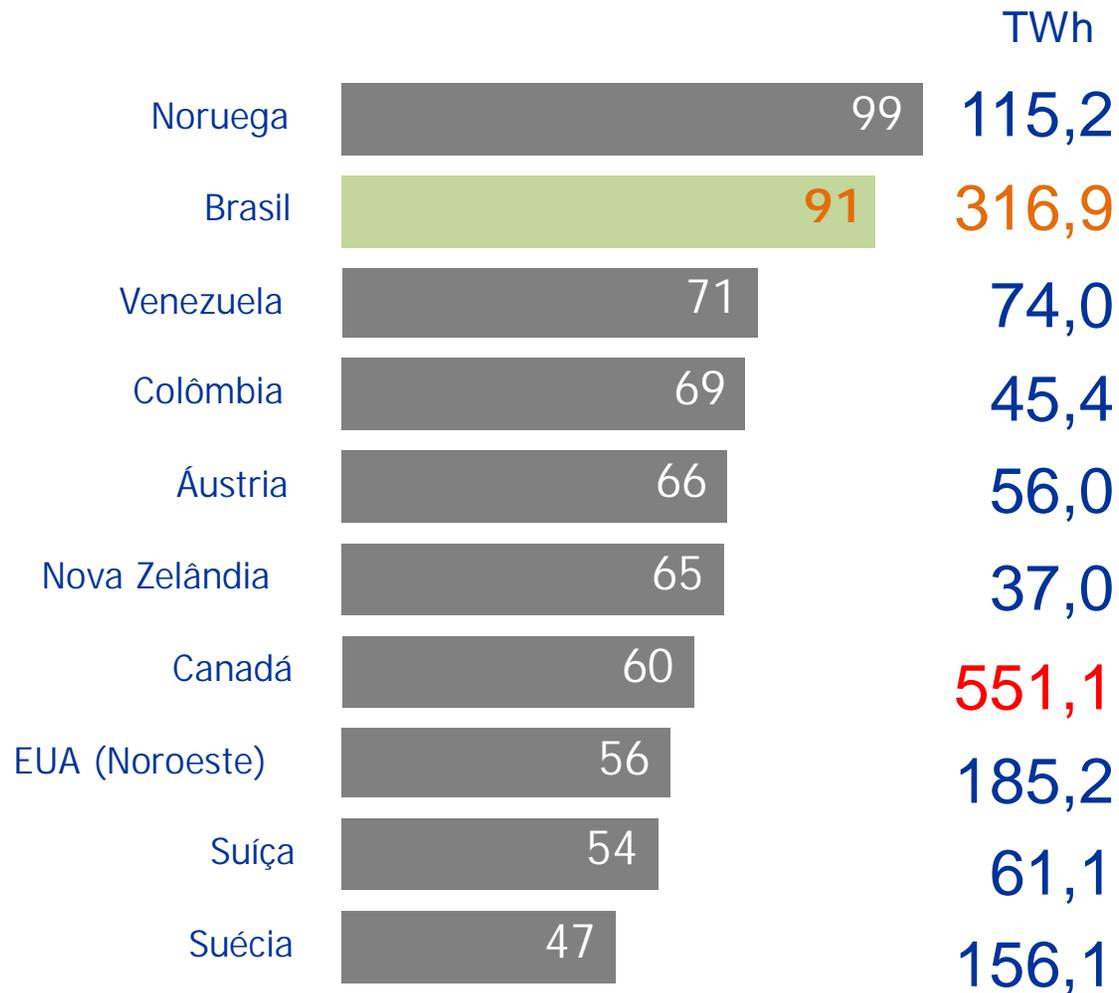
# Matriz de Energia Elétrica – Mundo



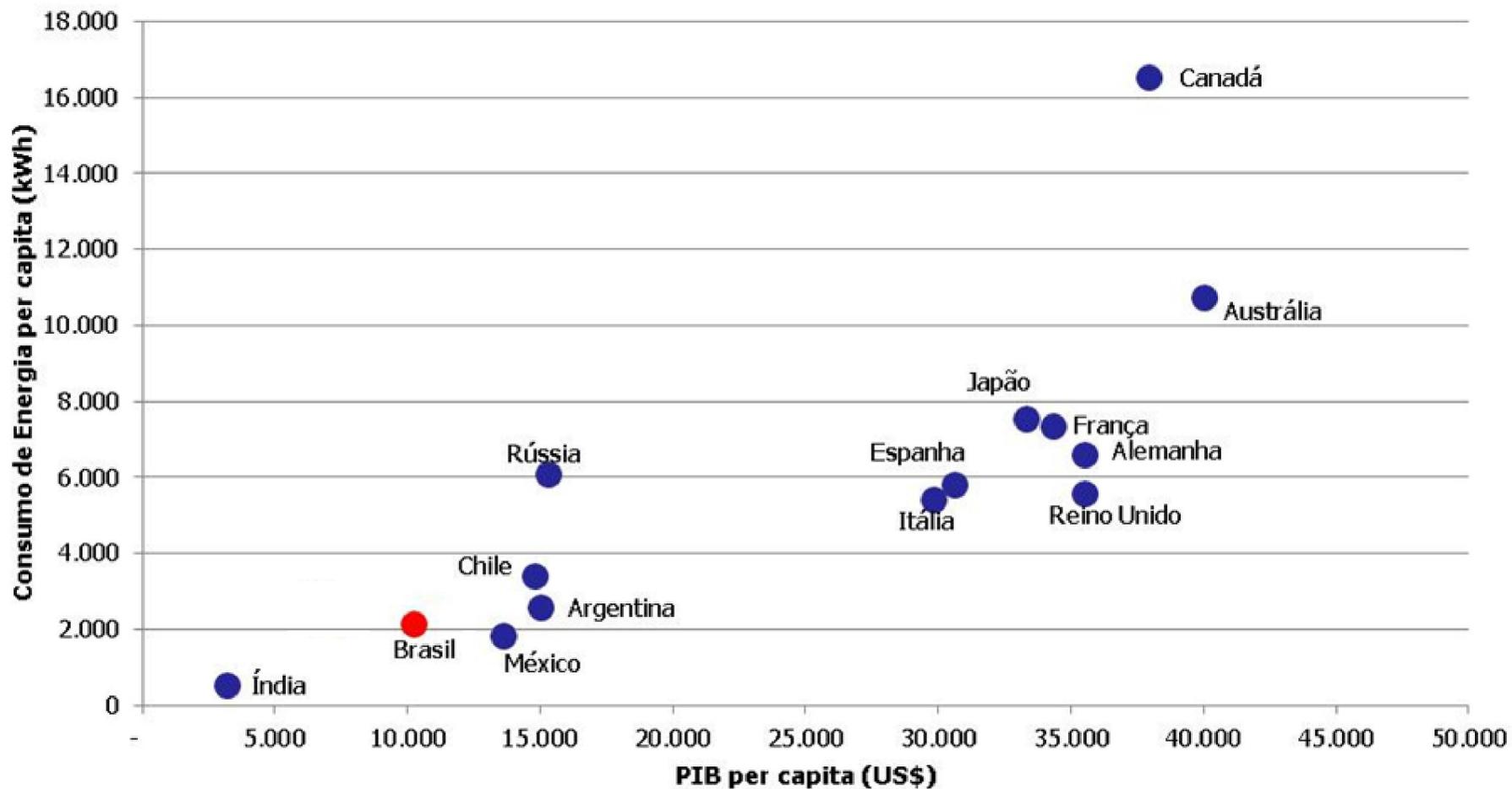
# Matriz de Energia Elétrica – Brasil



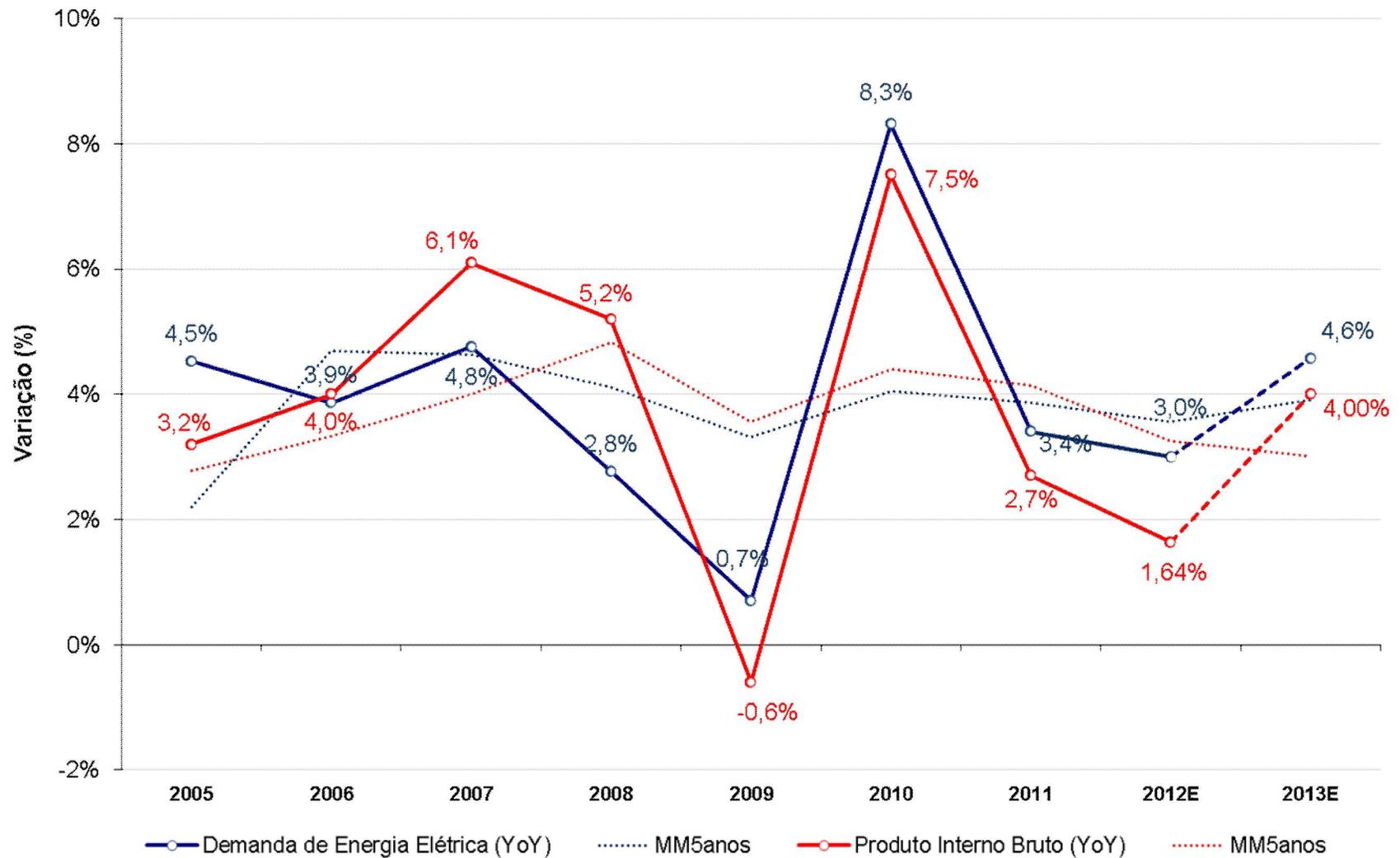
# Geração Hidrelétrica



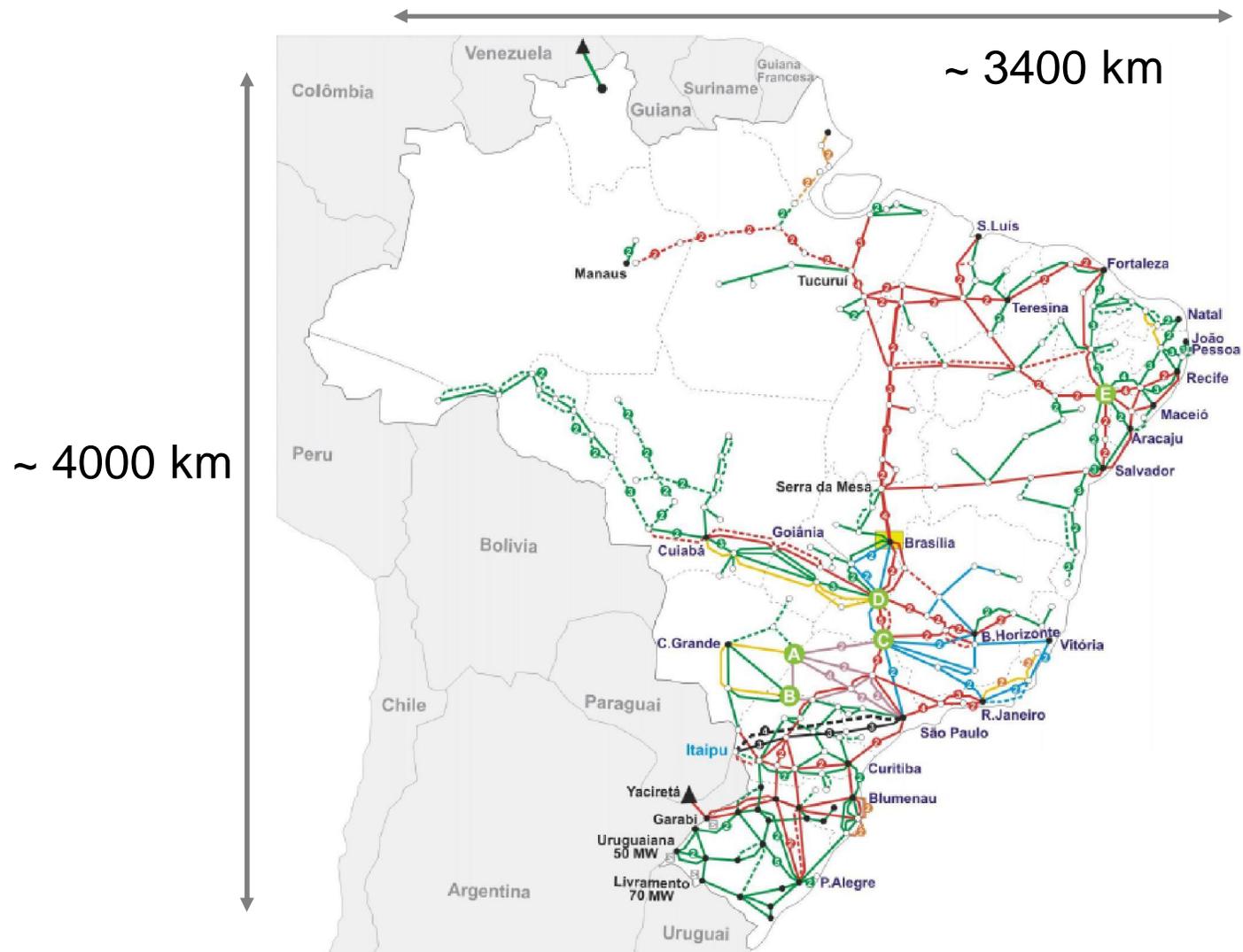
# Padrão de Consumo



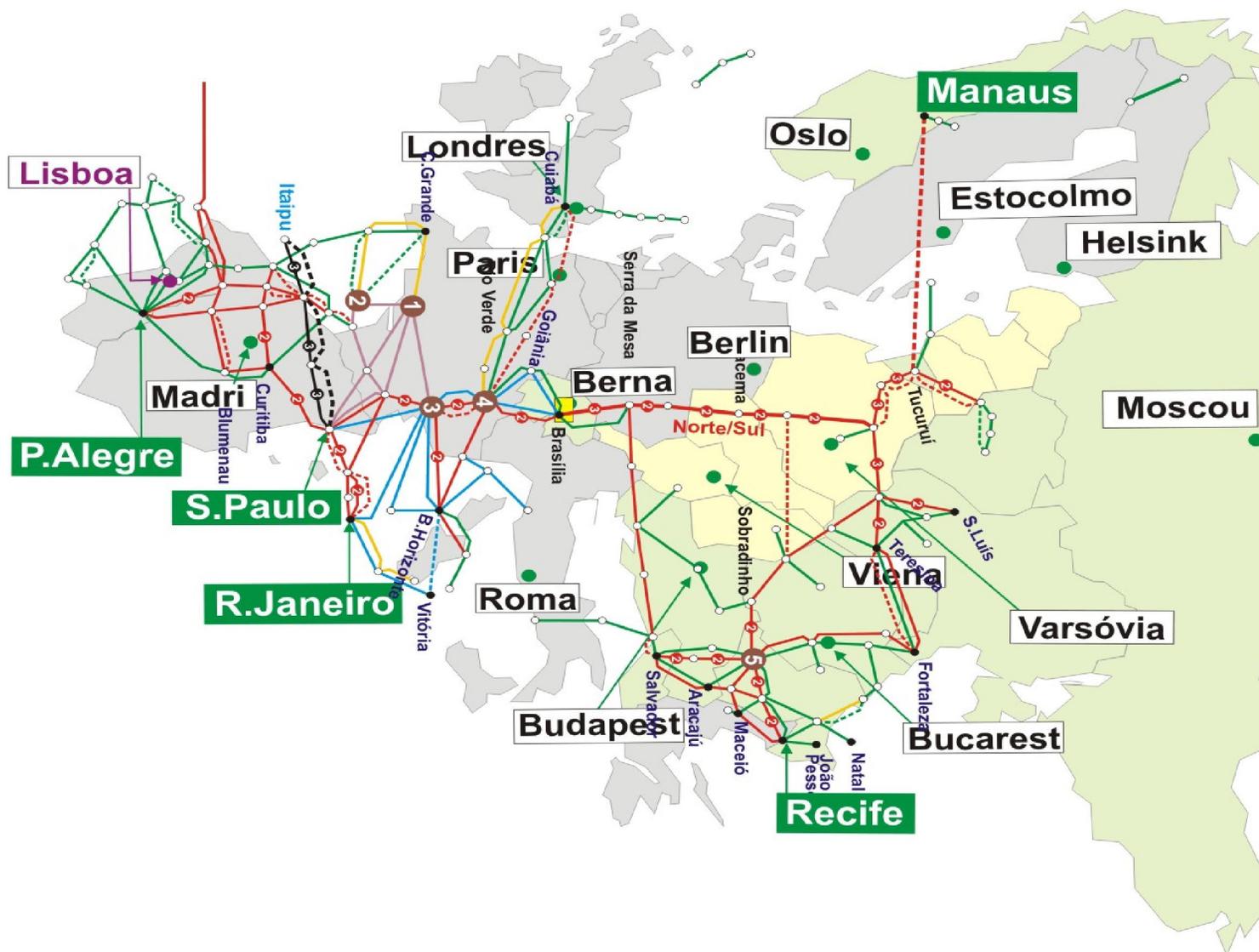
# PIB x Consumo



# Sistema Interligado Nacional



# SIN x Europa



# Expansão da Oferta

	2010		2015		Crescimento 2010-2015	
Hidráulica	85.690	79,3%	97.968	71,0%	12.278	14%
Nuclear	2.007	1,9%	2.007	1,5%	–	0,0%
Gas/GNL	9.308	8,6%	12.257	8,9%	2.949	32%
Carvão	1.415	1,3%	3.205	2,3%	1.790	127%
Biomassa	4.577	4,2%	7.271	5,3%	2.694	59%
Óleo	4.211	3,9%	10.011	7,3%	5.800	138%
Eólica	826	0,8%	5.194	3,8%	4.368	529%
<b>Total</b>	<b>108.034</b>	<b>100%</b>	<b>137.913</b>	<b>100%</b>	<b>29.879</b>	<b>28%</b>

# Geração no SIN em 23/10/2013

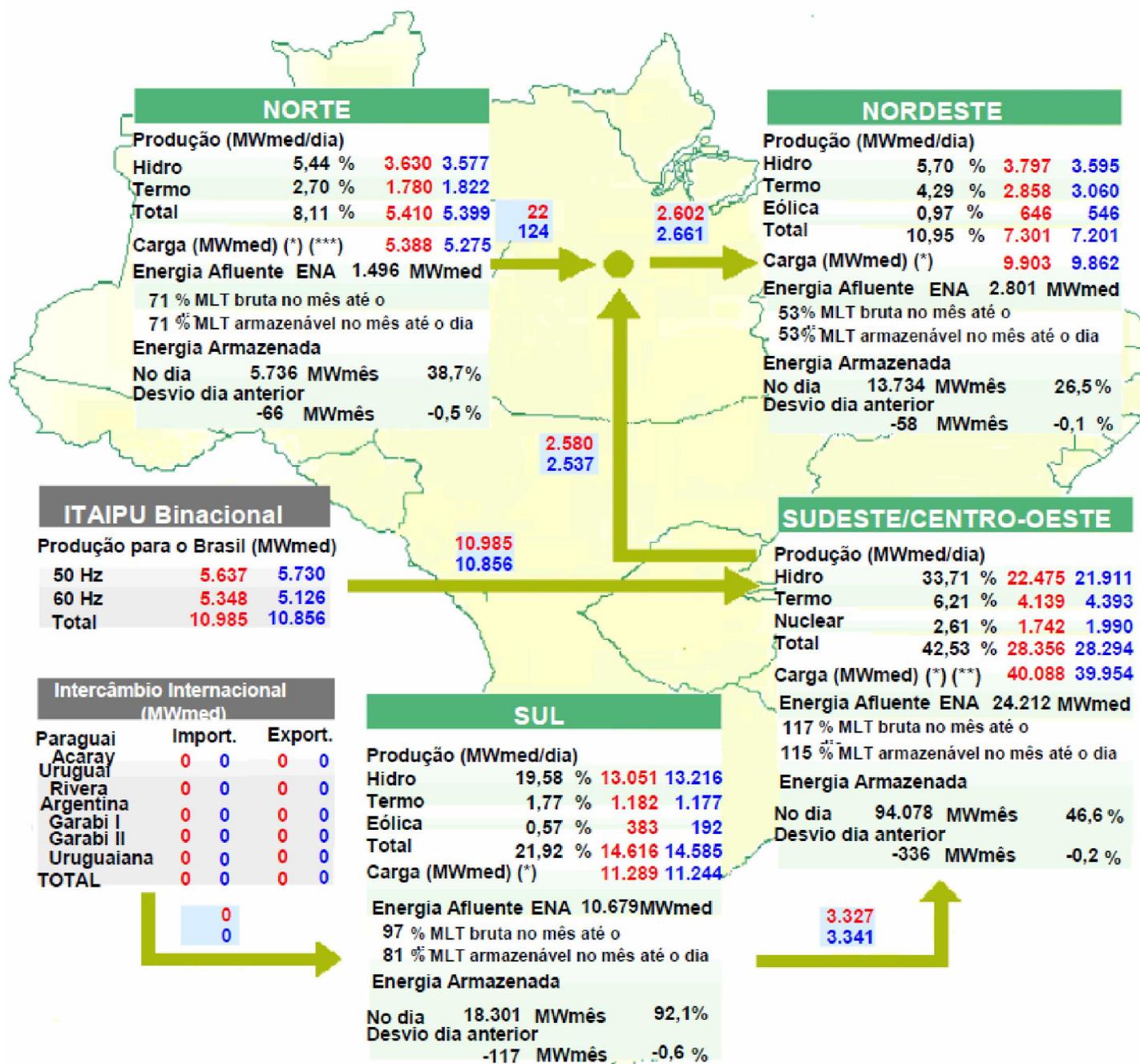
## 1 - Balanço de Energia

LEGENDA:  Verificado  
 Programado

SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL - SIN - MWmed			
<b>Produção</b>			
Hidro Nacional	42.299	42.953	64,43 %
Itaipu Binacional	10.856	10.985	16,48 %
Termo Nuclear	1.990	1.742	2,61 %
Termo Convencional	10.452	9.959	14,94 %
Eólica	738	1.029	1,54 %
Total SIN	66.335	66.668	100,00 %
Intercâmbio Internacional	0	0	
Carga (*)	66.335	66.668	

## 2 - Balanço de Energia Detalhado

LEGENDA: ■ Verificado ■ Programado



# LEPTEN

*Laboratórios de Engenharia de Processos  
de Conversão e Tecnologia de Energia*



**Frederico de Freitas Taves**

Tractebel Energia S.A.  
[fredericoft@tle.com.br](mailto:fredericoft@tle.com.br)

# LEPTEN

*Laboratórios de Engenharia de Processos  
de Conversão e Tecnologia de Energia*



## 3. PANORAMA DA ENERGIA EÓLICA NO BRASIL E NO MUNDO

Local: Florianópolis, SC

Data: Outubro de 2013

Por: Leonardo Balvedi Damas

# ENERGIA EÓLICA: BENEFÍCIOS

O que é: energia eólica, aerogerador e parque eólico?

Energia Eólica:  
Energia Cinética do Vento

Aerogerador

Energia Elétrica



Offshore

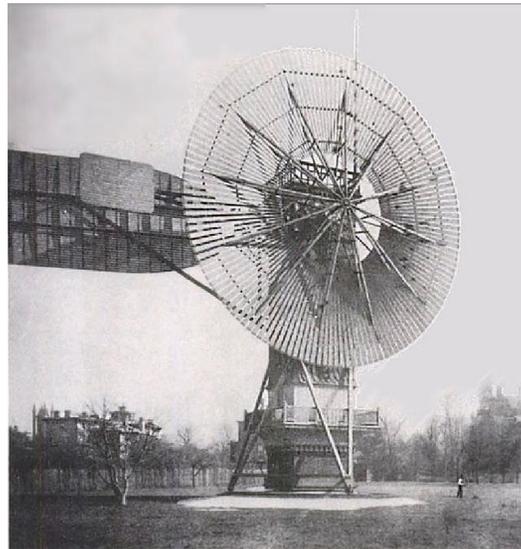


Onshore

# ENERGIA EÓLICA: MOTIVAÇÃO

## Energia Eólica:

- custos de implantação
- Sem custo de combustível
- tarifa de energia
- viabilidade econômica
- geração de empregos
- impacto ambiental
- Não produz GEE
- Diversificação das fontes de energia



## Indicadores no Brasil e no mundo:

- crescimento da capacidade instalada e na participação da geração elétrica



# LEPTEN

*Laboratórios de Engenharia de Processos  
de Conversão e Tecnologia de Energia*

# ENERGIA EÓLICA: BENEFÍCIOS



# LEPTEN

Laboratórios de Engenharia de Processos  
de Conversão e Tecnologia de Energia

# ENERGIA EÓLICA: BENEFÍCIOS



# LEPTEN

Laboratórios de Engenharia de Processos  
de Conversão e Tecnologia de Energia

# ENERGIA EÓLICA: BENEFÍCIOS



# ENERGIA EÓLICA: NÚMEROS

## Dados Gerais:

- 200.000 – Aerogeradores instalados no mundo
- 300 GW – Potência Instalada em Parques Eólicos
- 8.000 – Número de peças de um aerogerador
- 670.000 – N° pessoas empregadas no setor em 2011

## Eletricidade Gerada:

- 1MW – Quantidade para suprir 2000 residências no Brasil (6 mil pessoas)
- 2,5% – Mundo (2012)
- 26% – Dinamarca (2012)
- 12% – Estimativa para o mundo em 2020 (GWEC 2013)

## Eólica no Brasil (situação no final de 2012):

- 115 – Usinas instaladas no Brasil
- 2.693 – Capacidade instalada (MW)
- 2.315.833 – Redução de CO2 (Toneladas por ano)



## Dados Gerais

- Potência: 1 a 3 MW
- Velocidades:
  - Rotações por minuto: 6 a 20
  - Velocidade de operação: de 10 a 90 km/h (3 a 25 m/s)
  - Dimensionado para suportar tempestades e rajadas de ventos de até 200 km/h
- Material:
  - Torre: aço ou concreto
  - Pás: Fibra de vidro com resina epóxi
- Peso:
  - Torre: 100 a 300 toneladas
  - Pás: 5 a 10 toneladas
  - Nacele e cubo: 50 a 100 toneladas
  - TOTAL: 150 a 400 toneladas
- Comprimento de uma pá: 40 a 60 metros
- Altura
  - Torre: 80 a 140 metros
  - Torre + pá: 120 a 200 metros



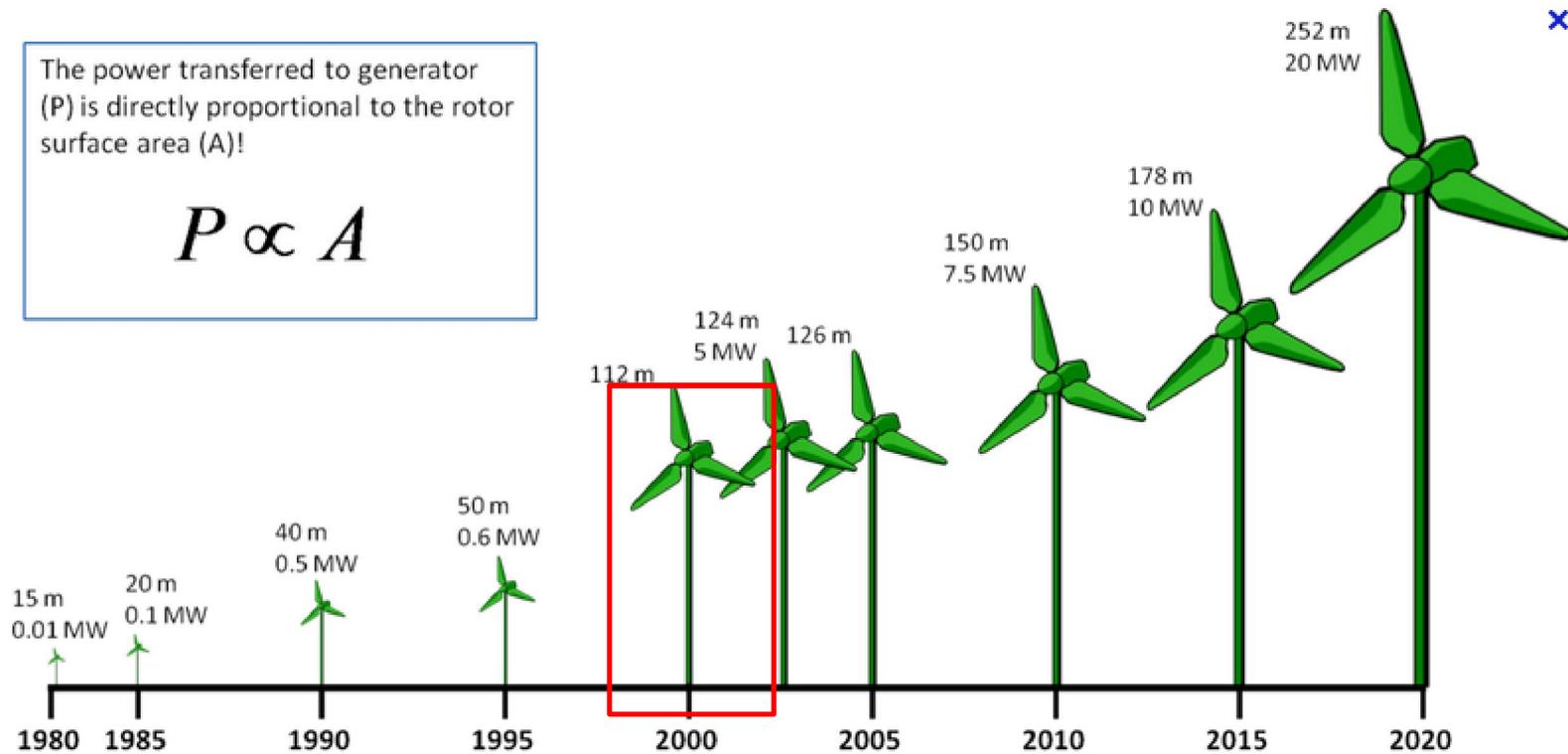
*Aerogerador Instalado em Água Doce*

## Evolução do diâmetro do rotor

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

The power transferred to generator (P) is directly proportional to the rotor surface area (A)!

$$P \propto A$$



## Capacidade Instalada

**crescimento anual:**

Eólica: 26%

Eletricidade Geral: 4%

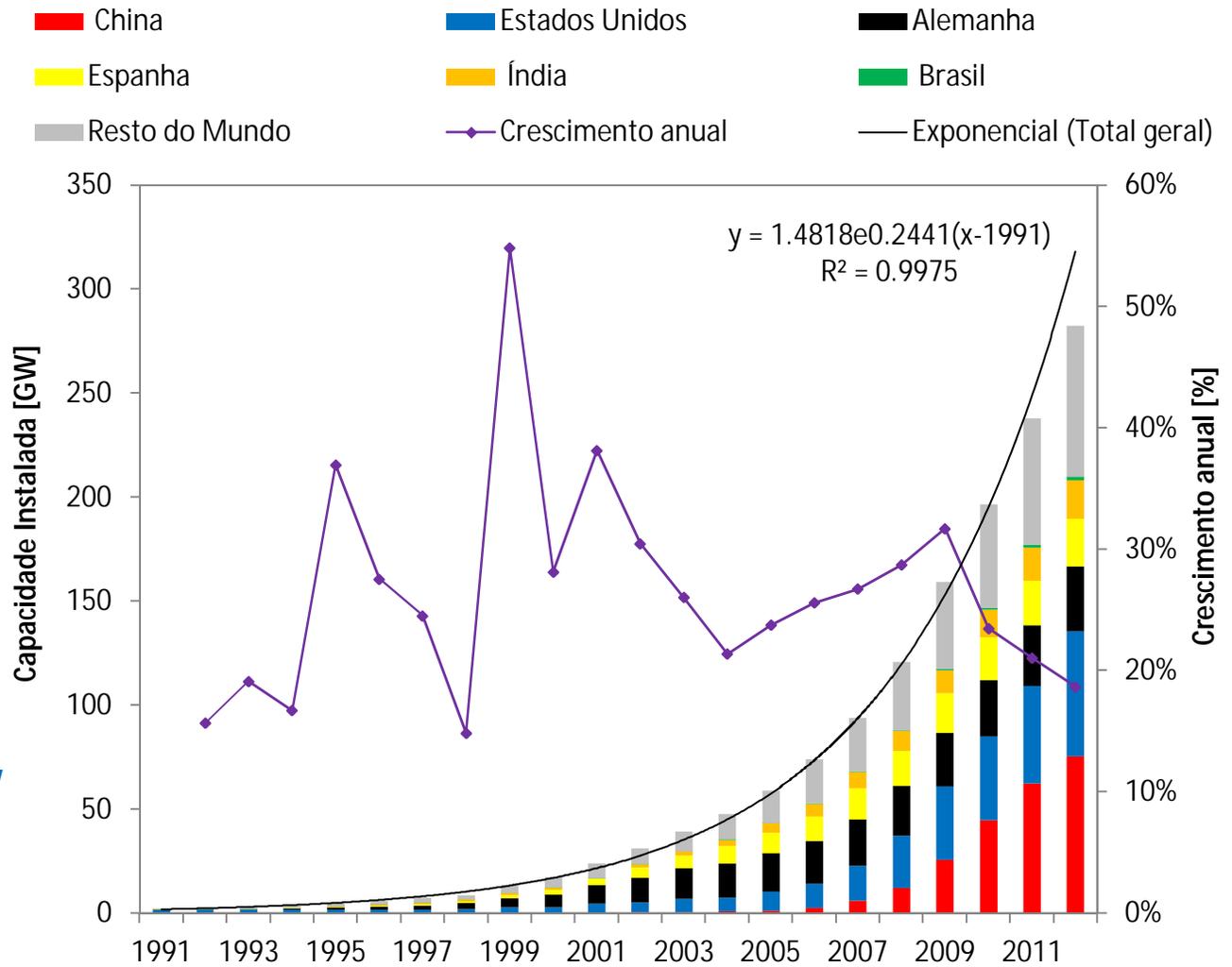
**Final de 2012:**

Potência: 282 GW

Aerogeradores: 225 mil

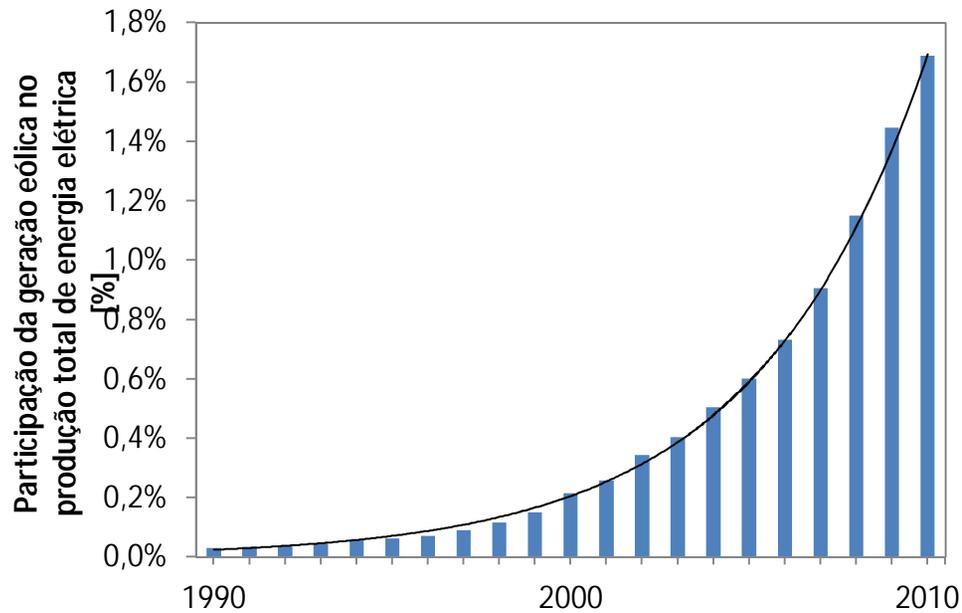
Ranking: China, Estados Unidos, Alemanha, Espanha e Índia (75% do total)

Brasil: 19ª posição 1,8GW (0,5% do total)



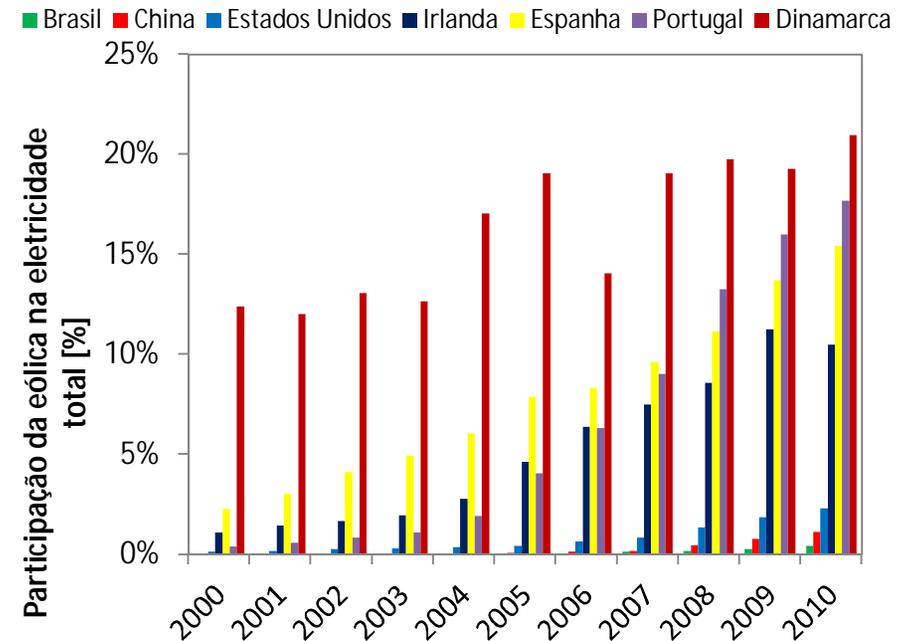
## Geração Eólicoelétrica

### Participação na geração total (EIA)



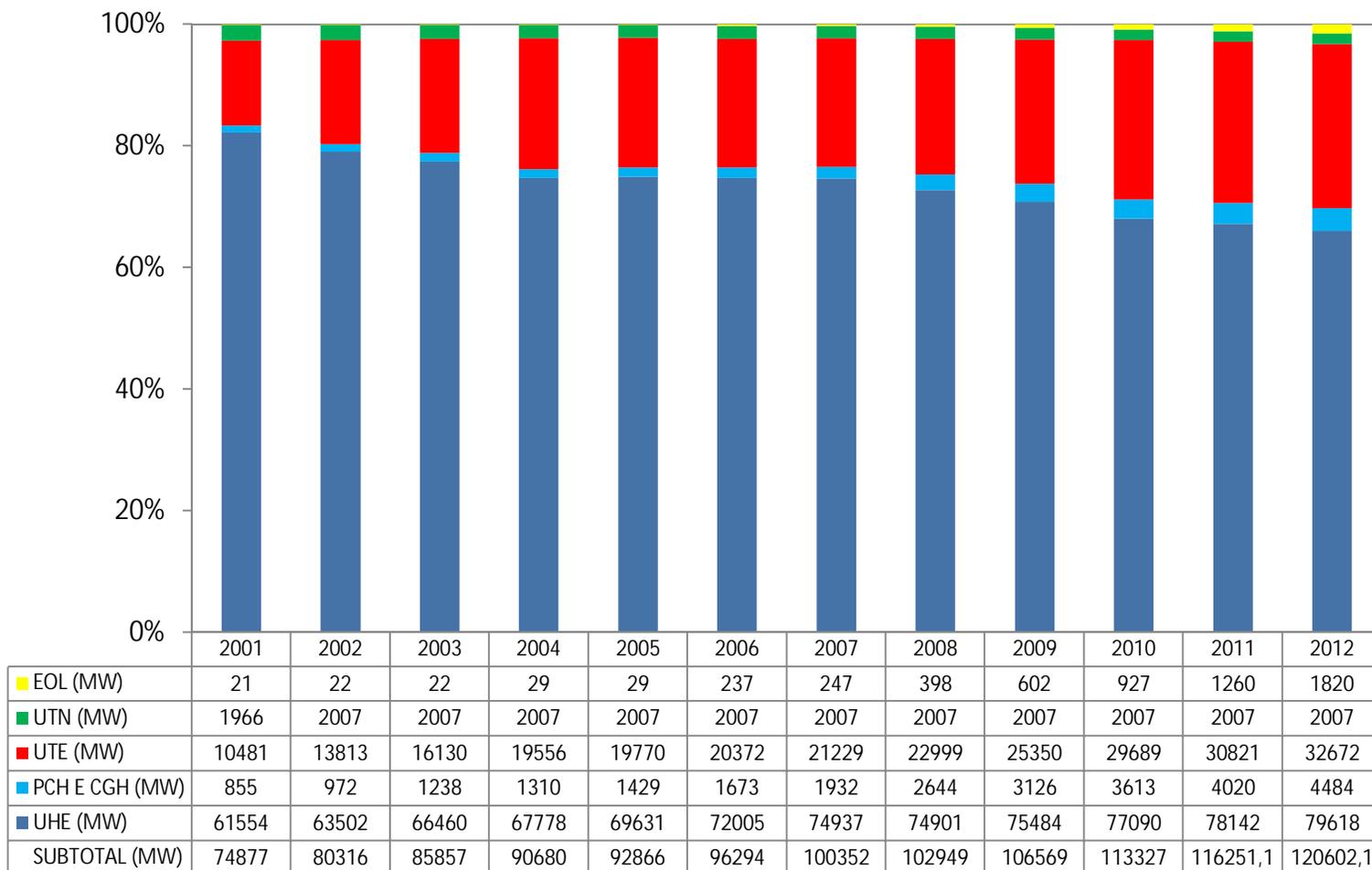
### 2012 (GWEC e EPE):

Mundo: 2,5%, Brasil: 1,0%, Dinamarca:30%



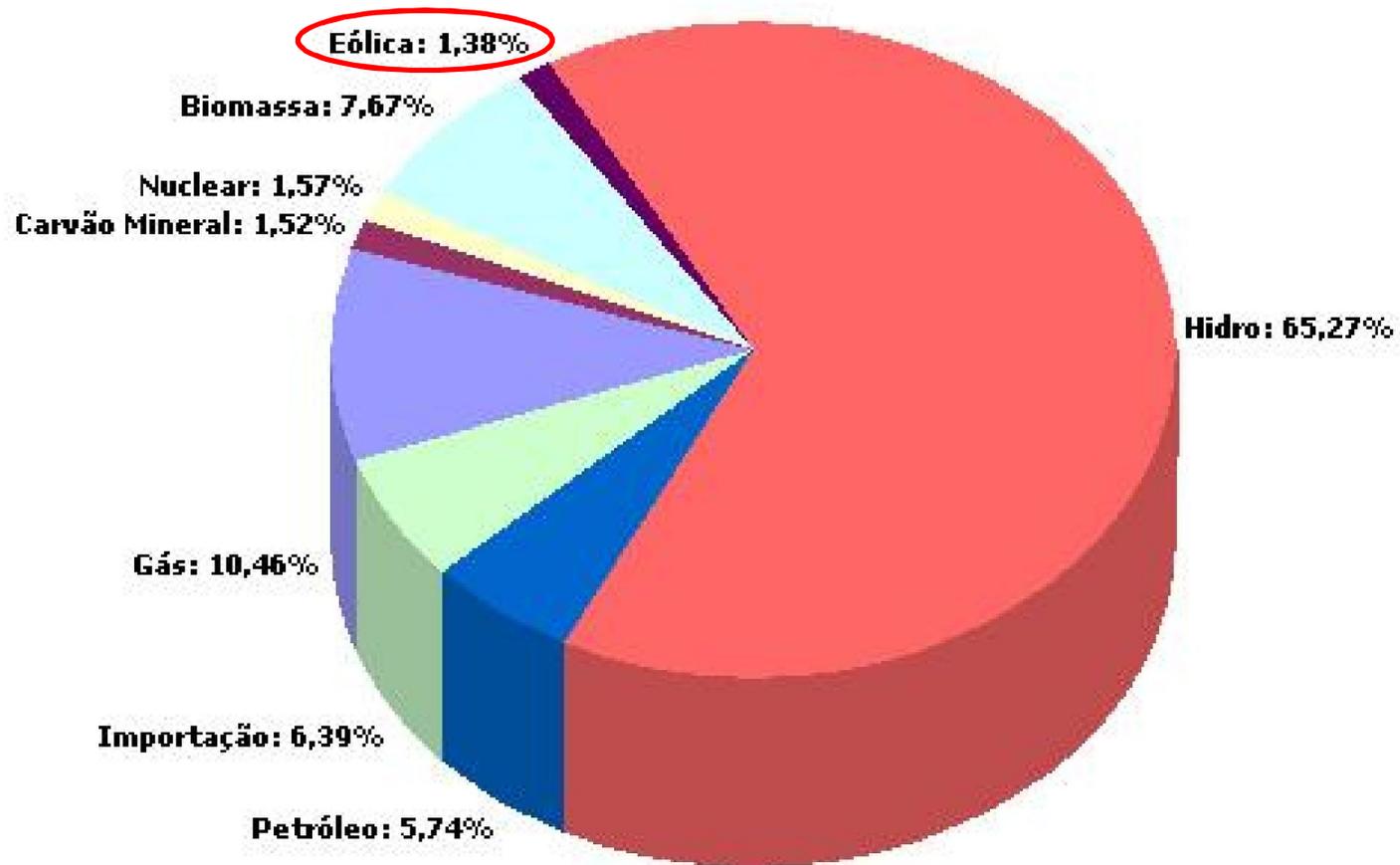


## Evolução da Matriz Elétrica Nacional



# ENERGIA EÓLICA: BRASIL

## Fontes de Energia Exploradas para Geração de Energia Elétrica



## Capacidade Instalada

### Operação:

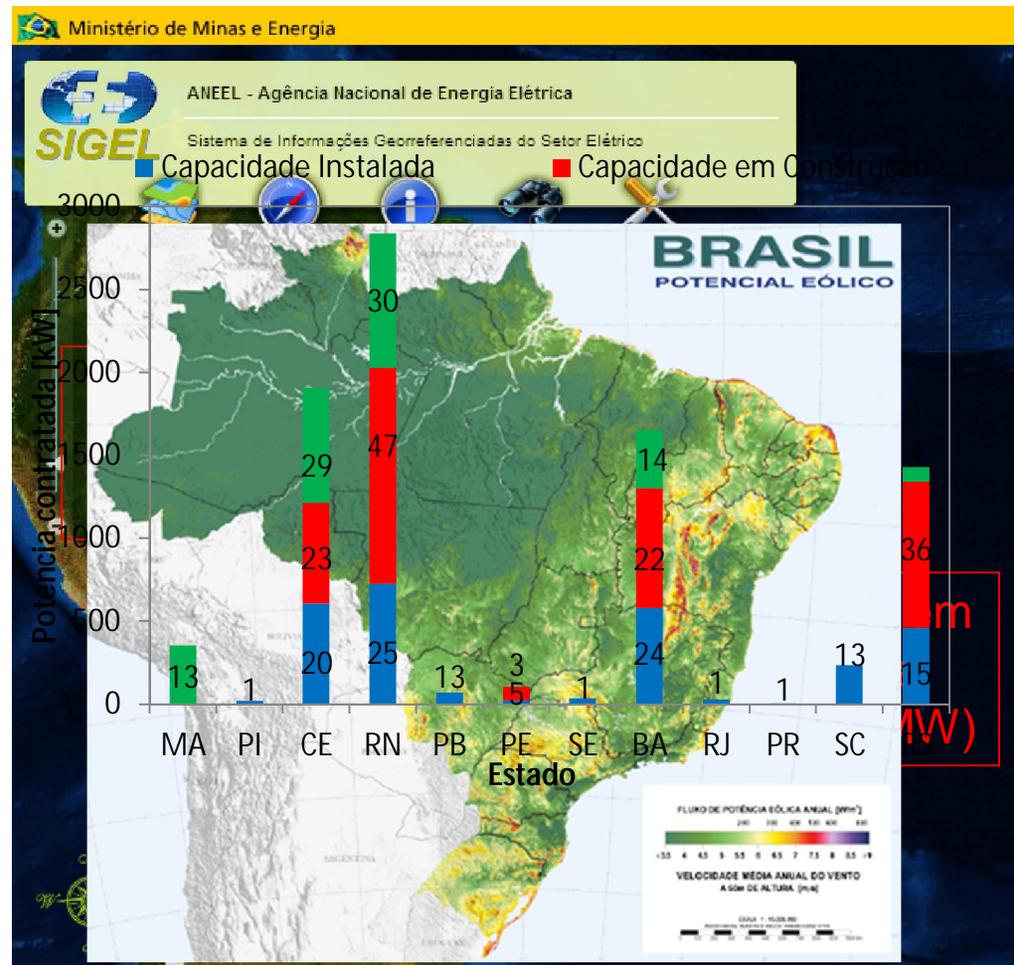
Total: 125 GW (2983 usinas)  
Eólica: 2,1 GW (103 usinas) 2%  
SC: 238,9 MW

### Em construção:

Total: 20,7 GW (155 usinas)  
Eólica: 2,3 GW (93 usinas) 11%

### Outorga

Total: 16,2 GW (539 usinas)  
Eólica: 5,2 GW (196 usinas) 32%

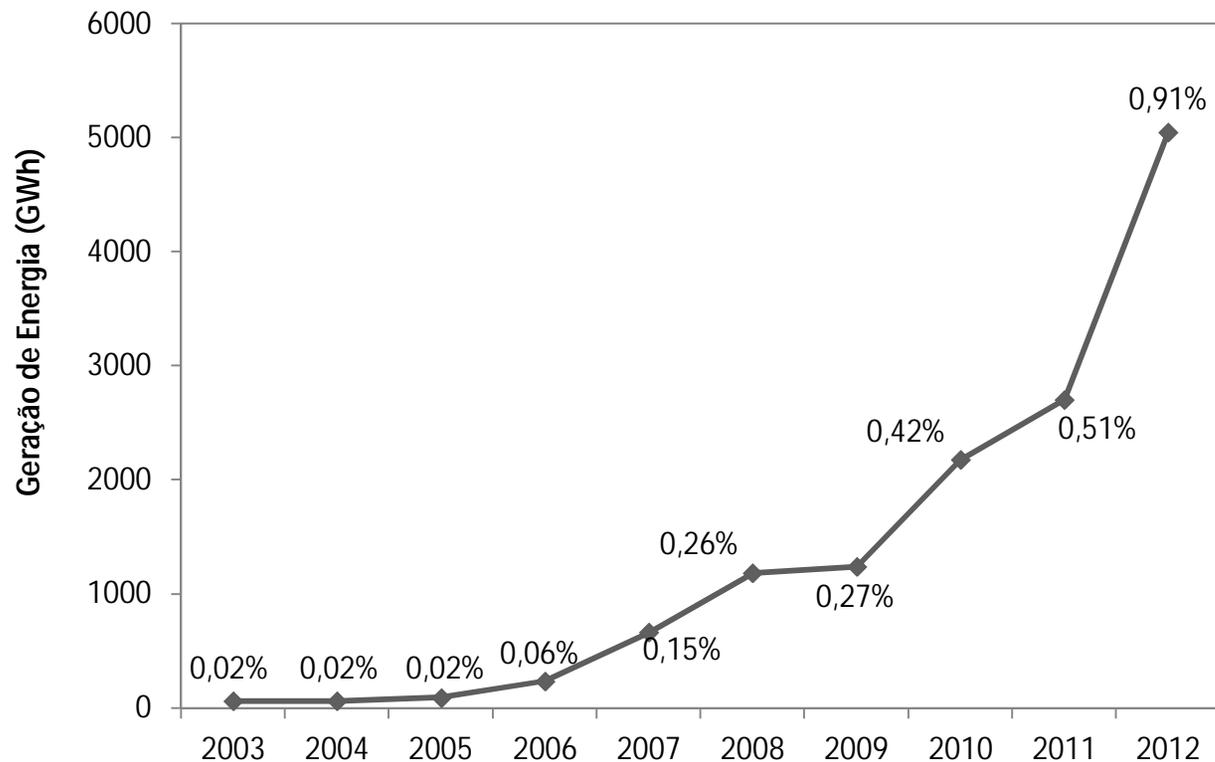


## Geração Eólicoelétrica

1% da geração total em 2012 com 5050 GWh (576 MW médios)

2005 a 2012: crescimento anual de 76,9% contra 4,6% de toda geração elétrica

Previsão 2020: 7% da geração



## Razões para o elevado crescimento no país:

Incentivos do governo

PROINFA e leilões de energia

Desconto na tarifa de uso do sistema de transmissão e distribuição

Linhas de crédito do BNDES com baixa taxa de juros (FINAME)

Isenção do ICMS para os aerogeradores

Desaceleração no crescimento na Europa

Nacionalização da indústria eólica

Redução dos custos dos aerogeradores e equipamentos

viabilidade na implantação de usinas

Melhoria da tecnologia dos aerogeradores na produção de energia

Ventos de elevada intensidade para aproveitamento



# ENERGIA EÓLICA: BRASIL

## Como funciona a venda de energia elétrica no Brasil?

Duas formas:

- **Ambiente de Contratação Regulada (ACR) – Mercado Regulado de Energia:** Empreendedor vende a energia para o Governo e as Concessionárias vendem a energia aos consumidores
- **Ambiente de Contratação Livre (ACL) – Mercado Livre de Energia:** Empreendedor vende energia diretamente para o consumidor final (exclusivo para uma gama específica de indústrias)



### Mercado Regulado:

- Quem está: Consumidor comum
- Preço: R\$ 370-500 /MWh
- Preço vendido ao governo: R\$ 70 – R\$200/MWh

### Mercado Livre:

- Quem está: Indústrias e grandes empresas
- Preço: R\$50-450/MWh

## Evolução do preço da energia eólica no Brasil

•2004 – PROINFA

**R\$ 270 /MWh**

•2009 – Leilão de reserva (competividade)

**R\$ 148/MWh**

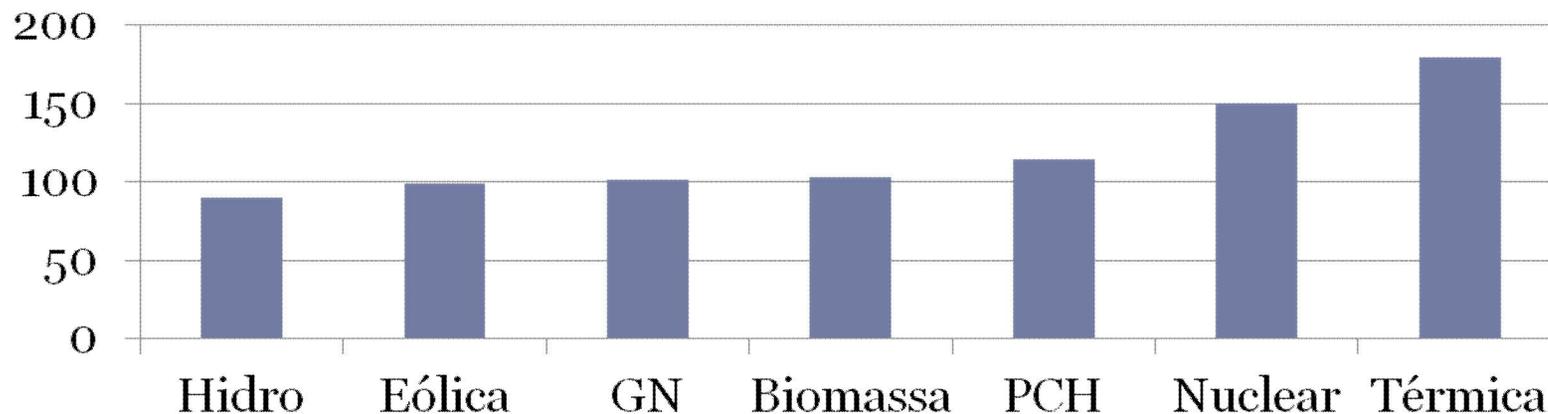
•2010 – Leilão de reserva (consolidação)

**R\$ 122 /MWh**

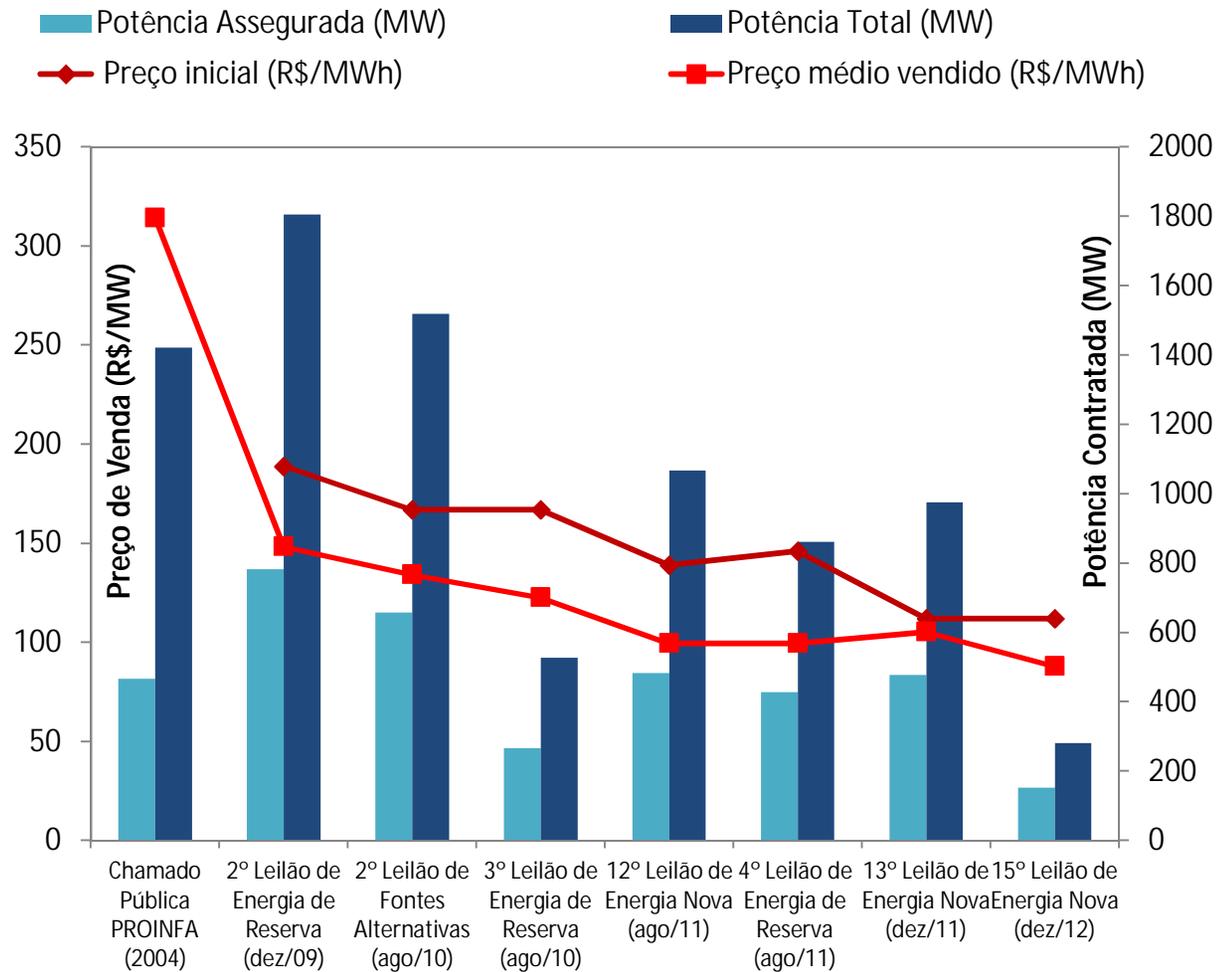
•2011 – Leilões A-5 e A-3 (domínio)

**R\$ 99 /MWh**

Preço Aproximado da energia em 2011 (R\$/ MWh)



## Evolução do preço e potência nos Leilões de Energia



## Localização das eólicas vencedoras dos leilões (até 2012)

(ano) = ano de entrega

Montante Contratado	[MW]
13º LEN A-5/2011 (2016)	57,60
14º LEN A-5/2012 (2017)	201,60
<b>TOTAL</b>	<b>259,20</b>

Montante Contratado	[MW]
12º LEN A-3/2011 (2013)	75,60
<b>TOTAL</b>	<b>75,60</b>

Montante Contratado	[MW]
2º LER/2009 (2013)	323,60
2º LFA/2010 (2013)	150,00
3º LER/2010 (2013)	261,00
12º LEN A-3/2011 (2014)	265,60
4º LER/2011 (2014)	148,80
13º LEN A-5/2011 (2016)	149,90
14º LEN A-5/2012 (2017)	52,30
<b>TOTAL</b>	<b>1.351,20</b>

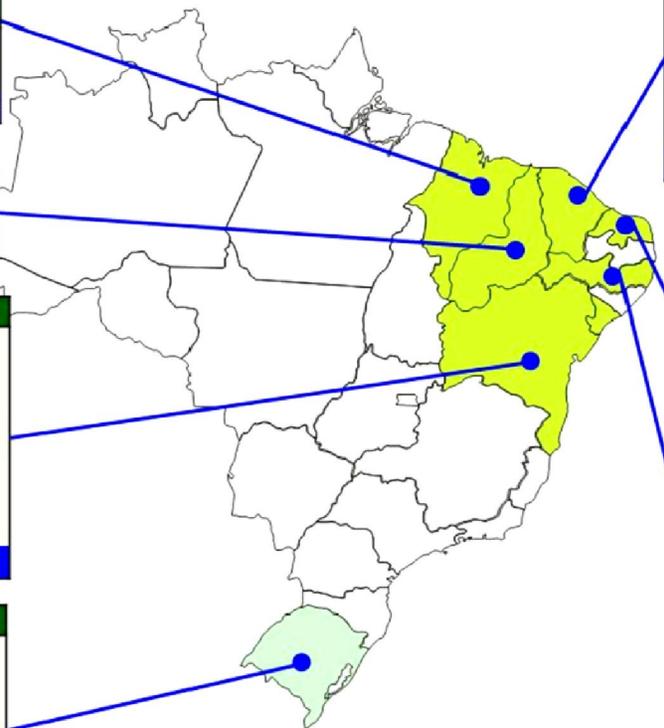
Montante Contratado	[MW]
2º LFA/2010 (2012)	226,20
3º LER/2010 (2013)	20,00
12º LEN A-3/2011 (2013)	492,00
4º LER/2011 (2014)	132,40
13º LEN A-5/2011 (2015)	119,60
14º LEN A-5/2012 (2017)	28,00
<b>TOTAL</b>	<b>1.018,20</b>

SIN	[MW]
<b>TOTAL</b>	<b>6.399,50</b>
<b>240 EMPREENDIMENTOS</b>	

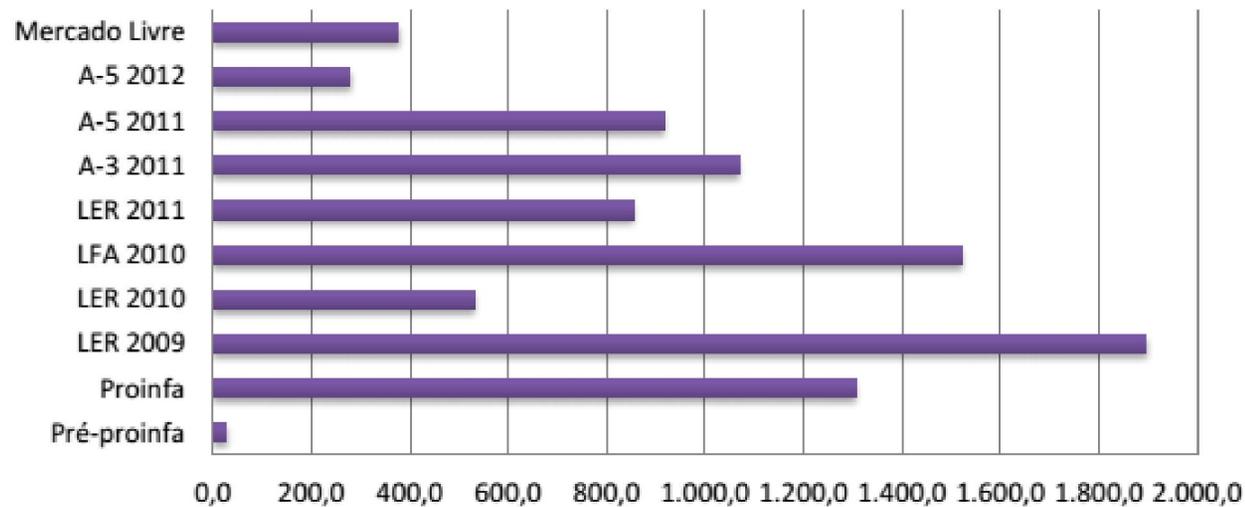
Montante Contratado	[MW]
2º LER/2009 (2013)	475,50
2º LFA/2010 (2013)	150,00
12º LEN A-3/2011 (2014)	103,60
4º LER/2011 (2014)	174,50
13º LEN A-5/2011 (2015)	328,00
<b>TOTAL</b>	<b>1.231,60</b>

Montante Contratado	[MW]
2º LER/2009 (2013)	549,30
2º LFA/2010 (2013)	829,00
3º LER/2010 (2013)	227,40
12º LEN A-3/2011 (2014)	52,80
4º LER/2011 (2014)	405,40
13º LEN A-5/2011 (2015)	321,80
<b>TOTAL</b>	<b>2.385,70</b>

Montante Contratado	[MW]
12º LEN A-3/2011 (2014)	78,00
<b>TOTAL</b>	<b>78,00</b>



## Potência Contratada no ACR e ACL



	Pré-proinfa	Proinfa	LER 2009	LER 2010	LFA 2010	LER 2011	A-3 2011	A-5 2011	A-5 2012	Mercado Livre
MW	27,1	1.306,0	1.895,9	530,8	1.521,4	854,3	1.067,6	915,9	277,5	376,2

# LEPTEN

*Laboratórios de Engenharia de Processos  
de Conversão e Tecnologia de Energia*



# Micro e Mini Geração Eólica

## Ø O que é Microgeração eólica?

### **IEC 61400-2:**

Área Rotor menor que 200m<sup>2</sup>  
Potência equivalente = 50kW

### **Alemanha (BWE):**

Equipamentos com até 75kW

### **EUA (AWEA) e outros:**

Equipamentos com até 100kW

### **Brasil (Res. 482/2012 ANEEL):**

Micro Geração = até 100kW  
Mini Geração = de 100kW a 1MW



## Micro e Mini Geração Eólica

Fonte: LEPTEN/UFSC

### Ø Tecnologias Disponíveis:



Upwind

Fonte: SouthWest



Downwind

## Micro e Mini Geração Eólica

### Ø Tecnologias Disponíveis:



Fonte: Gaia Wind

2 Pás



Fonte: Quiet Revolution

Eixo Vertical

## Micro e Mini Geração Eólica

### Ø Panorama Global:

Potência Instalada em 2010 = 443,3MW

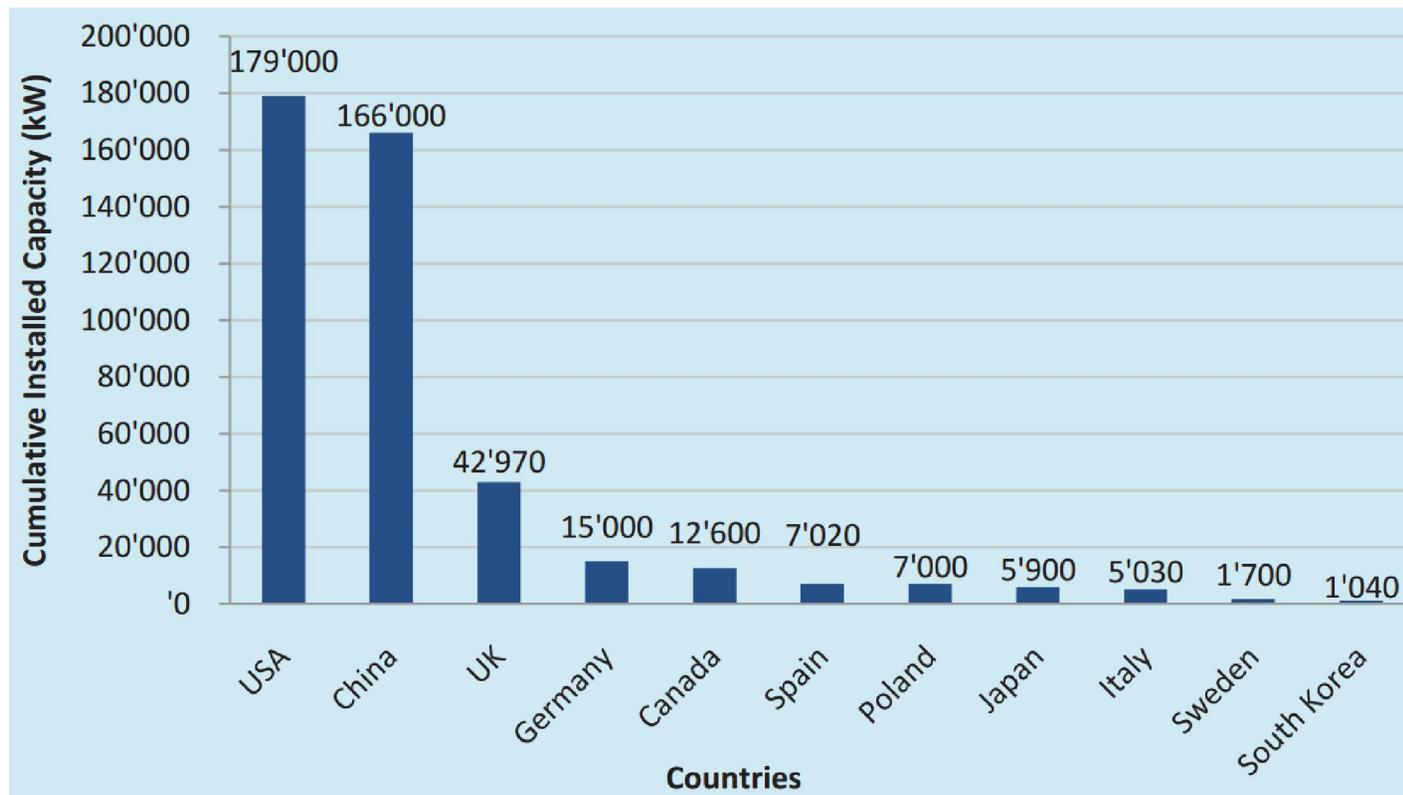
EUA e China são líderes com, respectivamente,  
40% e 37% da capacidade instalada

Mais de 300 fabricantes de Pequenos Aerogeradores hoje

Contudo, pequenos aerogeradores representaram apenas,



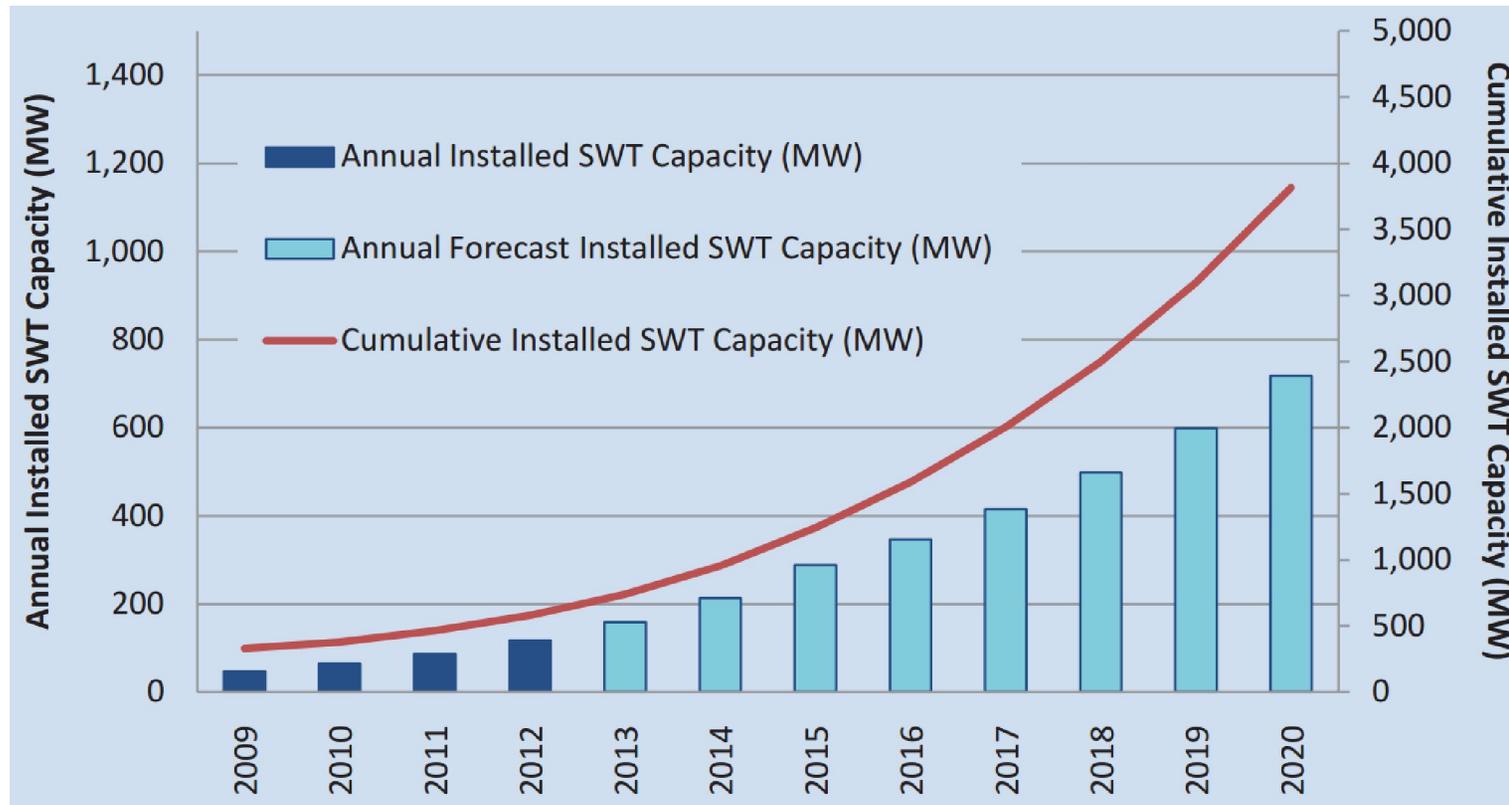
## Ø Panorama Global: Capacidade Instalada por país em 2011



Fonte: WWEA, 2012 Small Wind World Report.

## Micro e Mini Geração Eólica

### Ø Panorama Global: Previsão de Crescimento do Setor até 2020



Fonte: WWEA, 2012 Small Wind World Report.

# LEPTEN

Laboratórios de Engenharia de Processos  
de Conversão e Tecnologia de Energia

## Micro e Mini Geração Eólica

Microgeração eólica como diferencial na esfera local

Geração Distribuída

Porém cada equipamento tem sua vocação

160 W

100 kW

Fonte: Nothern Power Systems



Fonte: Energia Pura



# Micro e Mini Geração Eólica

## Ø Panorama Nacional: Regulamentação da Micro e Mini Geração

Resolução Normativa ANEEL no. 482  
17 de abril de 2012

Importância do incentivo governamental neste tipo de aplicação



## Micro e Mini Geração Eólica

### Ø Desempenho de instalações de microgeração:

26 Pequenos Aerogeradores estudados pelo Warwick Wind Trials (UK)  
**Fator de Capacidade Médio = 4,15%**

### Ø Estudo de Caso: Câmara Municipal de São José/SC



# Micro e Mini Geração Eólica

## Ø Estudo de Caso: Câmara Municipal de São José/SC

### Estudo de Caso

PAE = 2024,9 kWh

FC = 9,53%

### Viabilidade Econômica

VPL = -R\$ 16.671,17

TIR = 1,5%

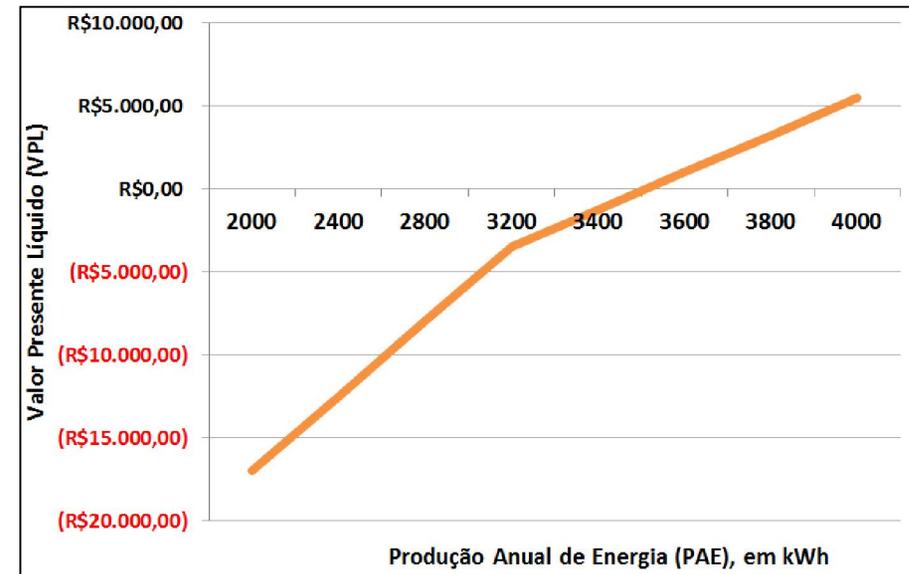
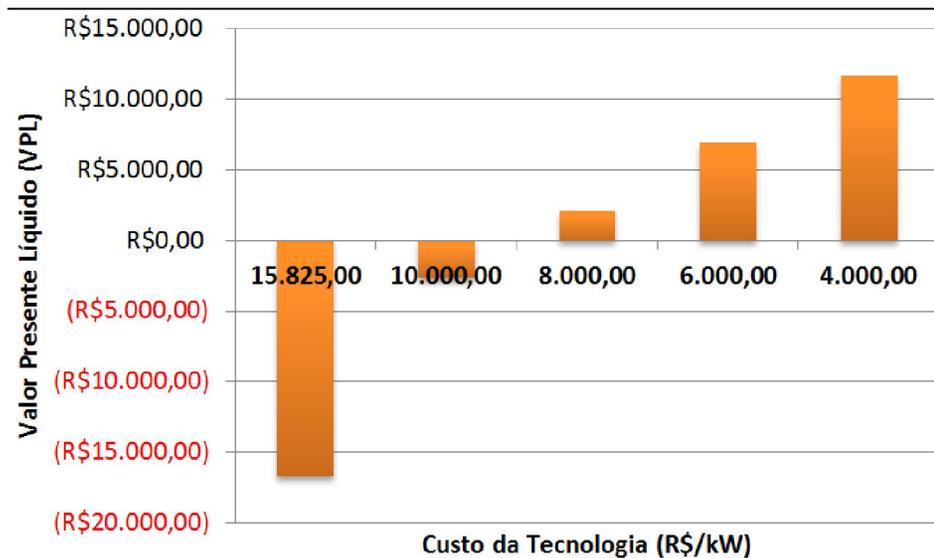
### Validação dos Resultados (2 anos de operação)

	2011	2012
PAE	2200,6	2160,8
Desvio do Previsto	+8,68%	+6,71%

## Micro e Mini Geração Eólica

Ø Bancada Experimental em Energia Eólica – UFSC

Ø Análise de Sensibilidade (fatores isolados):

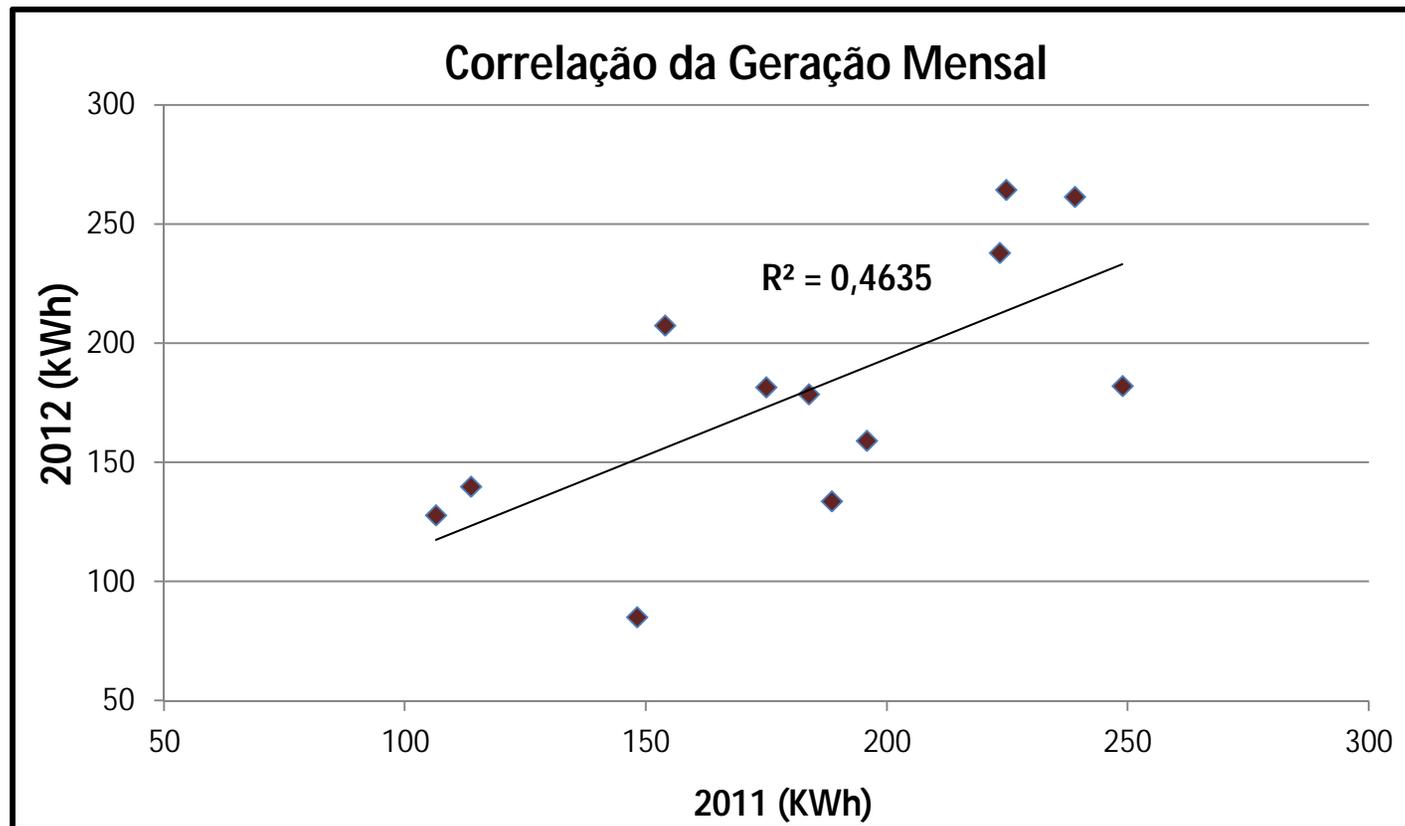


**Custo Mundial Médio = R\$ 8900/kW**

Fonte: WWEA, 2012

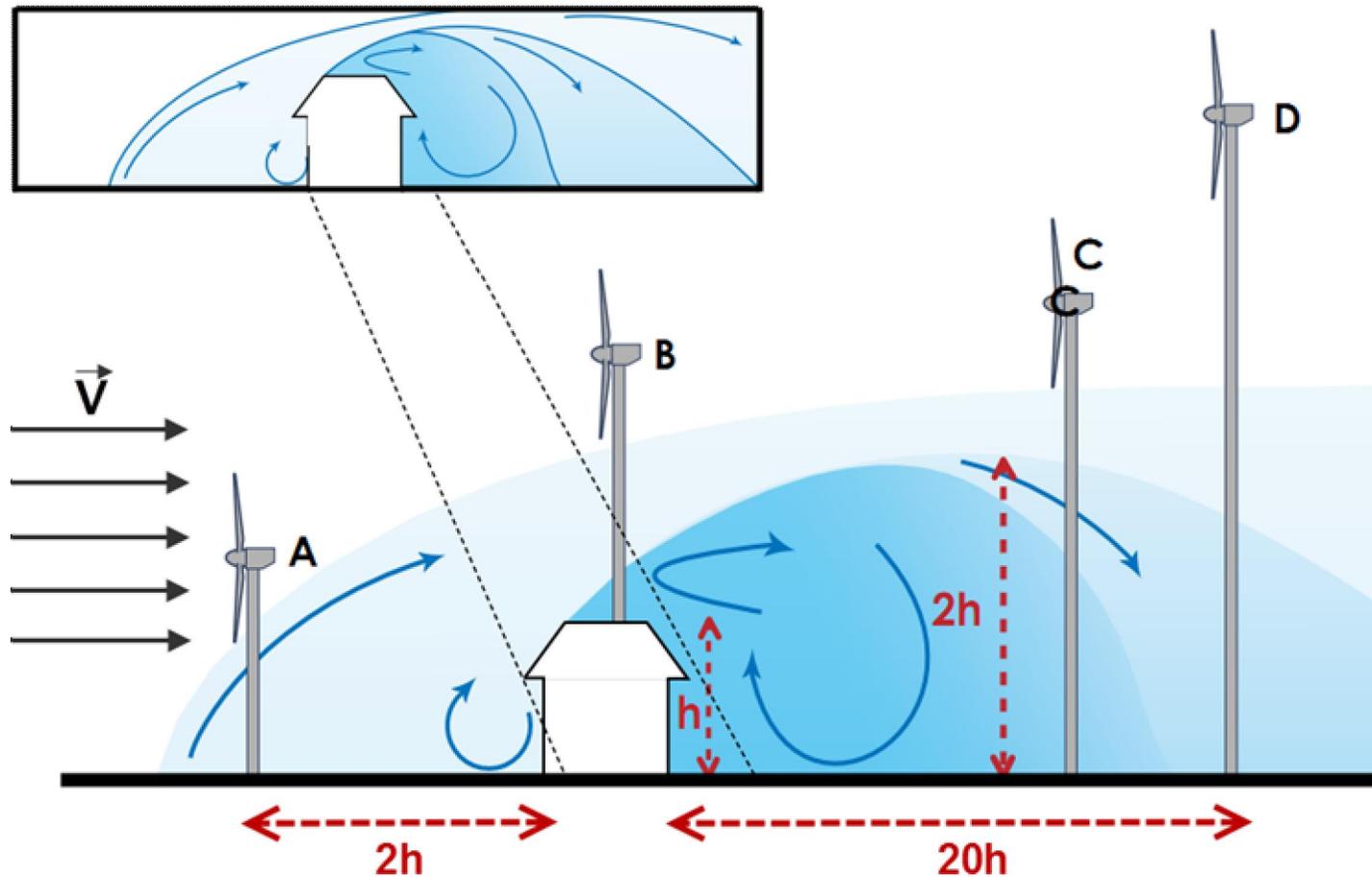
**Custo Médio na China = R\$ 3200/kW**

## Ø Estudo de Caso: Câmara Municipal de São José/SC

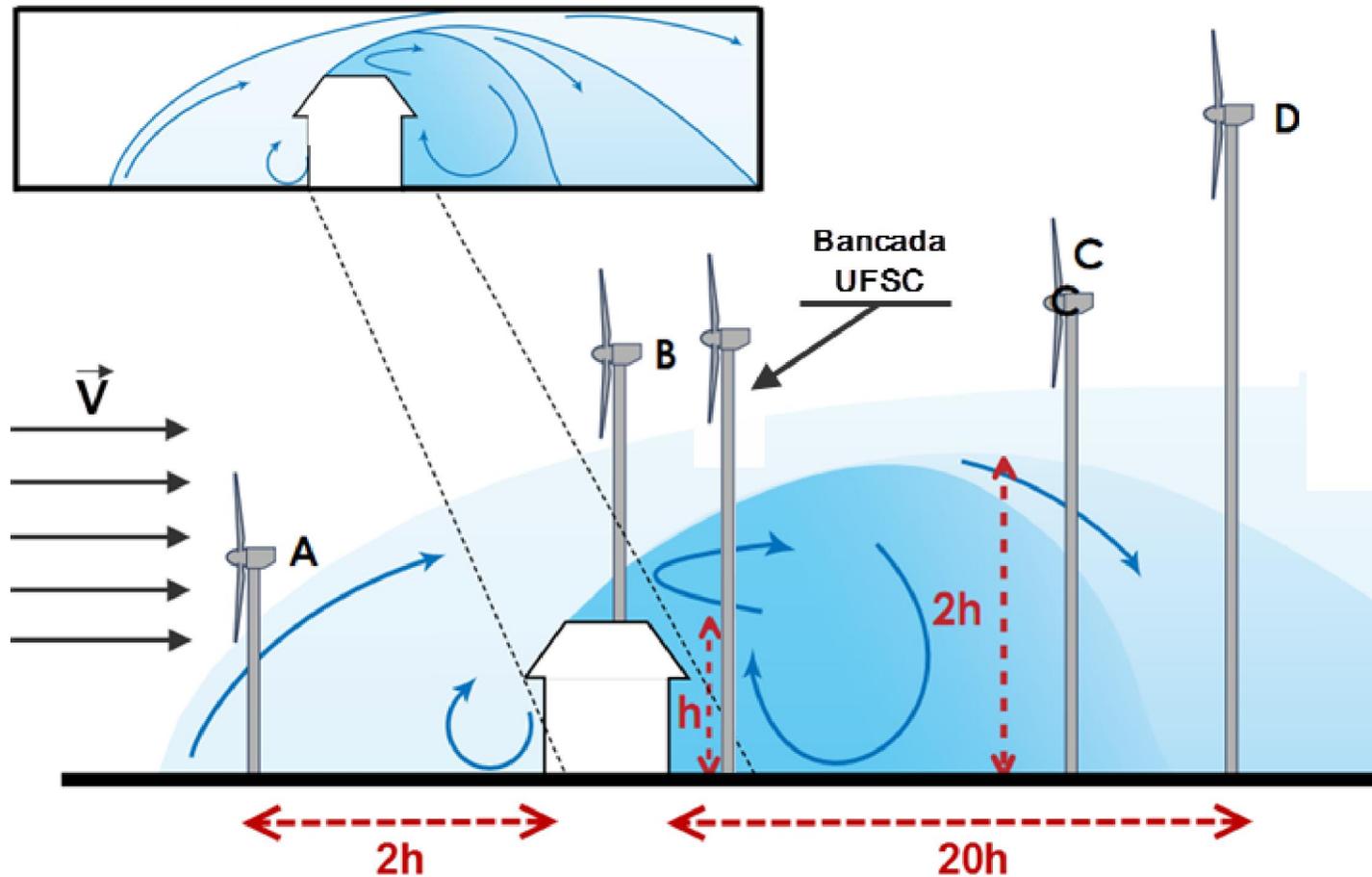


## Micro e Mini Geração Eólica

### Ø Bancada Experimental em Energia Eólica - UFSC



## Ø Bancada Experimental em Energia Eólica - UFSC



# LEPTEN

*Laboratórios de Engenharia de Processos  
de Conversão e Tecnologia de Energia*

# Micro e Mini Geração Eólica

## Ø Bancada Experimental em Energia Eólica - UFSC



# LEPTEN

*Laboratórios de Engenharia de Processos  
de Conversão e Tecnologia de Energia*

# Micro e Mini Geração Eólica

Ø Bancada Experimental em Energia Eólica – UFSC

Vídeo de Apresentação



# LEPTEN

Laboratórios de Engenharia de Processos  
de Conversão e Tecnologia de Energia



**Pedro Alvim de Azevedo Santos**

Engenheiro Mecânico  
Pesquisador LEPTEN/UFSC  
[pedroasantos@lepten.ufsc.br](mailto:pedroasantos@lepten.ufsc.br)



# LEPTEN

*Laboratórios de Engenharia de Processos  
de Conversão e Tecnologia de Energia*



## 5. DESENVOLVIMENTO DE PROJETOS EÓLICOS

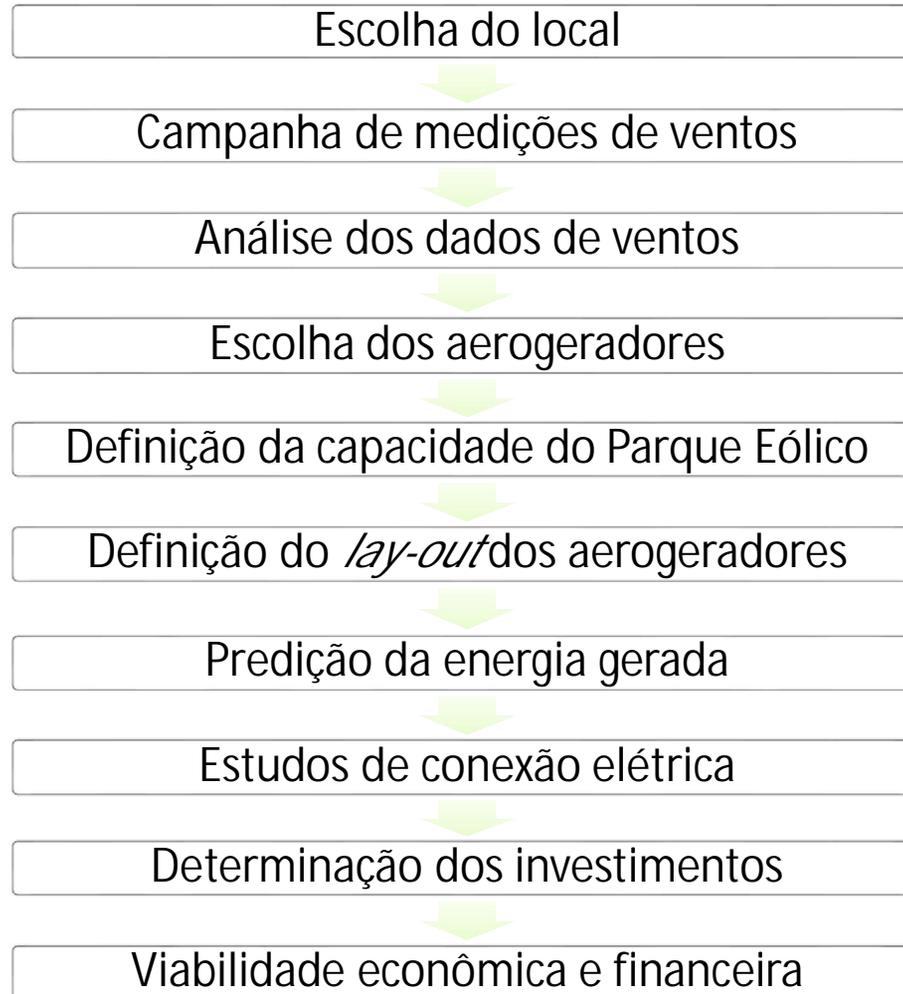
Local: Florianópolis, SC

Data: Outubro de 2013

Por: Leonardo Balvedi Damas

# PROJETO EÓLICO: ETAPAS

## Estudos Técnicos



## Estudos Técnicos

### Escolha do local

- Atlas eólico
- Localização de usinas existentes
- Disponibilidade de terras
- Rugosidade do terreno
- Obstáculos
- Acessos ao local
- Acesso à rede elétrica
- Restrições ambientais
- Autorização do dono da terra



Fonte: gforum

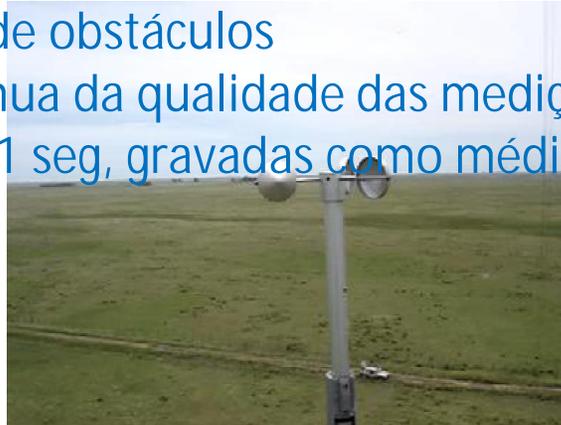
## Estudos Técnicos

### Campanha de medições de ventos

- Duração mínima de 3 anos
- Escolha da torre e sensores (anemômetro, sensor de direção...)
- Instalação longe de obstáculos
- Verificação contínua da qualidade das medições
- Medições a cada 1 seg, gravadas como médias a cada 10 min



*Fonte: Camargo Schubert*



*Anemômetro*



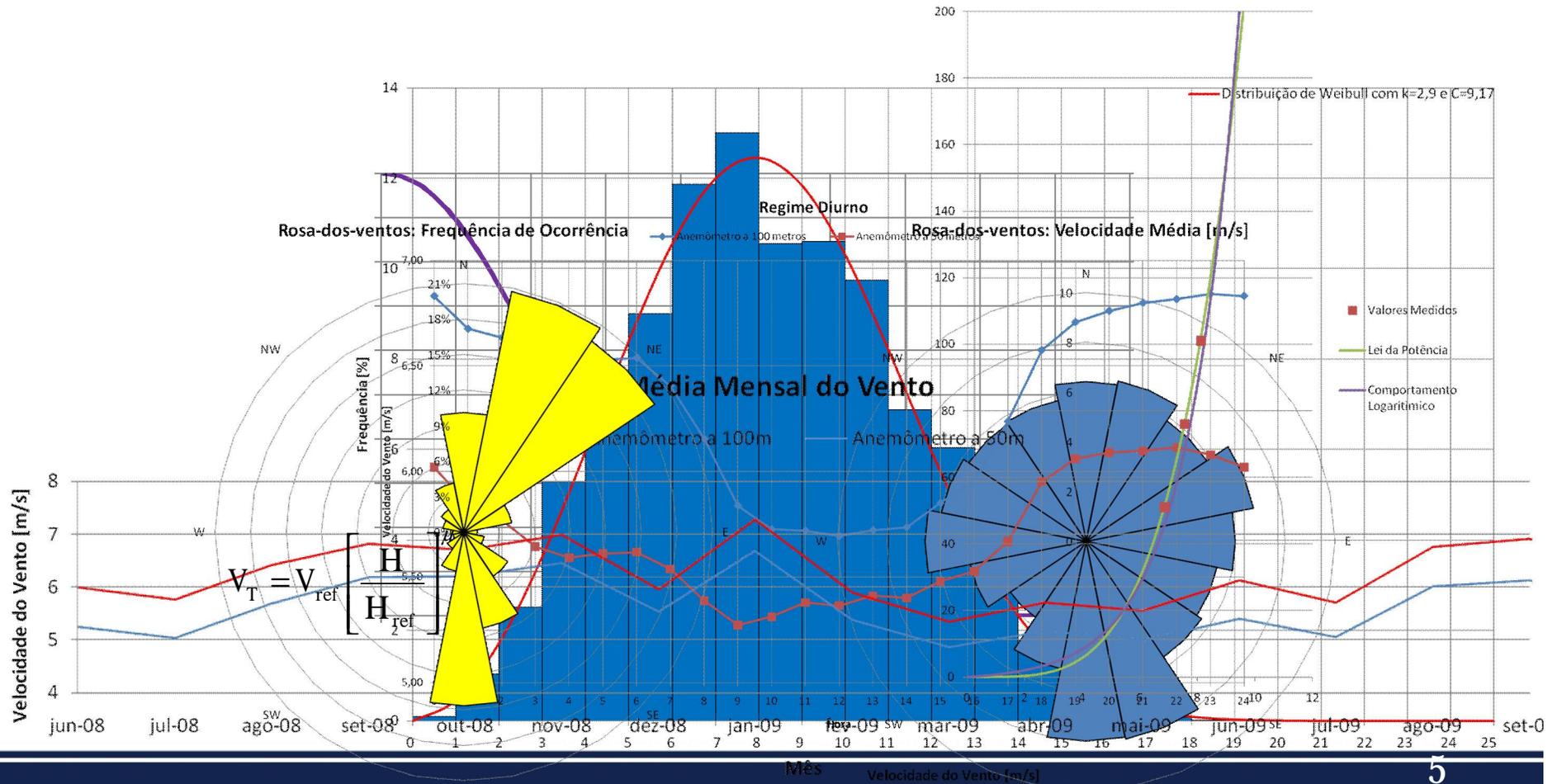
*Sensor de direção*

*Torre anemométrica*

## Estudos Técnicos

- Tratamento estatístico das medições

$$f(V) = \frac{k}{V} \left( \frac{V}{V_c} \right)^{k-1} \exp \left( - \left( \frac{V}{V_c} \right)^k \right)$$



## Estudos Técnicos

### Escolha dos aerogeradores

- Preço do equipamento
- Análise da curva de potência (pot. gerada X velocidade do vento)
- Fator de capacidade (FC) para o perfil de vento medido

Ø O FC é a relação entre a energia elétrica gerada no ano e a capacidade de produção:

$$FC = \frac{PAE}{24 \times 365 \times P}$$

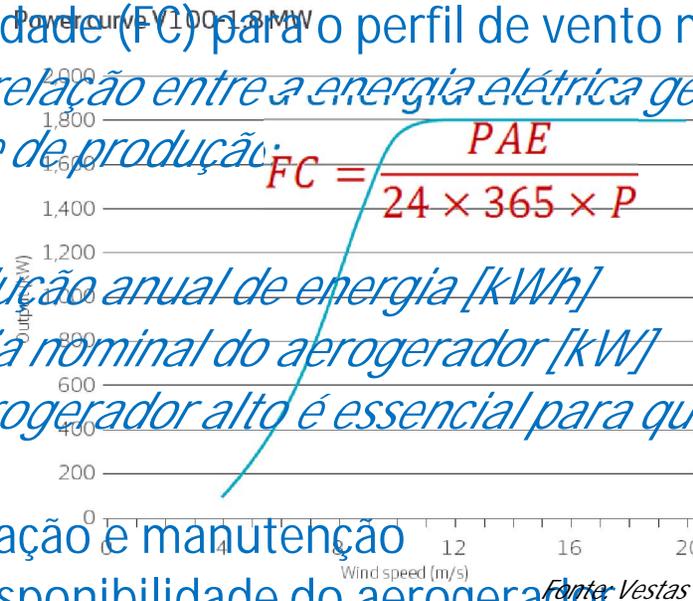
onde:

PAE = Produção anual de energia [kWh]

P = Potência nominal do aerogerador [kW]

Ø FC do aerogerador alto é essencial para que o projeto seja viável

- Custos de operação e manutenção
- Garantias de disponibilidade do aerogerador
- Aerogerador cadastrado no FINAME (BNDES)



## Estudos Técnicos

### Definição da capacidade do Parque Eólico

- Espaço disponível
- Condições financeiras de investimento
- Enquadramento em planos de incentivo

*Ø 50% de desconto na TUST/TUSD para usinas de até 30 MW*

## Estudos Técnicos

### Definição do *lay-out* dos aerogeradores

- Influência do terreno sobre o vento
- Influência entre aerog (altura mínima: 300 a 500 m)
- Disposição perpendicular à direção predominante
- Acesso aos aerog
- Rede elétrica



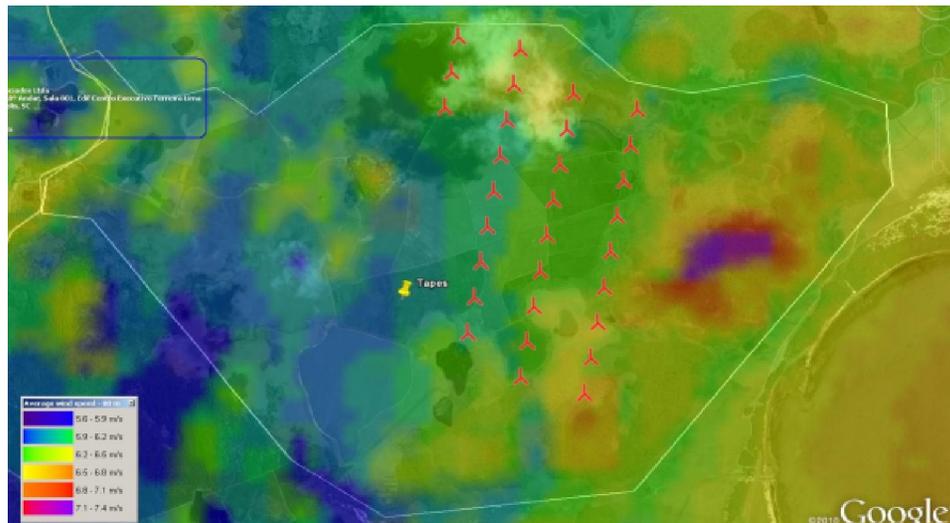
Fonte: Progresso Verde

*Parque eólico de Anití, Nova Zelândia*

## Estudos Técnicos

### Predição da energia gerada

- Mapa de Recursos Eólicos
  - Simulações computacionais (WAsP, WindPRO, WindFarmer, Meteodyn, WindSIM)
- FC global do Parque (considera perdas aerodinâmicas, elétricas...)
  - Ø *Caso FC do Parque seja baixo, retorna-se à definição do layout ou à escolha dos aerogeradores*



## Estudos Técnicos

### Estudos de conexão elétrica

- Transformadores
- Subestação
- Linhas de tra
- Qualidade da
- Limitações d



(carregadas)

*Fonte: Diretoria Governo ES*

## Estudos Técnicos

### Determinação dos investimentos

- Aquisição, transporte, montagem e comissionamento dos equipamentos eletromecânicos (aerogeradores, transformadores, subestação...)
- Obras civis (acessos, fundação das torres...)

# PROJETO EÓLICO: ETAPAS

## Estudos Técnicos

Viabilidade econômica e financeira

CUSTOS

- Aerogeradores e Equipamentos
- Obras civis, rede elétrica e subestação
- Aquisição ou locação da terra (arrendamento)
- Operação e manutenção
- Impostos
- Juros dos financiamentos

X

FATURAMENTO

- Venda de energia

Atratividade e rentabilidade do investimento avaliados pela taxa interna de retorno (TIR)

# PROJETO EÓLICO: ETAPAS

## Estudos Ambientais

DNPM - solicitação de  
restrição minerária

Anuência das Prefeituras

Autorização para  
intervenção em Unidades  
de Conservação (ICM)

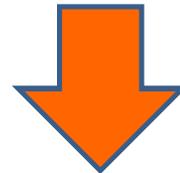
PROJETO

Registro na ANEEL

Autorização para  
intervenção em Terras  
Indígenas (FUNAI)

ESTUDOS AMBIENTAIS  
Orgão Ambiental  
Estadual ou IBAMA - LP

Autorização (IPHAN) para  
Levantamentos  
Arqueológicos e entrega  
do Diagnóstico



# PROJETO EÓLICO: ETAPAS

## Estudos Ambientais



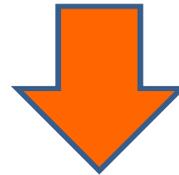
## PROJETO EÓLICO: ETAPAS

### Estudos Ambientais

Declaração Autorizativa  
Geração ANEEL

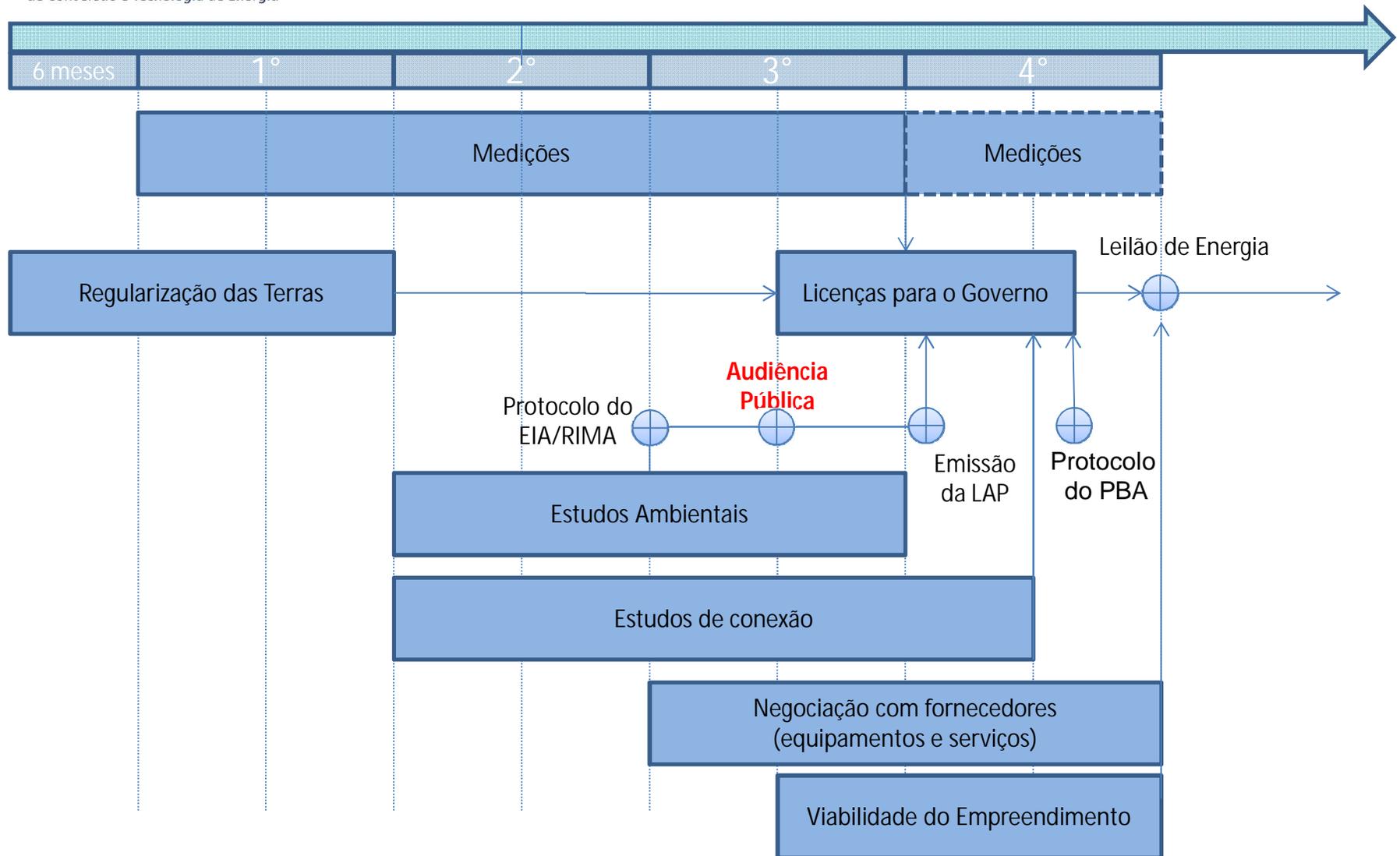
OPERAÇÃO

LO – Relatório  
Comissionamento  
IBAMA/OEA

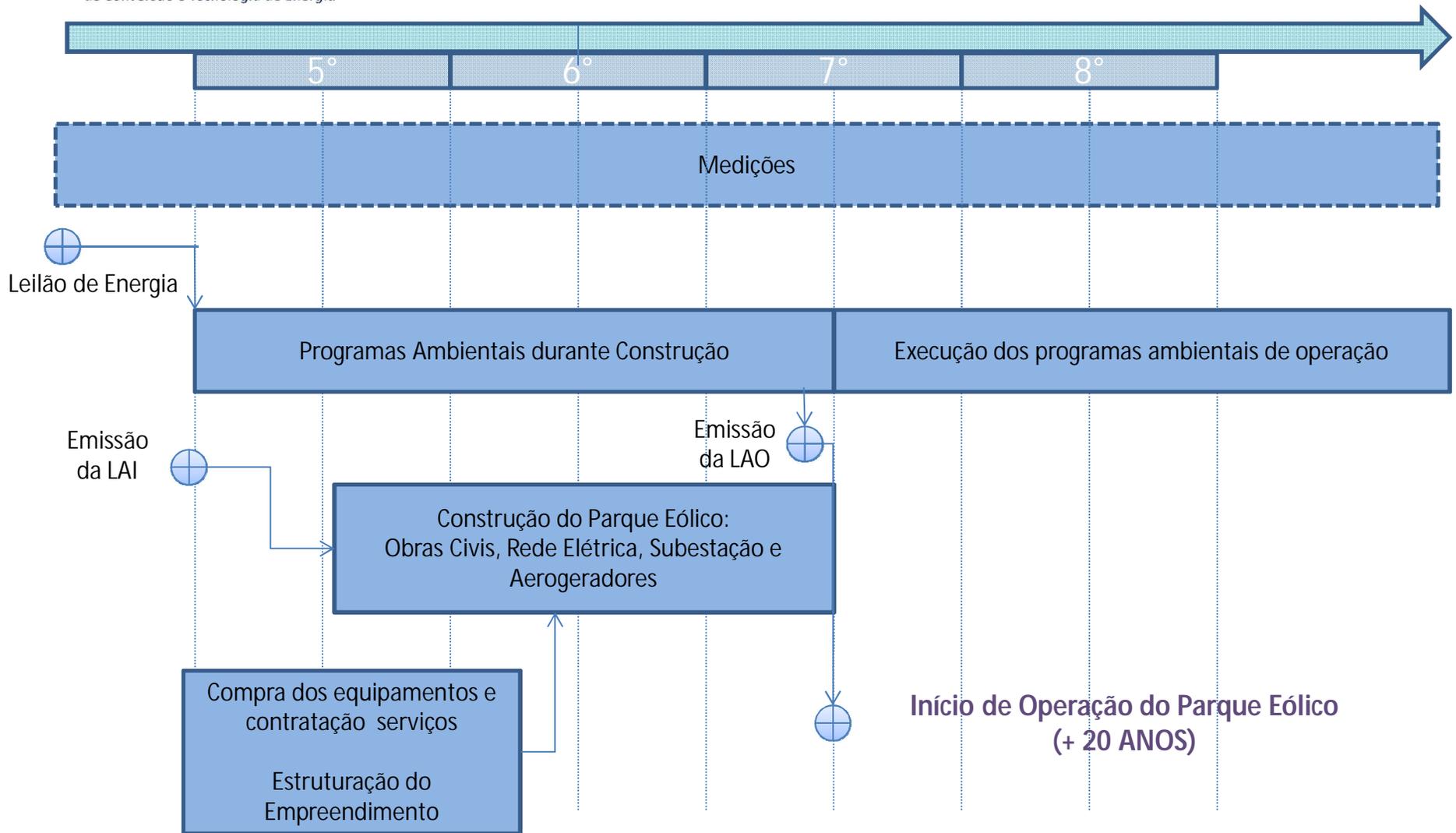


RENOVAÇÃO

# EÓLICA: CRONOGRAMA



# EÓLICA: CRONOGRAMA



# LEPTEN

*Laboratórios de Engenharia de Processos  
de Conversão e Tecnologia de Energia*

# PROJETO EÓLICO

Dúvidas?



# LEPTEN

*Laboratórios de Engenharia de Processos  
de Conversão e Tecnologia de Energia*



# PERGUNTAS & RESPOSTAS



# LEPTEN

*Laboratórios de Engenharia de Processos  
de Conversão e Tecnologia de Energia*



# INTERVALO (20 min\*)

**\*Retorno às 20h**



# LEPTEN

*Laboratórios de Engenharia de Processos  
de Conversão e Tecnologia de Energia*



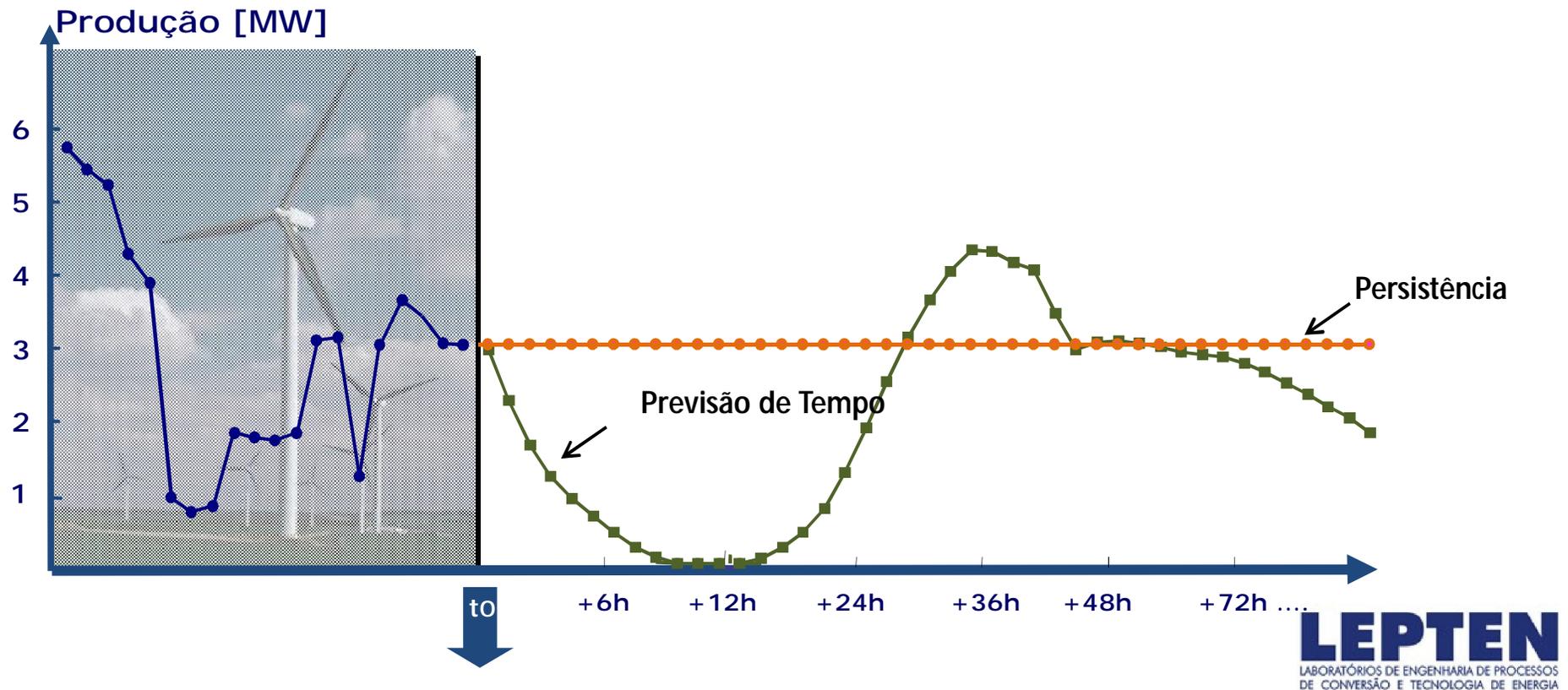
Departamento de  
**FÍSICA**

## Previsão Eólica de Curto Prazo

Tecnologias Disponíveis –

Reinaldo Haas (FSC/UFSC)

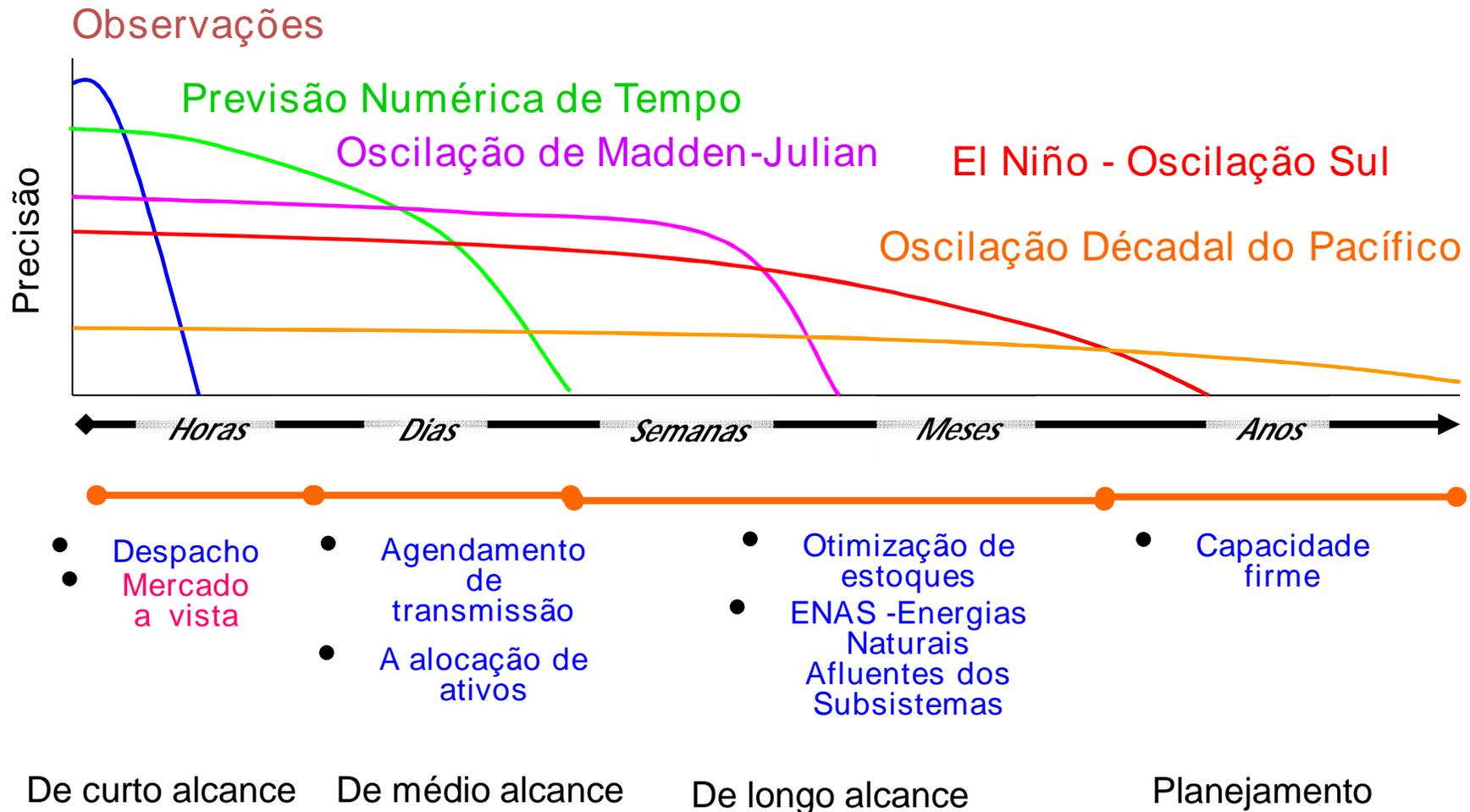
- Ø Previsão de geração eólica, baseado nas previsões do modelos de PNT- Previsão Numérica de Tempo:



# Fatores que influenciam a Previsão de Vento No Nordeste

- 1- Velocidade do Vento
- 2- Direção do Vento;
- 3- Posição da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT);
- 4- Dipolo do Nordeste;
- 5- El Niño X La Niña
- 6 - Brisa Terrestre;
- 7- Perfil Vertical do Vento
- 8 –Efeito de Esteira

# Horizontes de Previsão

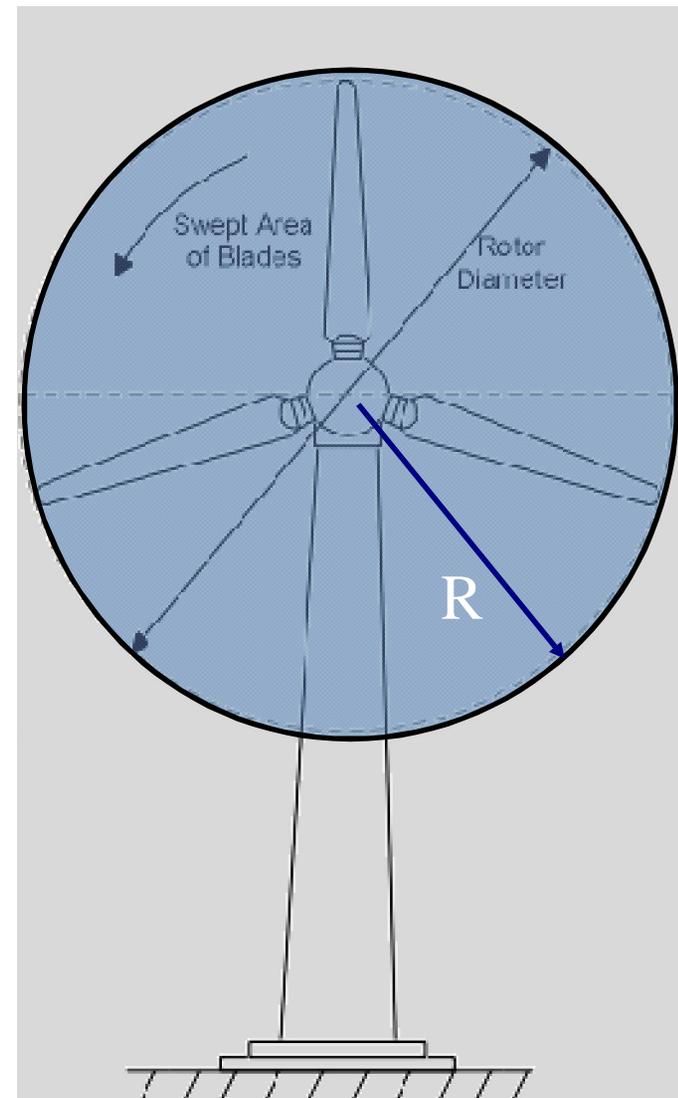


# Velocidade do Vento

Potência do vento =  $\frac{1}{2} \rho A V^3$

- Onde:
  - q  $\rho$  = densidade do ar,
  - q  $A$  = área varrida,
  - q  $V$  = velocidade do vento,

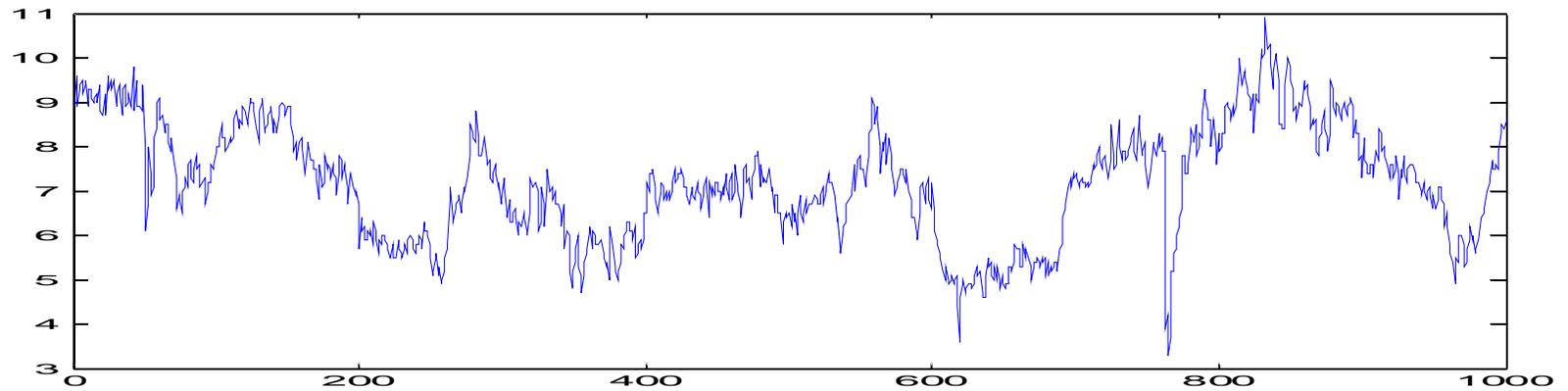
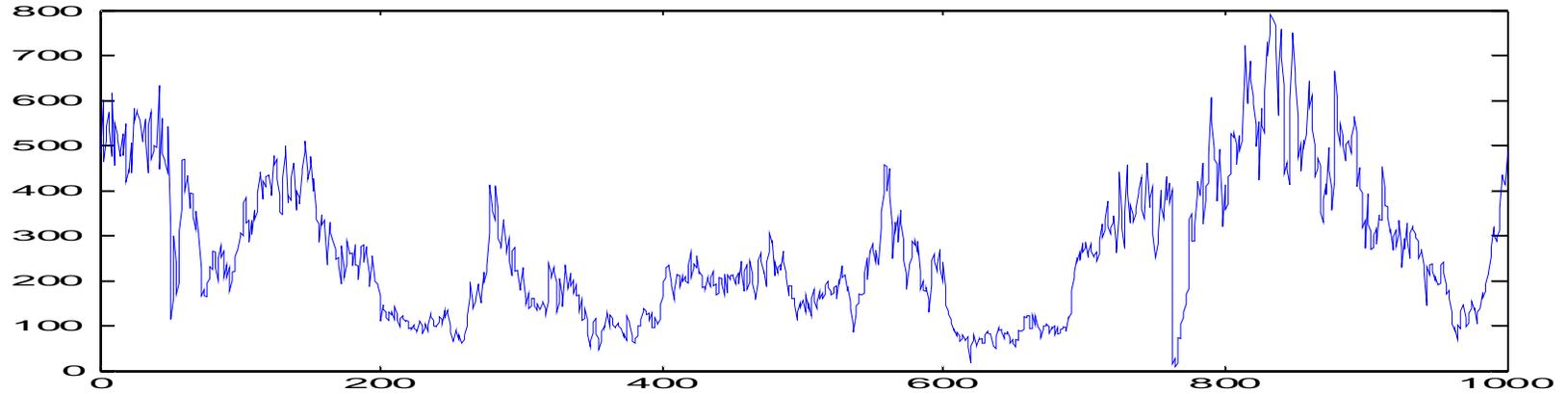
Área varrida:  $A = \pi R^2$  é a área varrida pelo círculo do rotor ( $m^2$ ).



# Importância da velocidade do vento

- Nenhum outro factor mais importante é a quantidade de energia disponível ao vento do que a velocidade do vento
- O potência é uma função cúbica da velocidade do vento
  - $V \times V \times V$
- Assim um aumento de 20% na velocidade do vento significa 73% a mais de energia
- A duplicação da velocidade do vento significa oito vezes mais energia.

# Potencia x Velocidade do Vento

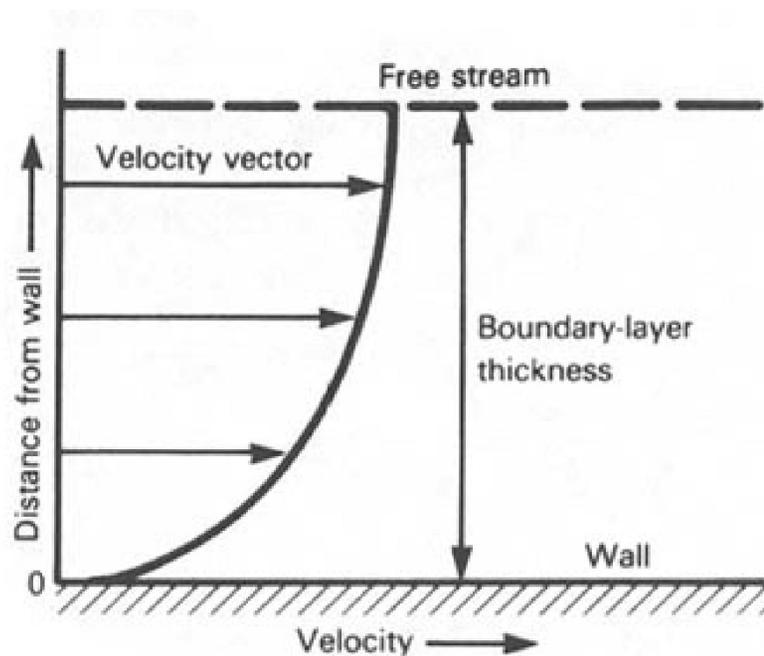


# Efeito de Esteira Múltiplas

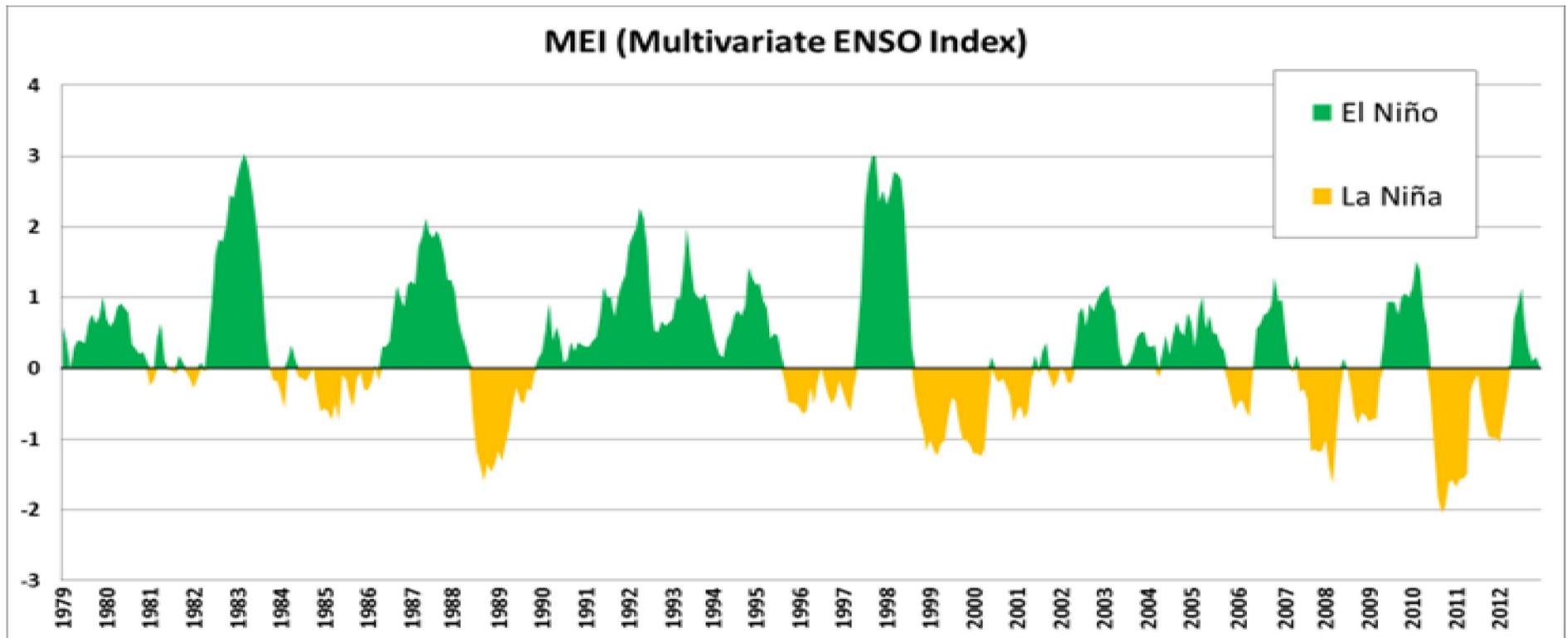


## PROJETO P&amp;D EÓLICA-UFSC

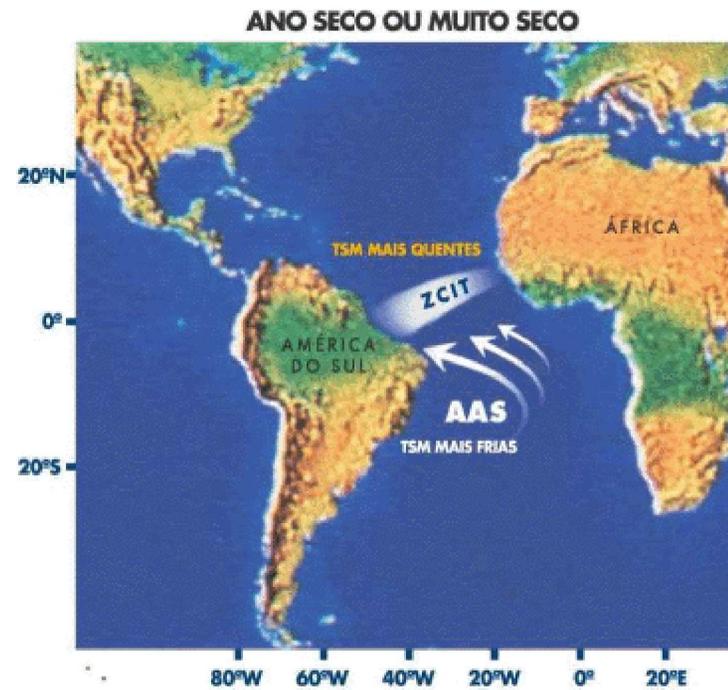
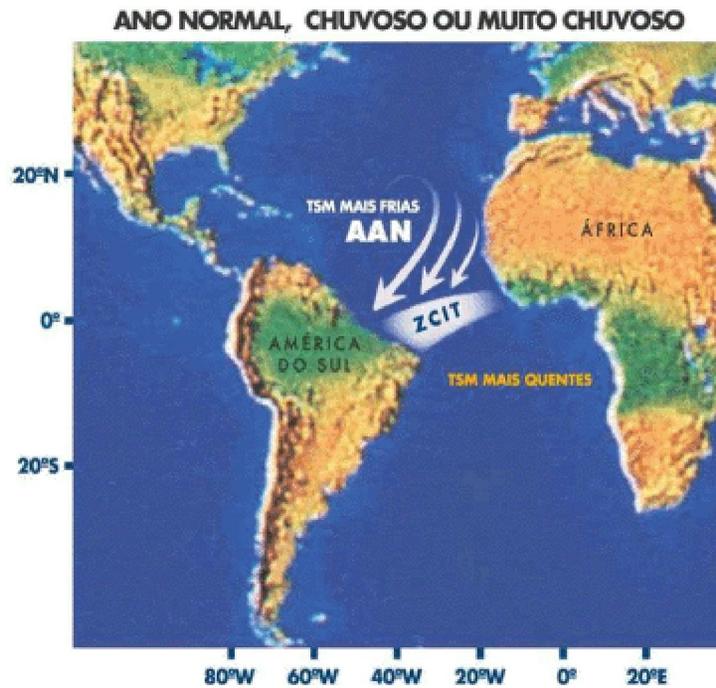
- Levantamento do **perfil completo do vento** em diferentes situações e locais, incluindo o efeito de esteira dos Aerogeradores, para validação dos modelos;



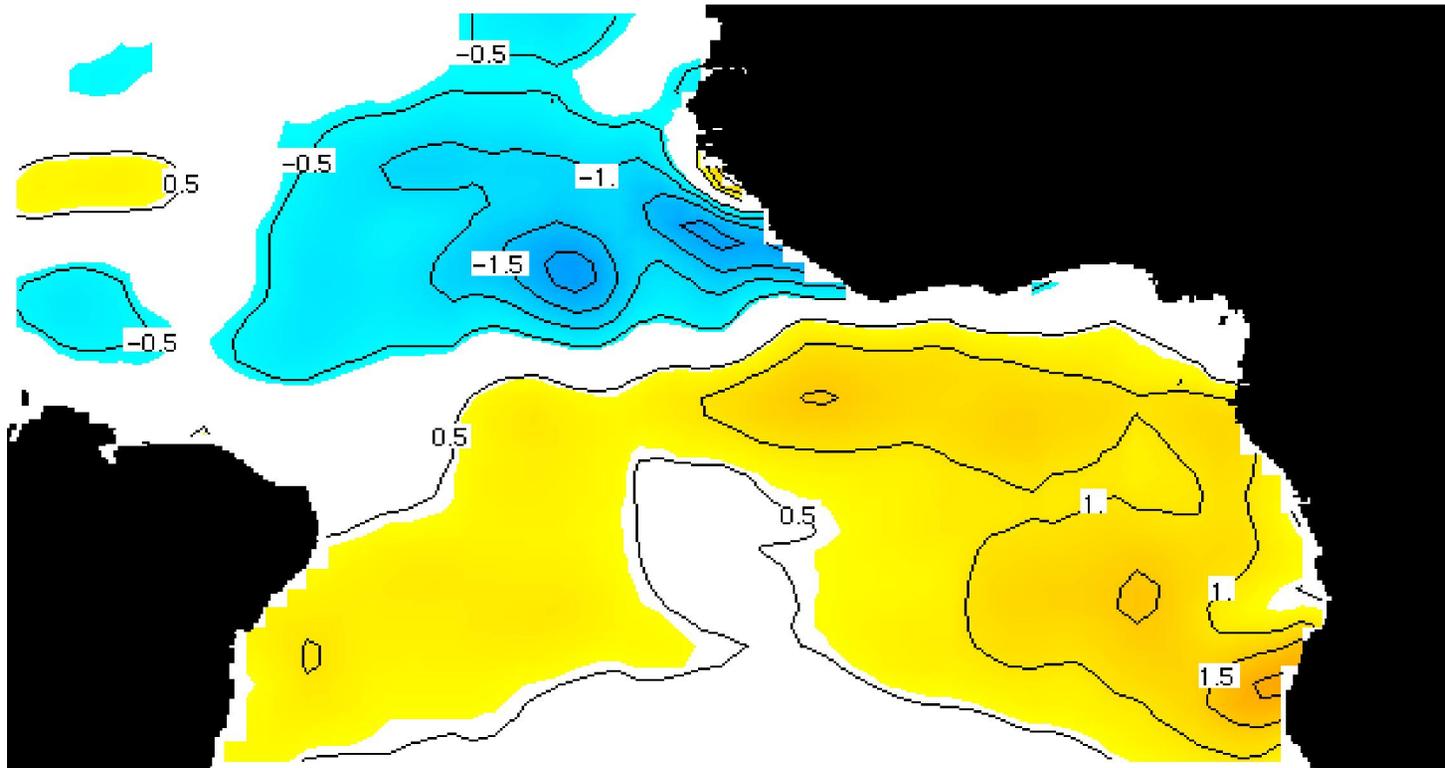
# MEI (Multivariate ENSO Index)



# Dipolo do Atlântico

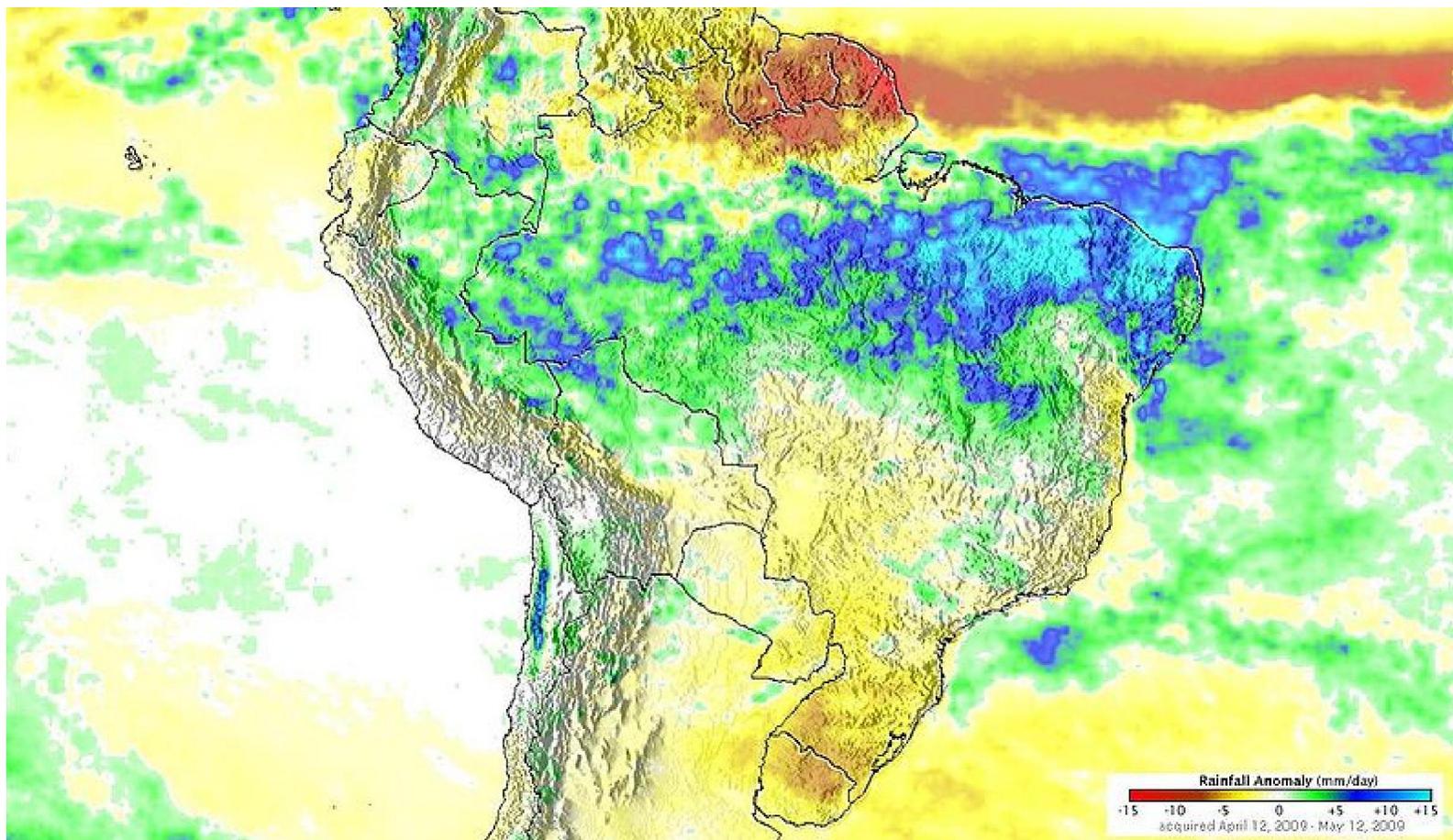


# Dipolo do Atlântico em 2009

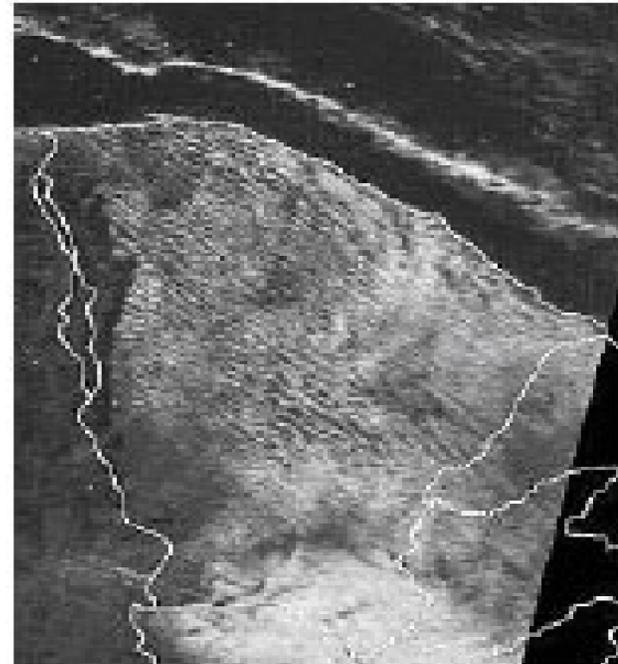
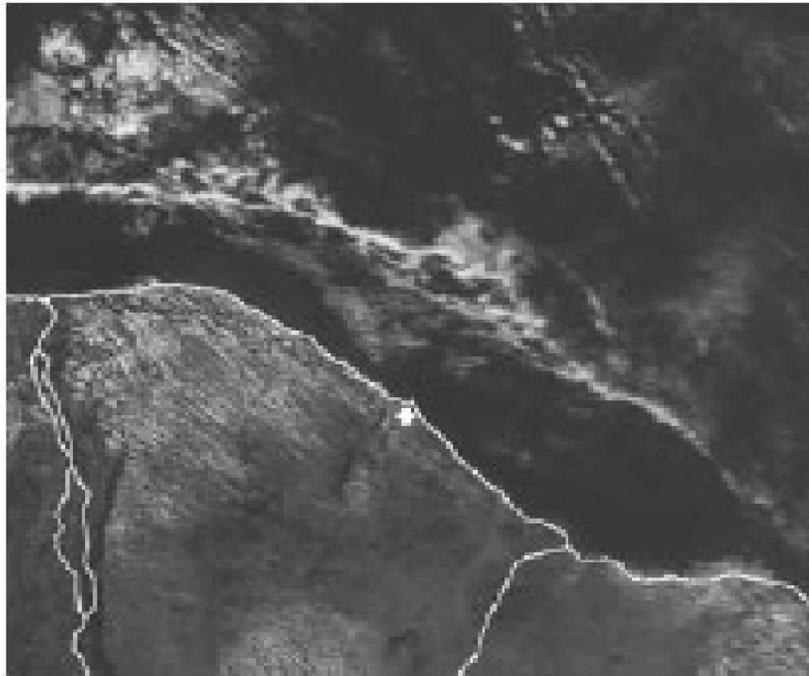


26 Apr 2009 – 2 May 2009

Anomalia de chuva no Brasil entre abril e maio de 2009.

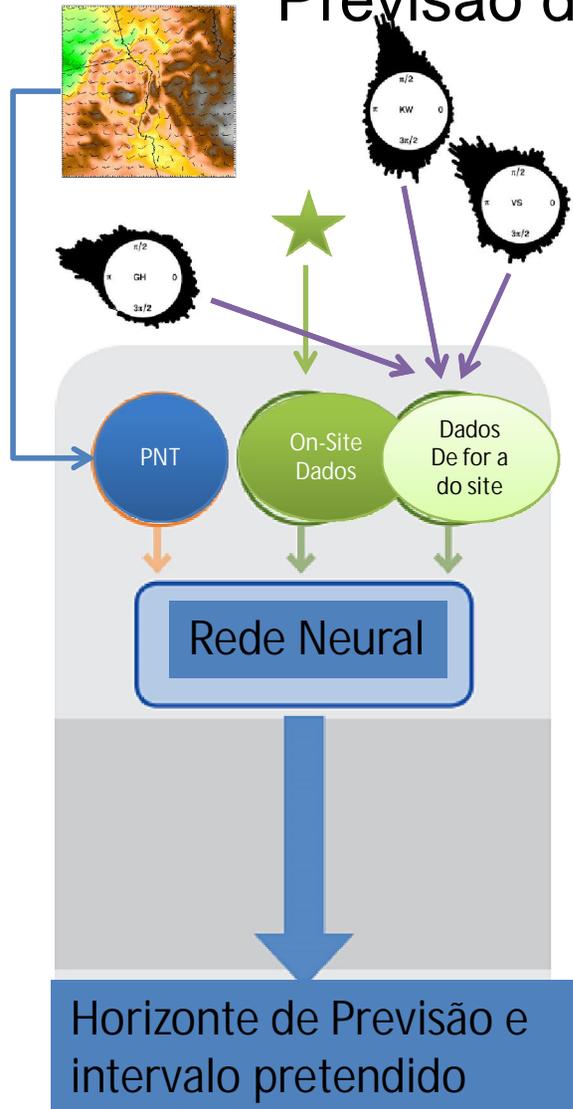


# Brisa –Cloud Streets



· Linhas de nuvens no oceano, associadas à brisa terrestre. Imagens, no visível, do NOAA-17, 11/08/2005, 10:26 h local (à esquerda), e 15/08/2005, 10:35 h local (à direita). A pequena cruz representa Fortaleza. Adaptado de R.B Teixeira RBMET -2008

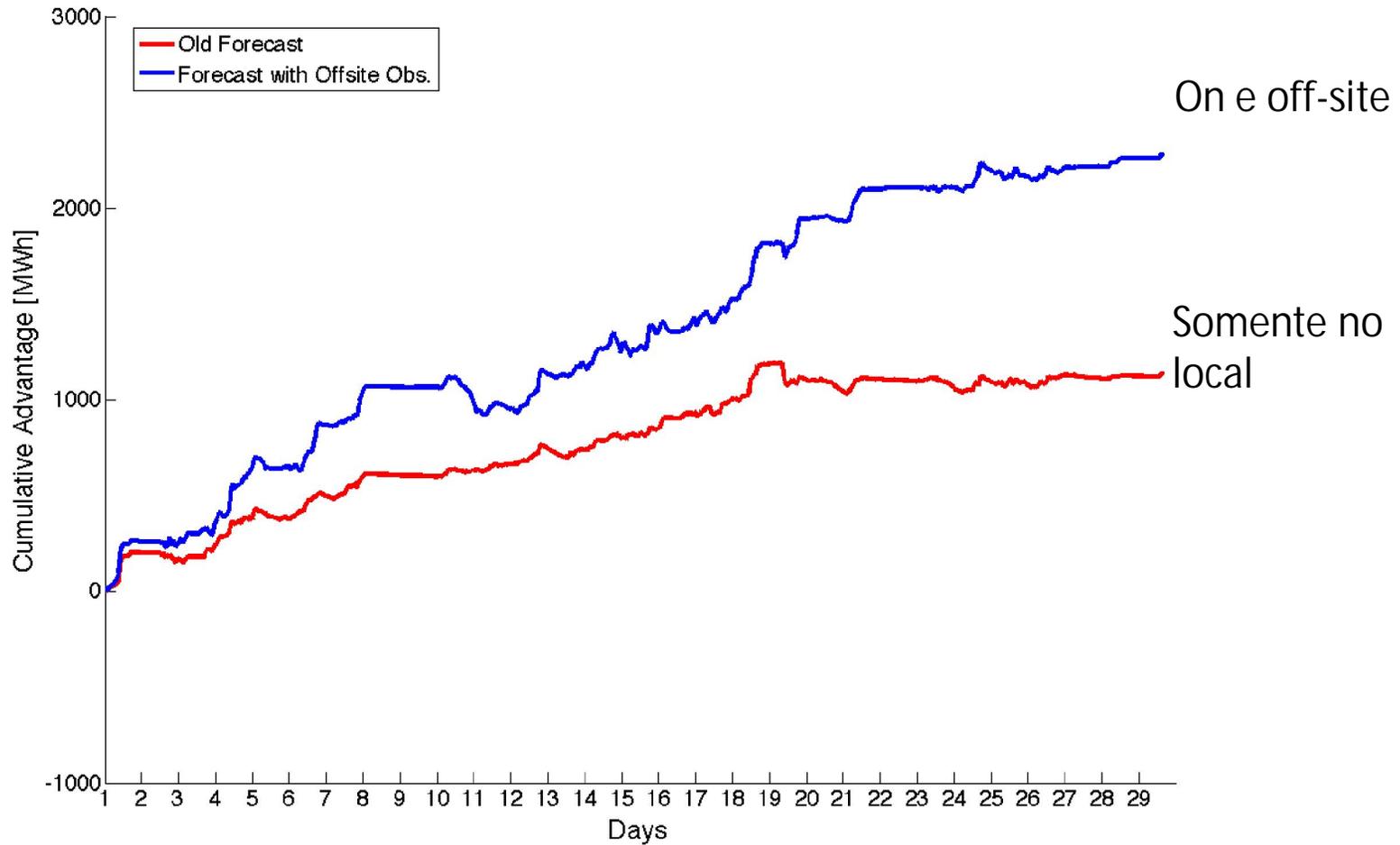
# Previsão de Curto-prazo de Geração Eólica



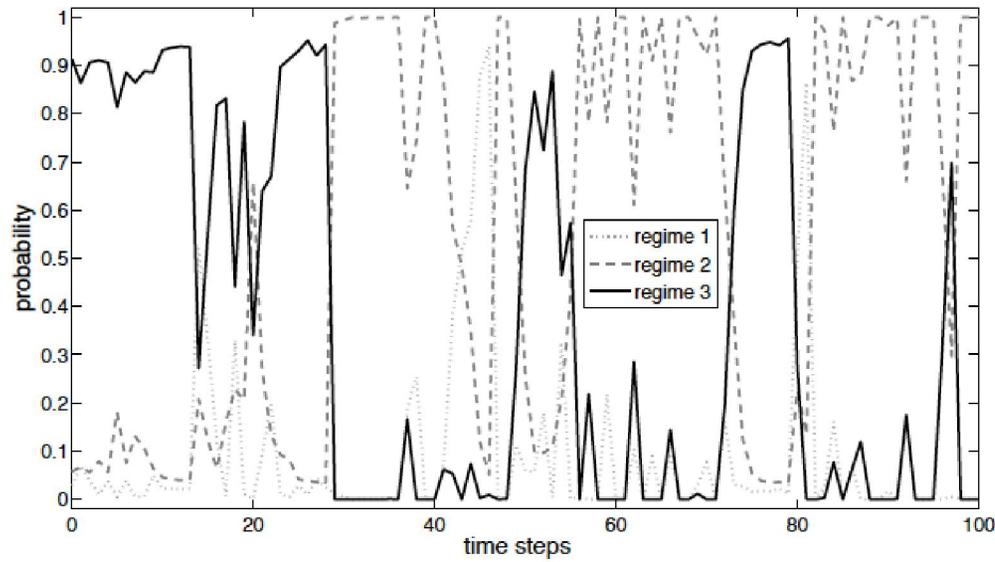
## Técnicas comuns na indústria

- Persistência;
  - Modelos estatísticos autoregressivos e técnicas de aprendizado de Supervisionado
  - Misturas com a saída do modelo PNT curto prazo
  - Seleção preditor-preditando adaptativo para grandes conjuntos de dados de entrada (inclusive fora do local de observações meteorológicas)
  - Diversos modelos (ensemble)
- Treinamento para minimizar os erros a potencia média gerada em intervalos de Previsão (por exemplo, RMSE em períodos de 1 dia, meia hora, etc).

# Previsão a Curto Prazo- Impacto de Medidas extra-site



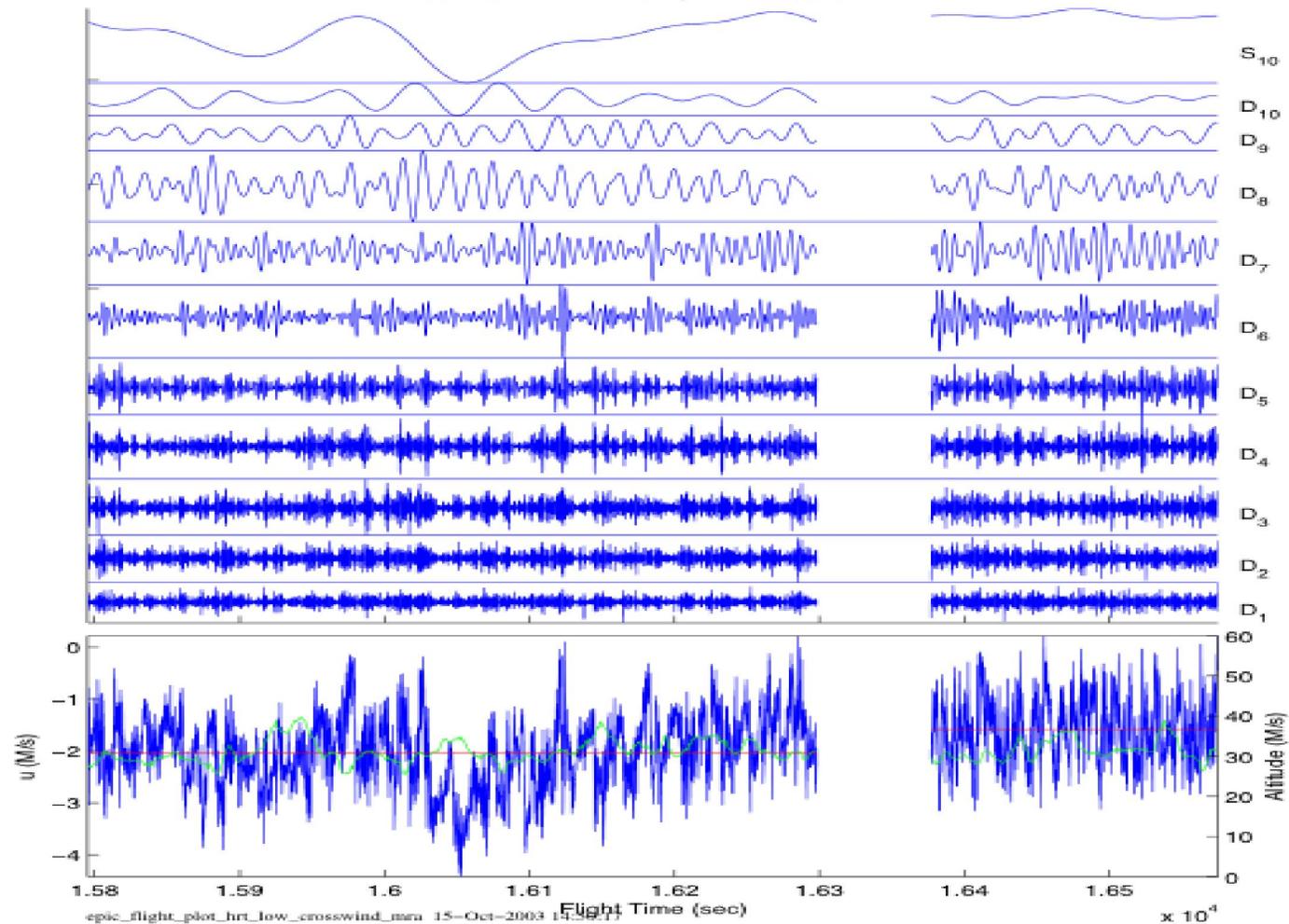
# Uso de Cadeia de Markov para separar Regimes de ventos



Evolução das probabilidades marginais usando um modelo de Markov Auto regressivo (RAEM) estatística para 10 minutos, a um passo à frente de previsão de potencia eólica em Horns Rev (Dinamarca). (Pinson e Madsen, *International Journal of Forecasting*, 2009)

# Uso de Wavelets

EPIC HRT N-S vs E-W Comparison  
MODWT MRA for: u  
Flight: 3 N-S Leg: 32 E-W Leg: 33  
u Mean: N-S: -2.0324, E-W: -1.5898  
Total Mean Wind: N-S: 9.6692, E-W: 8.3603  
Mean Wind Direction: N-S: 167.5748, E-W: 170.3959  
Aircraft Heading: N-S: 159.1316, E-W: 265.6957  
Mean Lat: N-S: 0.73653, E-W: 0.50603



# O que é um previsão numérica do tempo -PNT?

- Técnica que utiliza equações matemáticas, para prever o estado futuro da atmosfera.
- Ex: A equação simplificada do transporte de umidade:

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -\bar{U} \frac{\partial q}{\partial x}$$

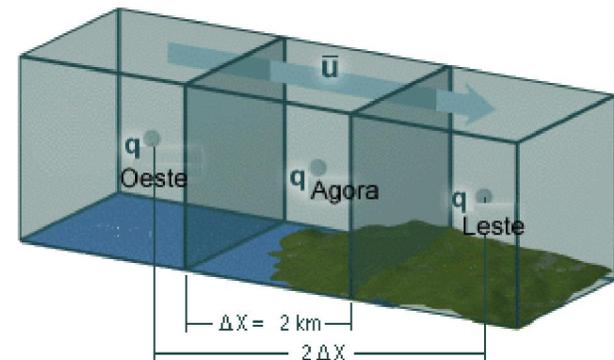
onde  $q$  é a umidade,  $U$  é a velocidade média do vento,  $t$  é o tempo e  $x$  é o espaço.

Em diferenças finitas a equação do transporte de umidade fica:

$$\frac{(q^{t+1} - q^t)_{x,y}}{\Delta t} = -\bar{U} \frac{(q_{x+1,y}^t - q_{x-1,y}^t)}{\Delta x}$$

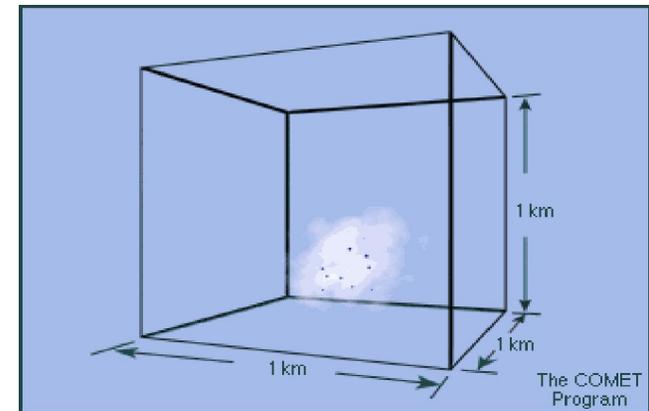
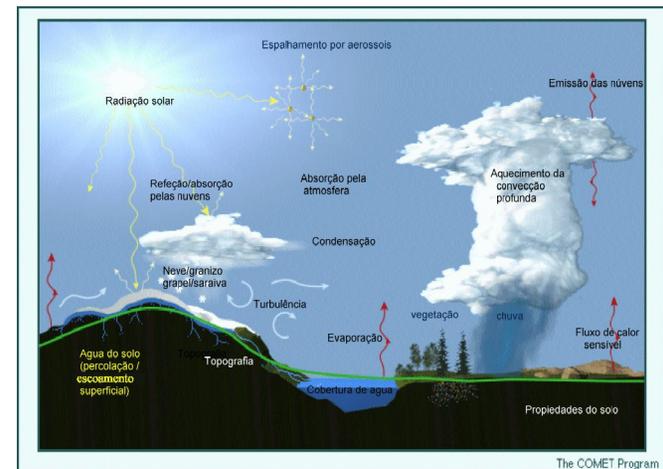
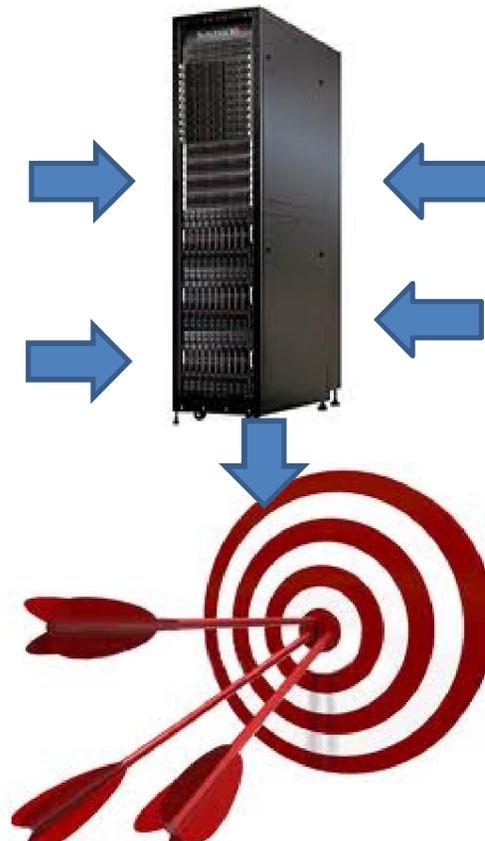
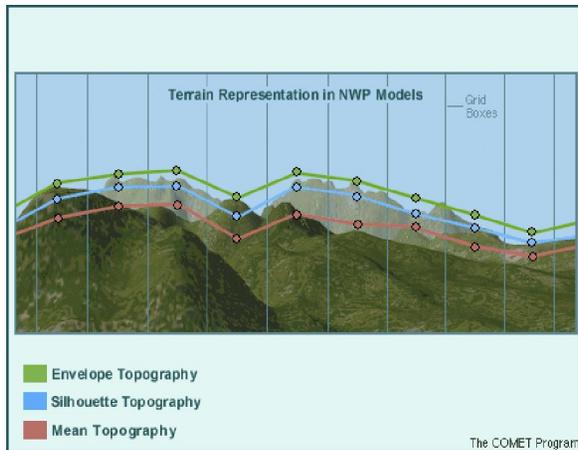
Ou, mas de uma forma mais simples:

$$q^{\text{previsto}} = q^{\text{agora}} - \bar{U} \frac{\Delta t (q_{\text{leste}}^{\text{agora}} - q_{\text{oeste}}^{\text{agora}})}{2\Delta x}$$



# O que é o Modelo PNT

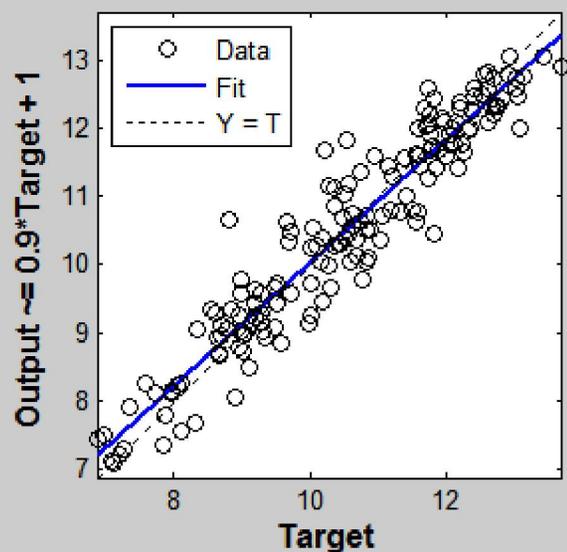
- Modelo de PNT regional desenvolvido na Universidade de Oklahoma para fazer previsão com alta resolução espacial e capaz de prever qualquer fenômenos existente na atmosfera.



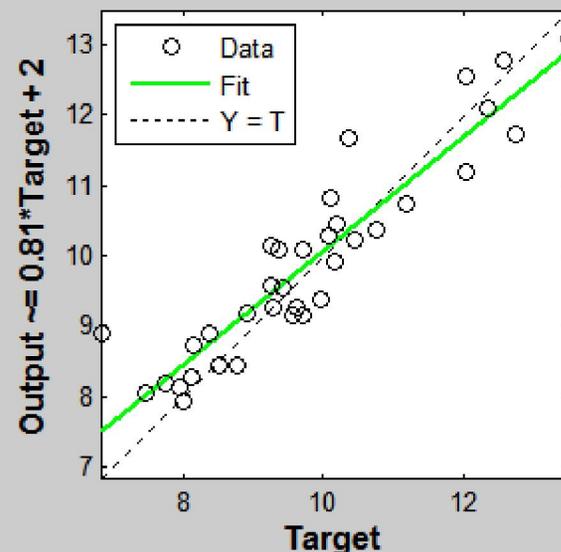
# PNT + Redes Neurais



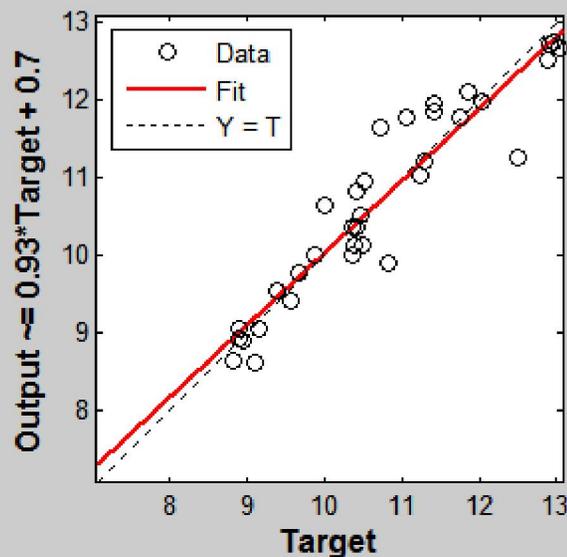
Training: R=0.95203



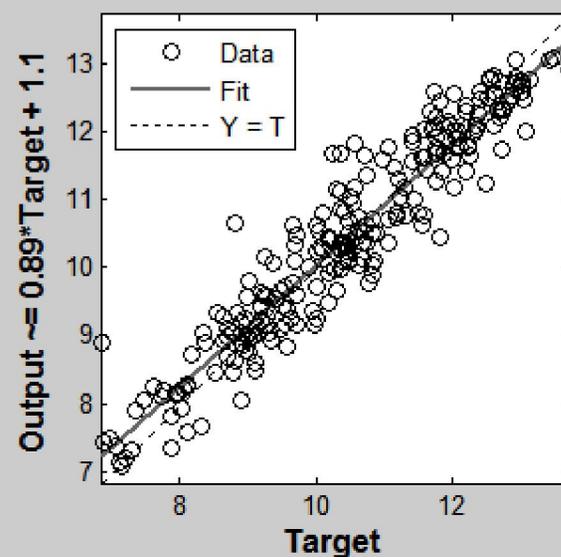
Validation: R=0.92588



Test: R=0.95129

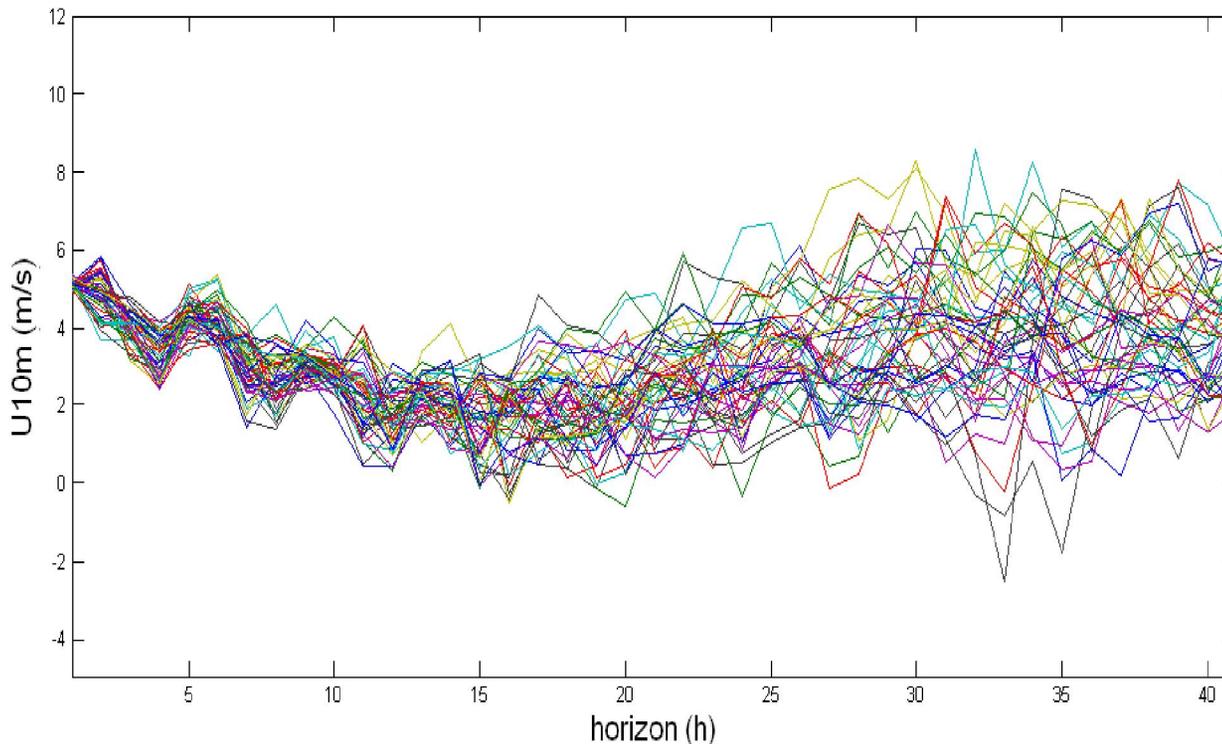


All: R=0.94882



# Correção do Modelo de Previsão

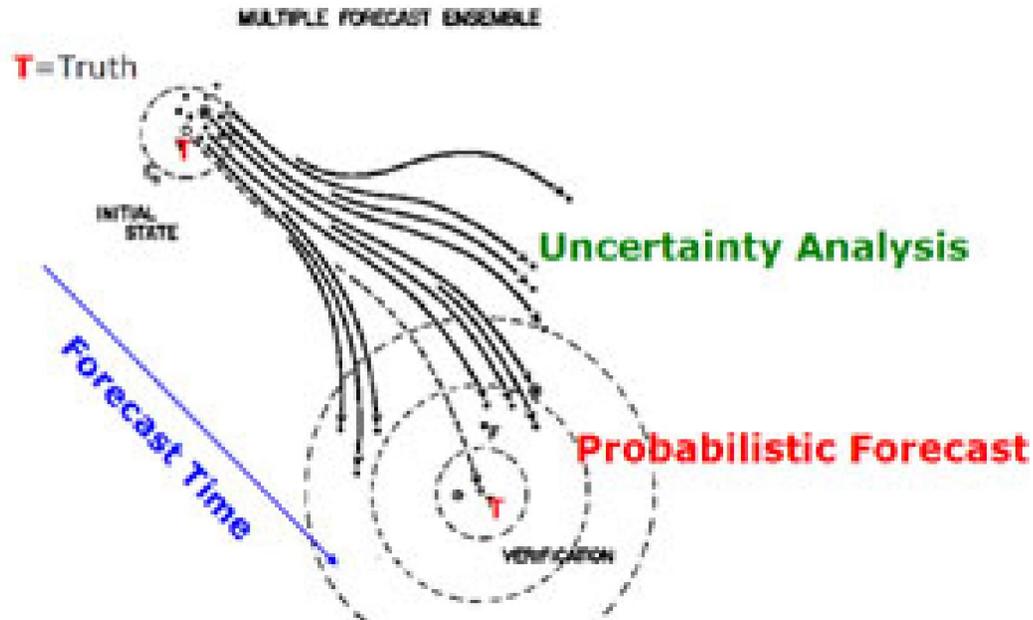
- Utilização de **diferentes modelos físicos** em conjunto com técnicas de ensemble para modelagem do vento;
  - Implementação do Ensemble de Filtro de Kalman (EnskF) na modelagem.



Variação das condições de contorno em diferentes "membros"

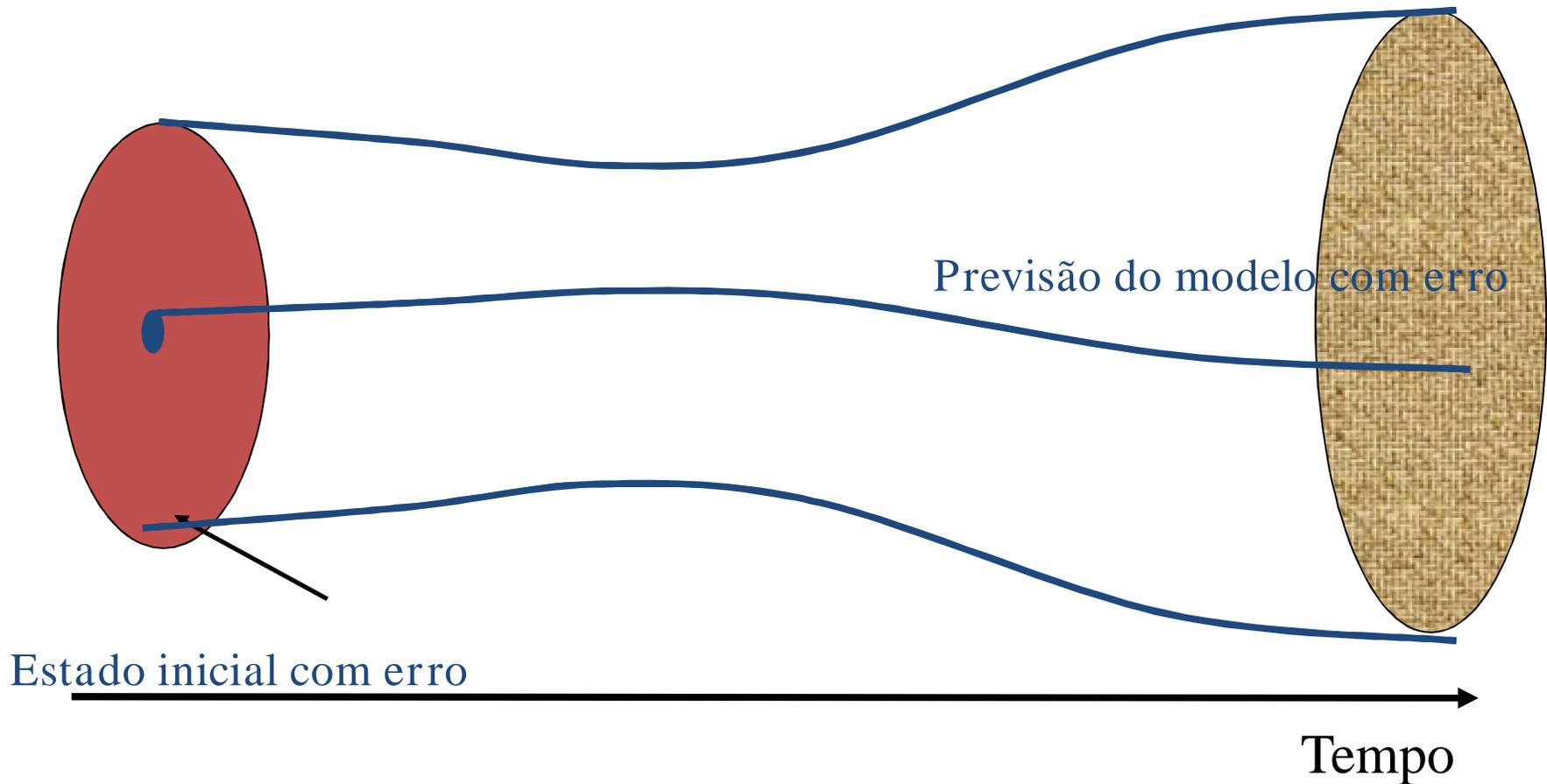
Redução do Erro Quadrático Médio Normalizado (NRMSE)

# Ensamble de Filtro de Kalman no ARPS

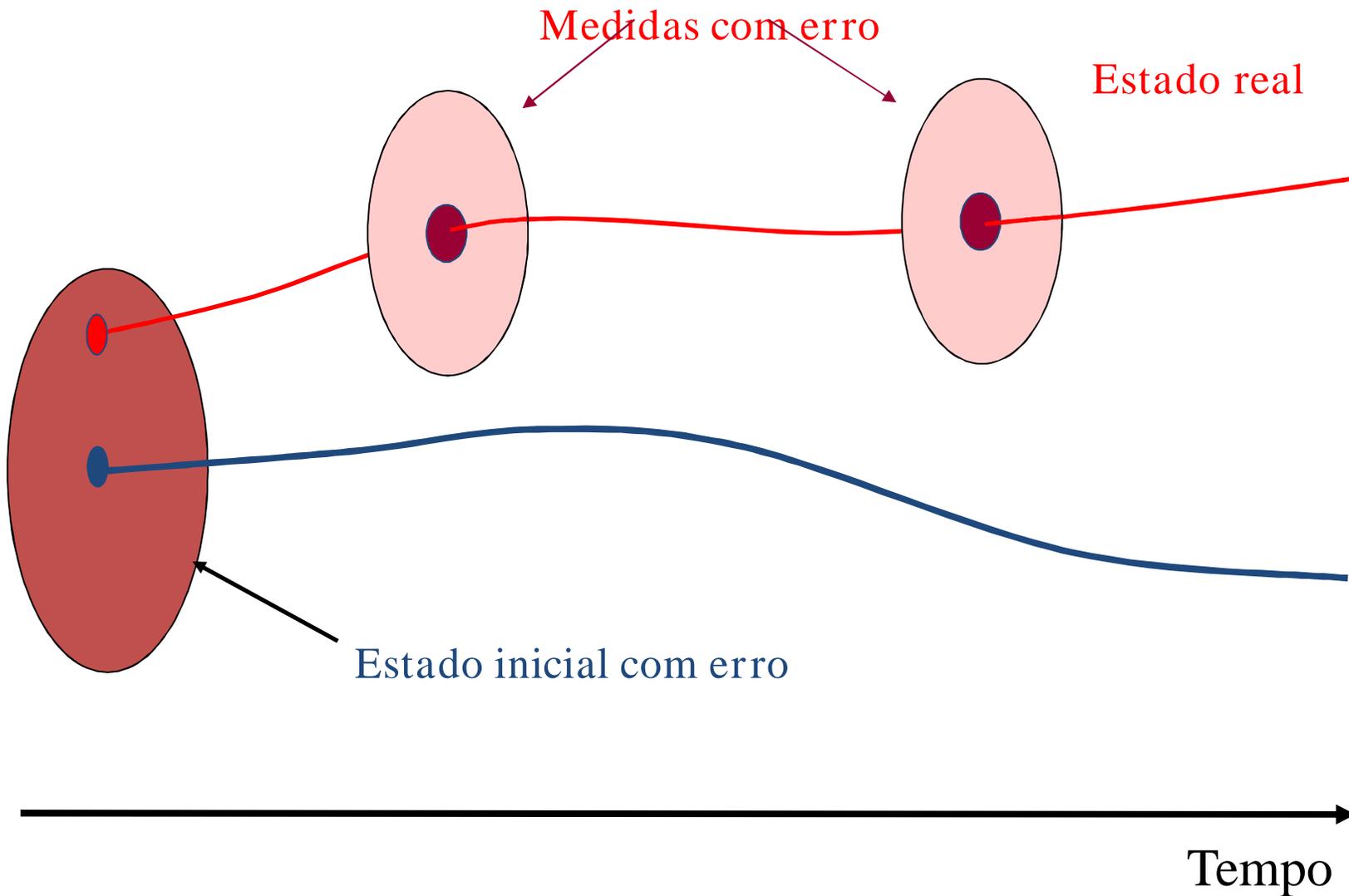


Previsão por Ensemble ou por conjuntos são usadas anali

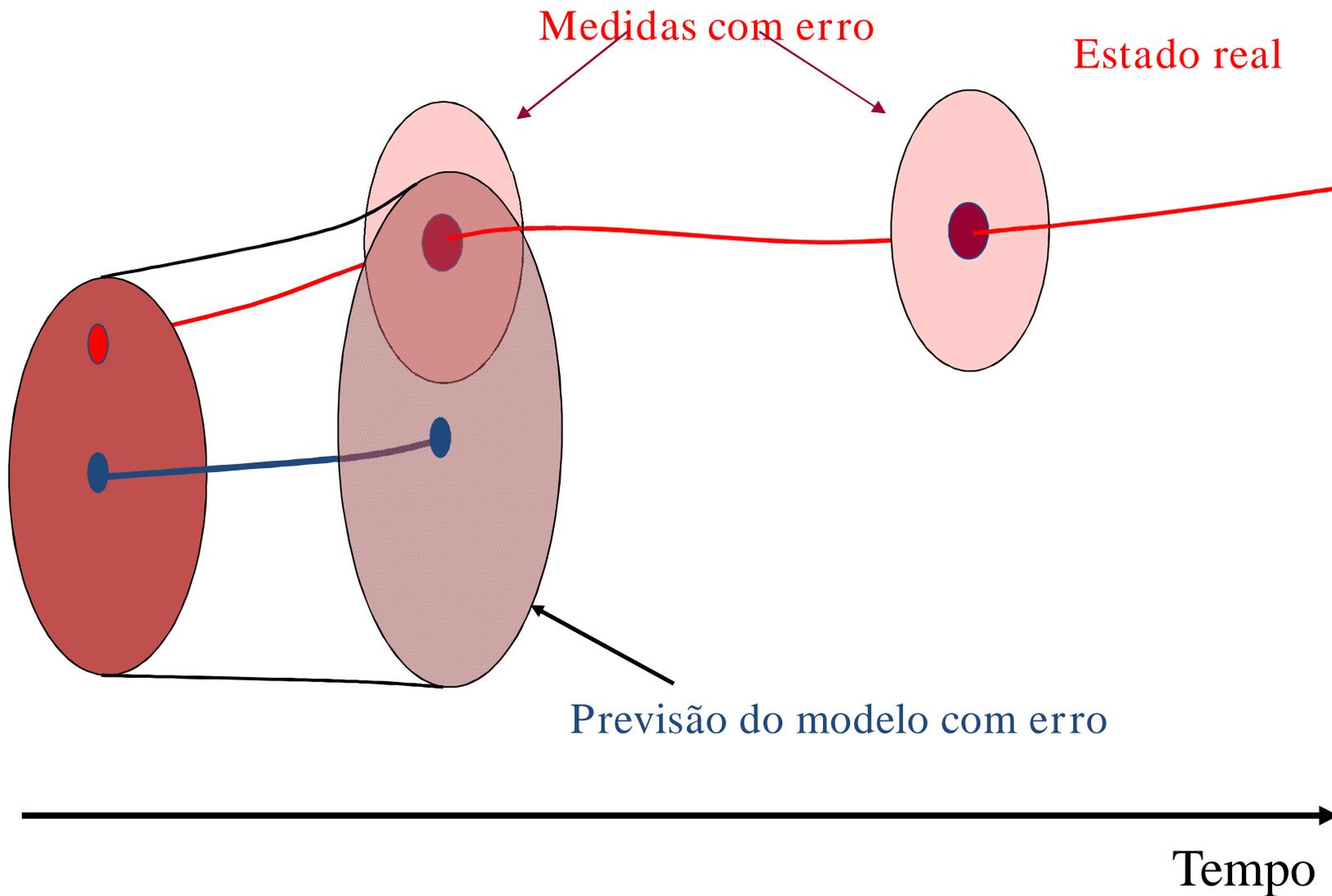
# Esquema do Ensemble de Filtro de Kalman



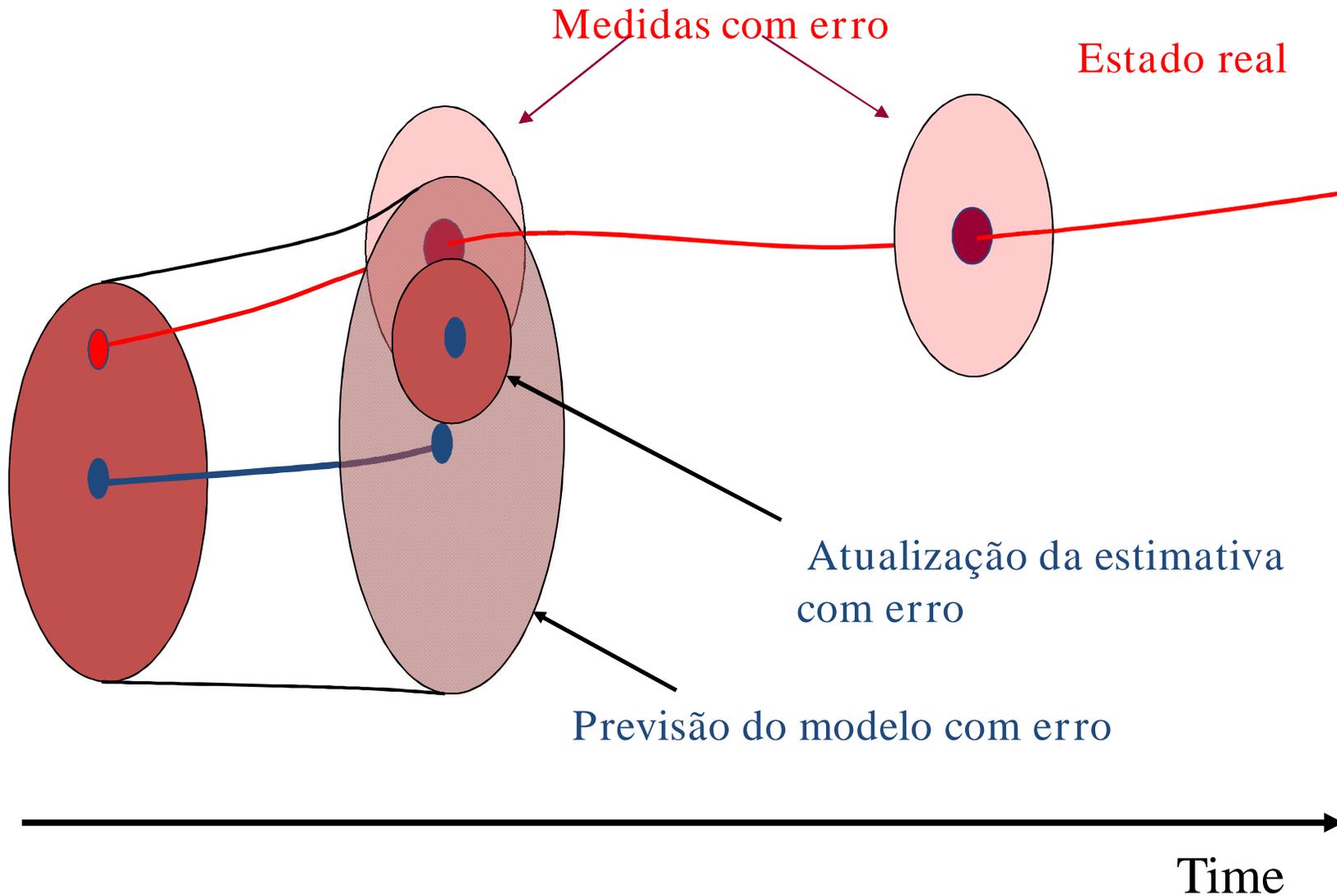
# Esquema do Ensemble de Filtro de Kalman



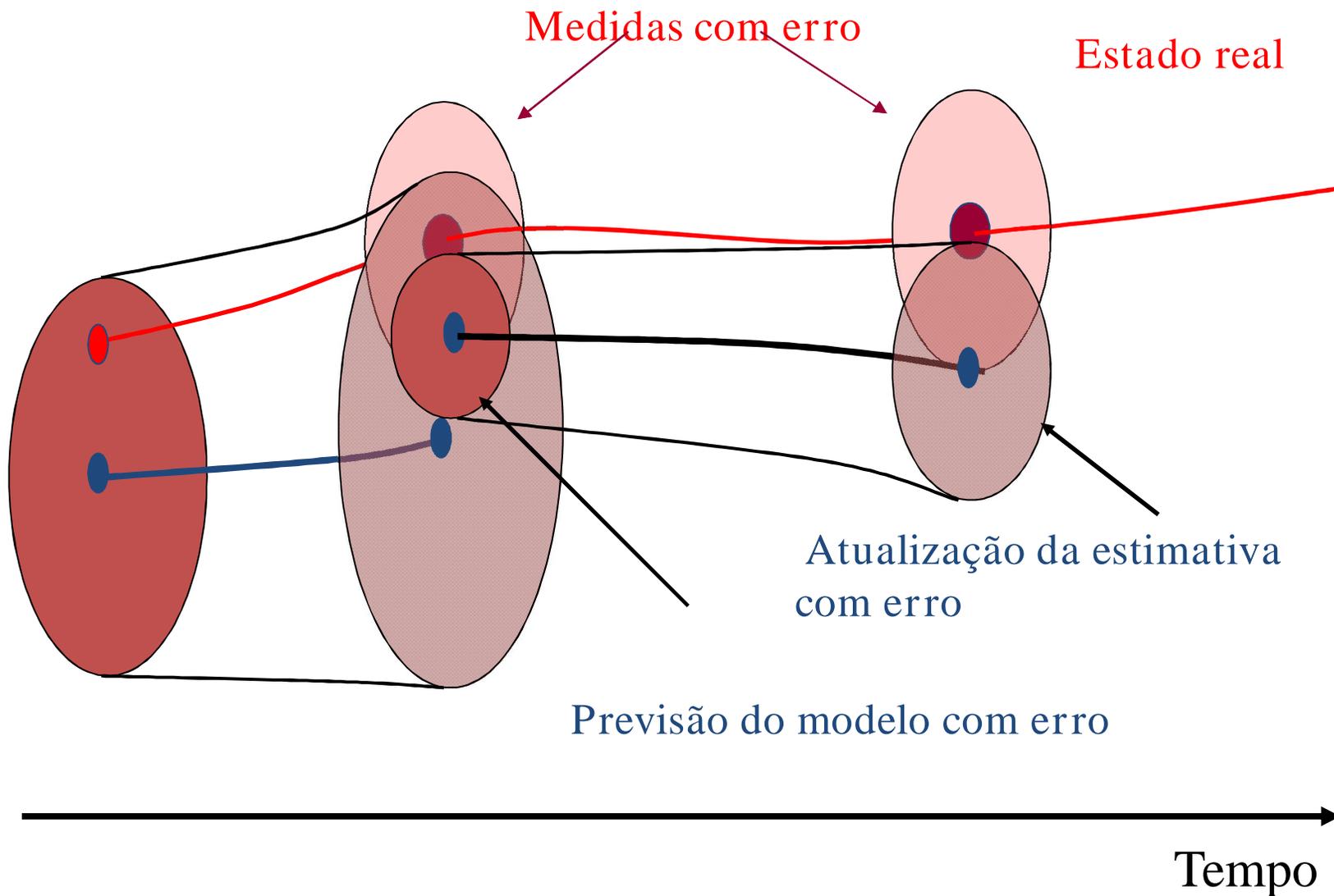
# Esquema do Ensemble de Filtro de Kalman

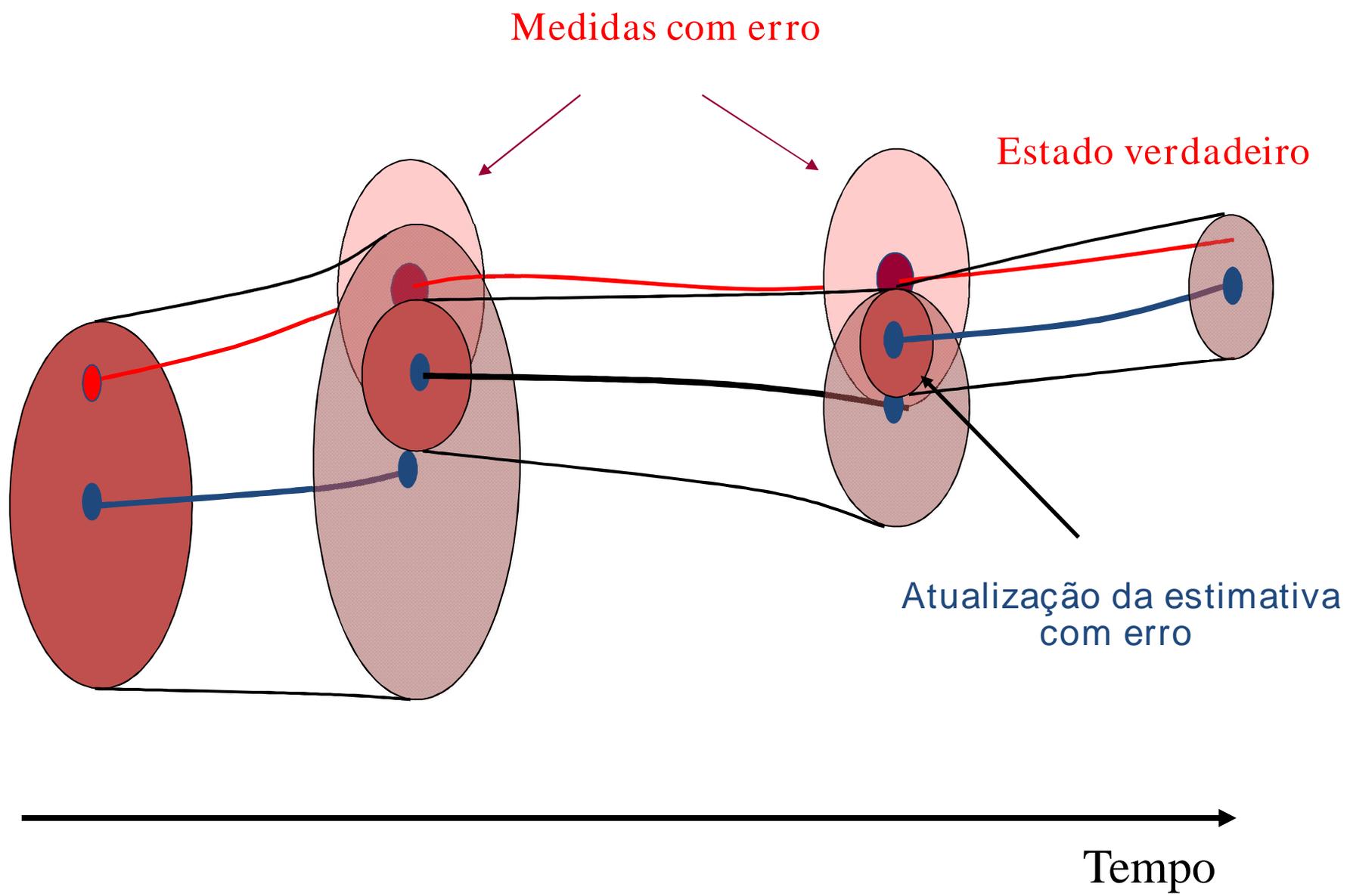


# Esquema do Ensemble de Filtro de Kalman



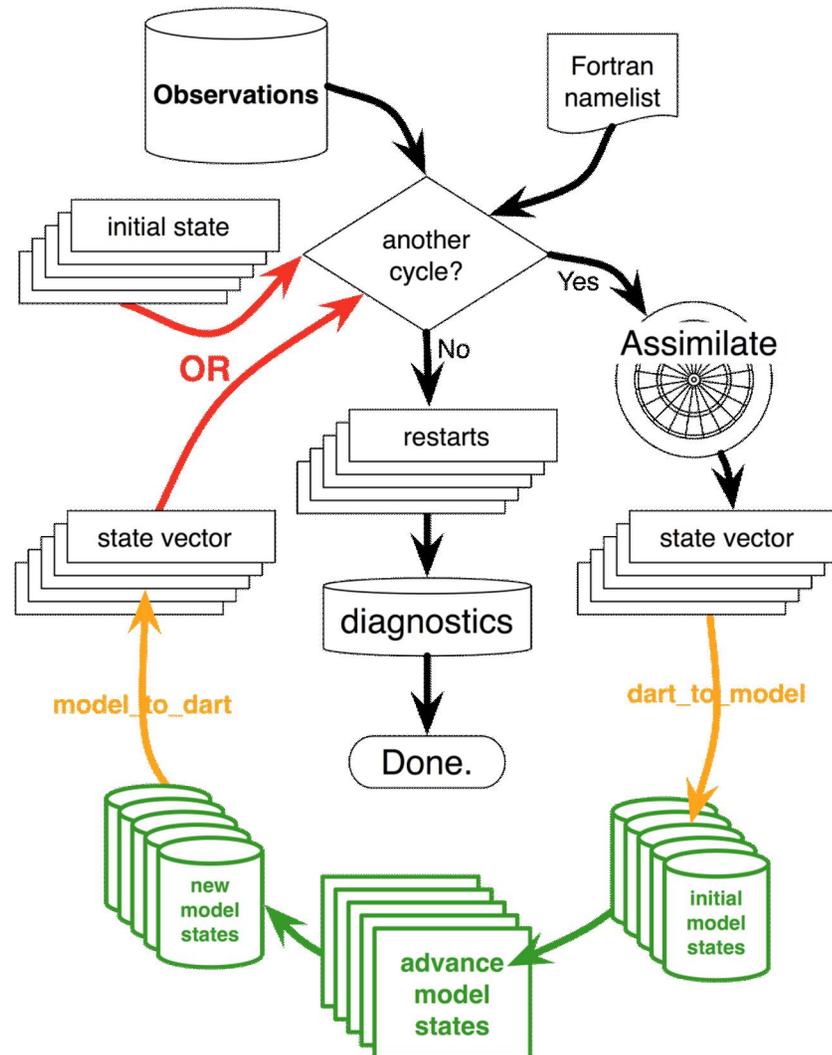
# Esquema do Ensemble de Filtro de Kalman





# Assimilação de Dados

## DART -Data Assimilation Research Section



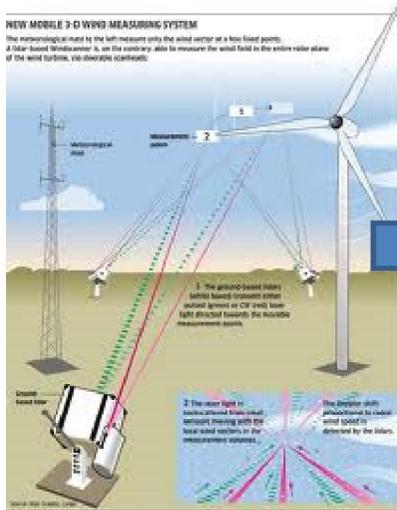
# Ensamble

3 ensemble members advancing in time

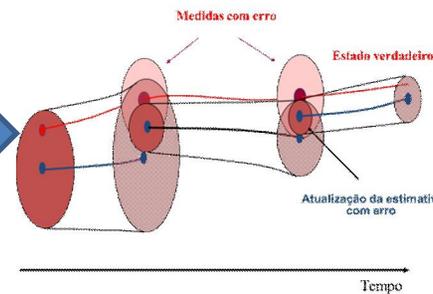


# Esamble de Filtro de Kalman

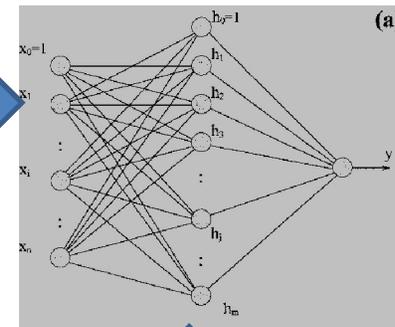
Medidas



Modelagem ARPS/EnsKF



Rede Neural



Previsão de Geração de Energia Elétrica

Produção de Energia Elétrica

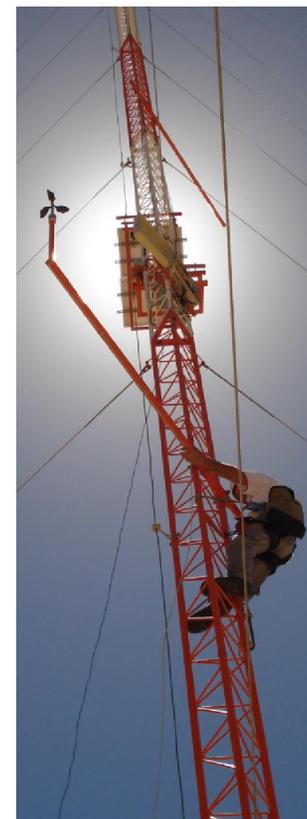


# LEPTEN

*Laboratórios de Engenharia de Processos  
de Conversão e Tecnologia de Energia*



## PROJETO P&D EÓLICA UFSC



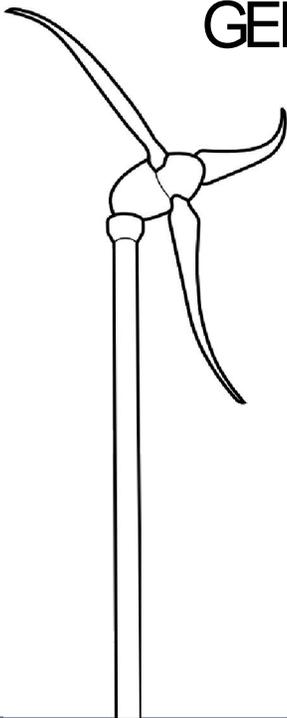
# LEPTEN

Laboratórios de Engenharia de Processos  
de Conversão e Tecnologia de Energia

# Projeto P&D Eólica UFSC

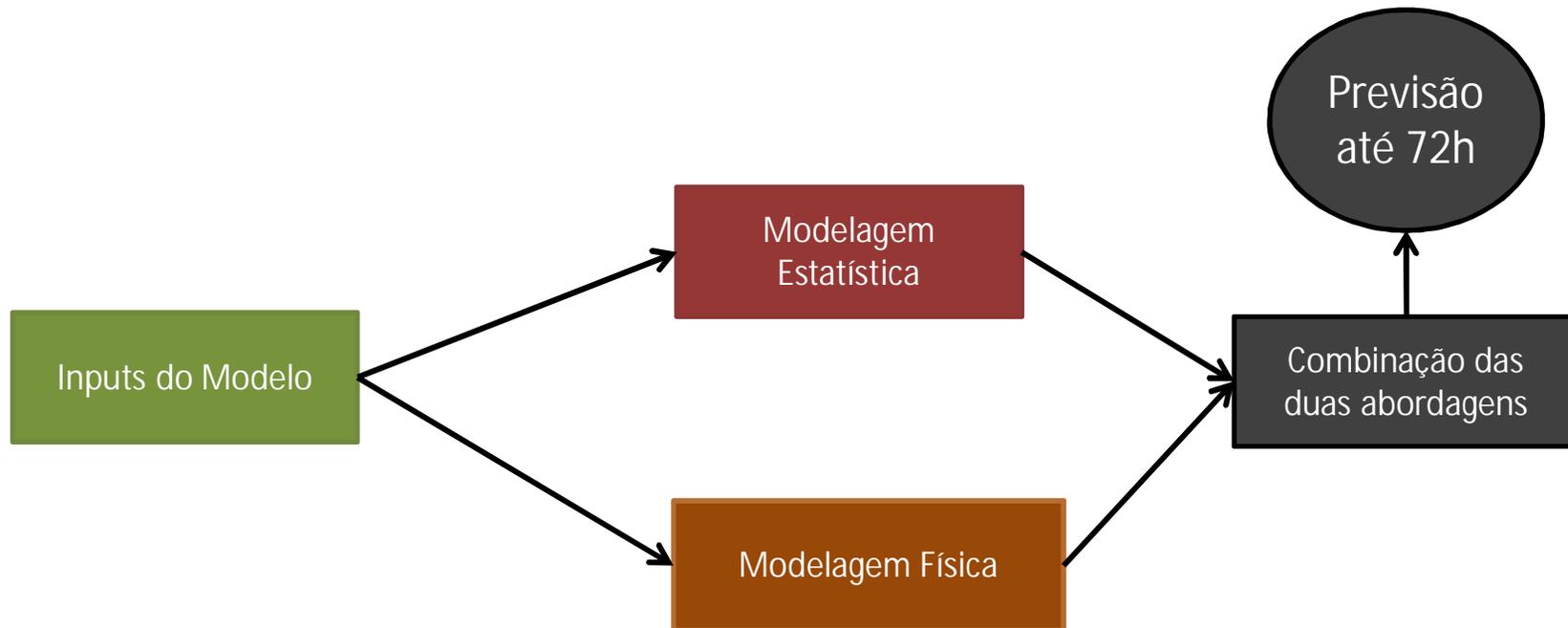
Projeto P&D ANEEL 0403-0020/2011

DESENVOLVIMENTO DE TECNOLOGIAS DE PREVISÃO DE  
GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA PARA PARQUES EÓLICOS  
EM OPERAÇÃO



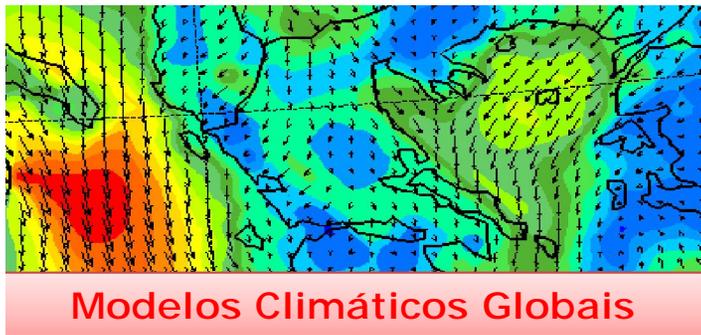
**LEPTEN**  
LABORATÓRIOS DE ENGENHARIA DE PROCESSOS  
DE CONVERSÃO E TECNOLOGIA DE ENERGIA

## Ø Esquema do Software:

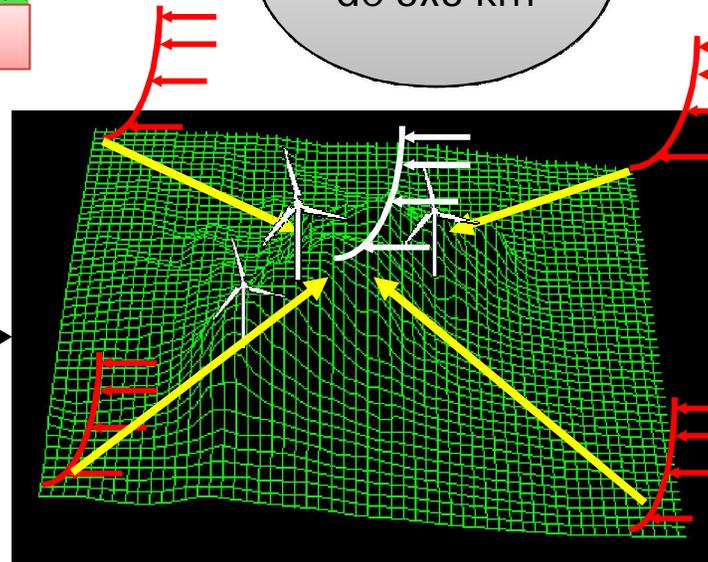
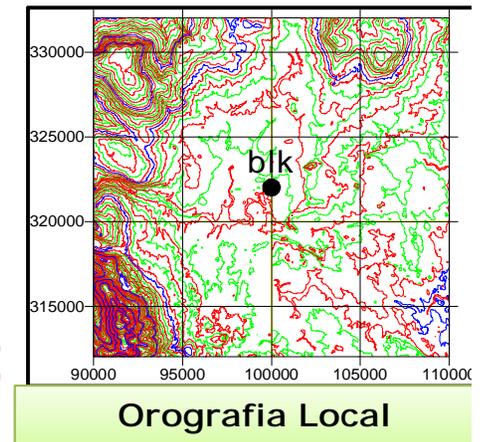


## Projeto P&D Eólica UFSC

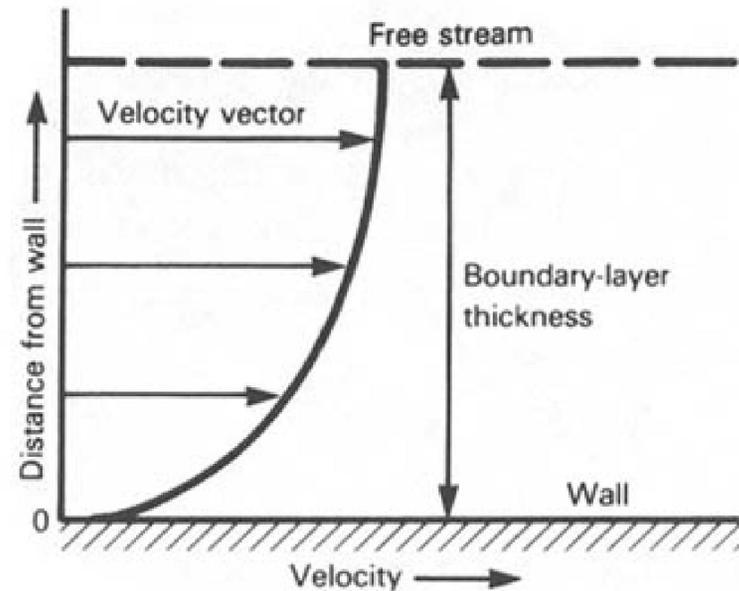
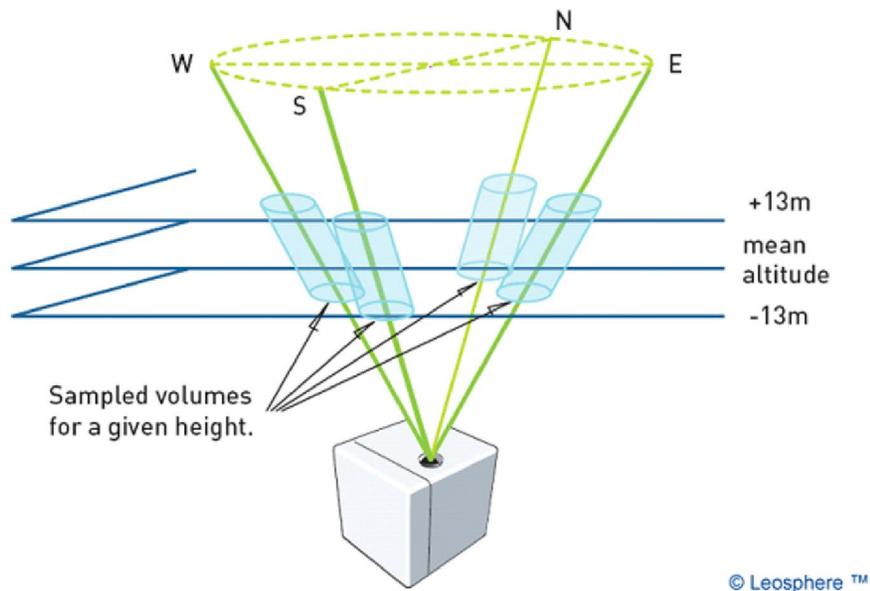
- Modelos Físicos: ARPS e WRF;



Resolução  
de 3x3 km



- Perfilador de Velocidades: LiDAR (Windcube® V8);



## Projeto P&D Eólica UFSC

- Perfilador de Velocidades: LiDAR (Windcube® V8);



# LEPTEN

Laboratórios de Engenharia de Processos  
de Conversão e Tecnologia de Energia

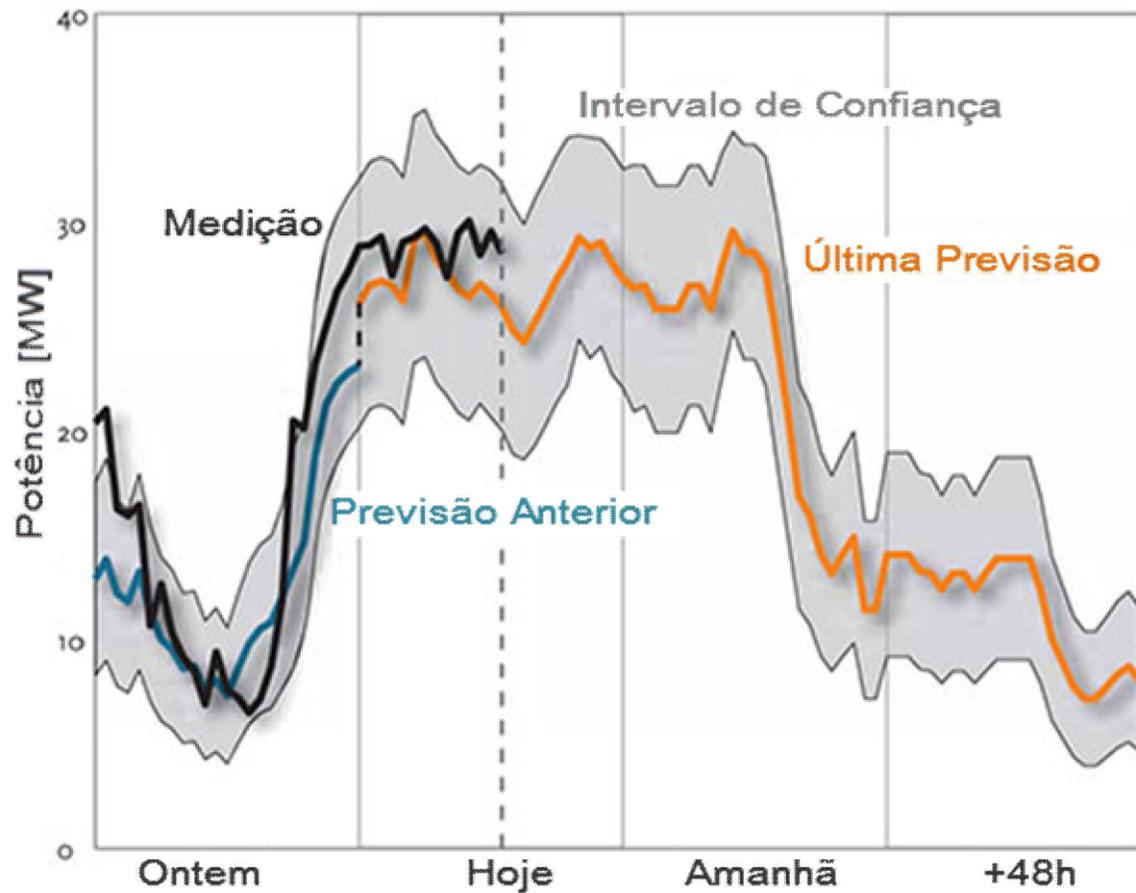
## Projeto P&D Eólica UFSC

- **Estudo de Caso:** Parques Eólicos com Torres Anemométricas 100m;



## Projeto P&D Eólica UFSC

- Esquema da Previsão de Geração:



# LEPTEN

Laboratórios de Engenharia de Processos  
de Conversão e Tecnologia de Energia



## Frederico de Freitas Taves

Tractebel Energia S.A.  
[fredericoft@tle.com.br](mailto:fredericoft@tle.com.br)

## Pedro Alvim de Azevedo Santos

Engenheiro Mecânico  
Pesquisador LEPTEN/UFSC  
[pedroasantos@lepten.ufsc.br](mailto:pedroasantos@lepten.ufsc.br)



# LEPTEN

*Laboratórios de Engenharia de Processos  
de Conversão e Tecnologia de Energia*



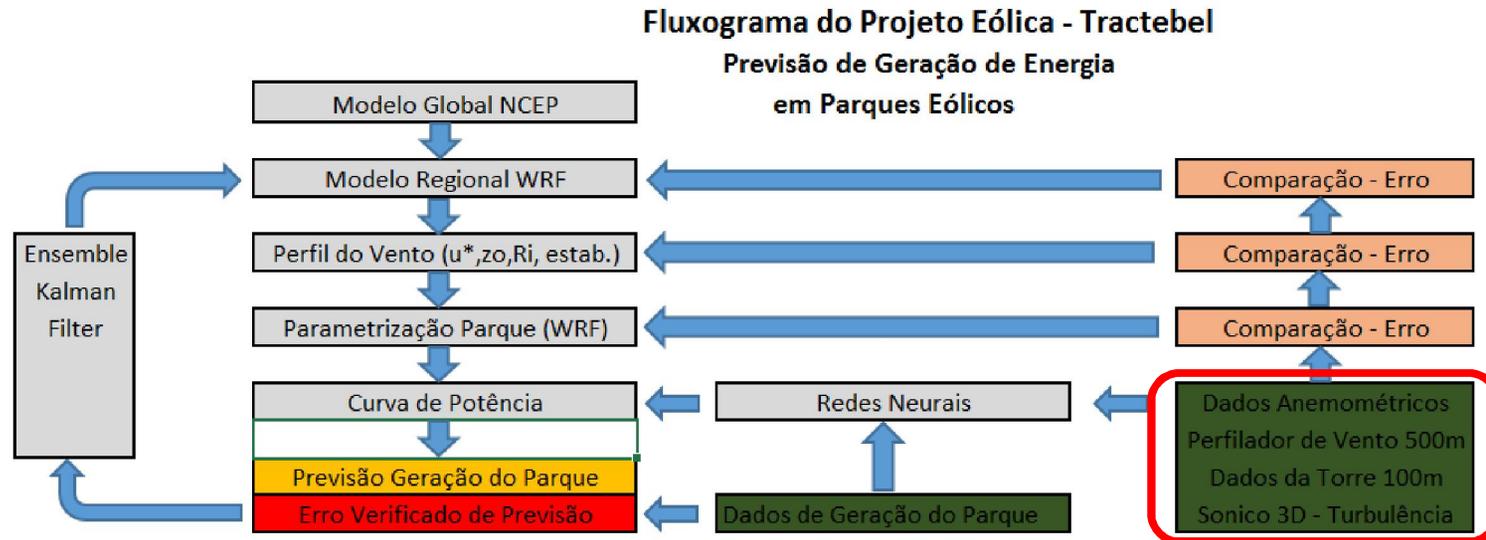
UNIVERSIDADE FEDERAL  
DE SANTA CATARINA

**Tractebel Energia**  
GDF SVEZ

## Seminário Projeto Eólica: Resultados Preliminares

Local: Florianópolis, SC  
Data: Outubro de 2013  
Por: Yoshi

## Visão Geral – Previsão de Geração de Energia em Parques Eólicos



## Dados Observados – Consistência e Verificação

- **02 Torres de 100m (10min)**
  - 05 níveis de velocidade do vento (100,80,60,40,10m)
  - 02 níveis de direção do vento (98,78m)
  - 02 níveis de temperatura e umidade do ar (100,40m)
  - 01 barômetro (13m)
  - 01 anemômetro sônico (100m) 20Hz
- **01 Perfilador Lidar (500m, 10min) – Pedra do Sal**
  - 26 níveis de velocidade, direção do vento
- **02 Parques Eólicos**
  - 20 aerogeradores (Pedra do Sal)
  - 32 aerogeradores (Beberibe)
- **01 Cluster Computacional**
  - Modelo regional WRF e ARPS (5x5km, 10min)

Matriz 999  
(Número de dados  
da timestamp no  
período X 45 ou 63  
colunas)

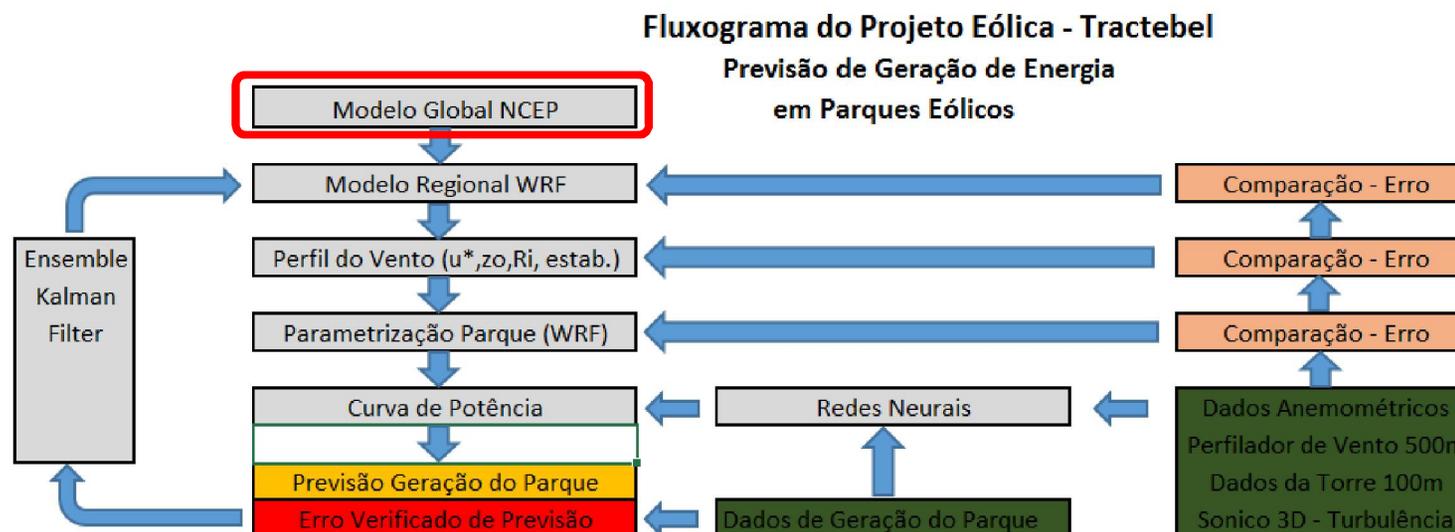
Flag 1 (Suspect) –  
Variabilidade a Curto  
Prazo

Flag 2 (Warning) –  
Climatologia

Flag 3 (Failure) –  
Limites Físicos

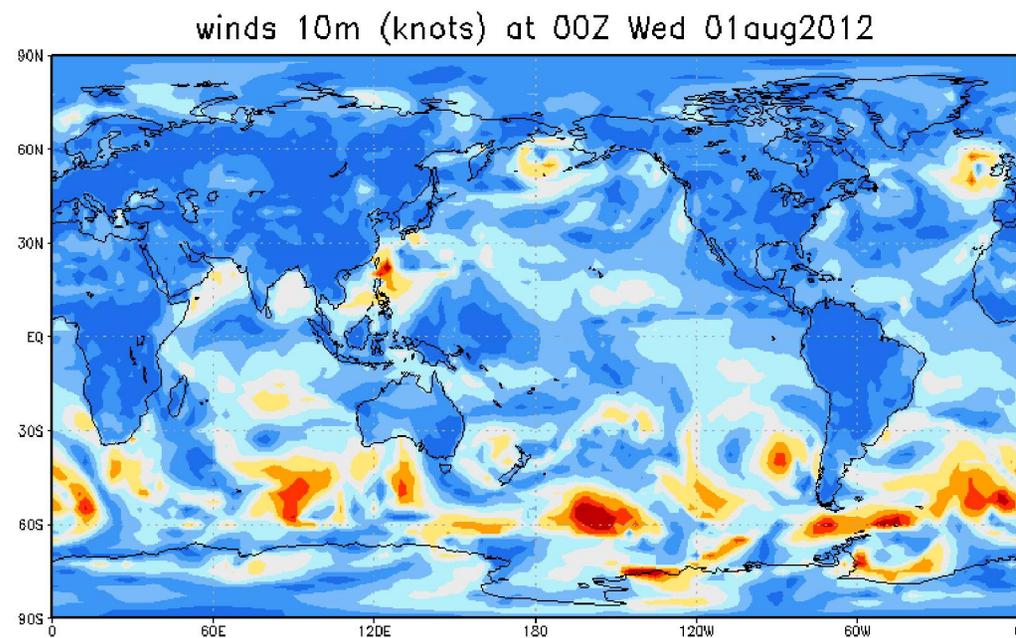
Flag 0 (Good) –  
Passou por todos os  
testes

## Visão Geral – Previsão de Geração de Energia em Parques Eólicos



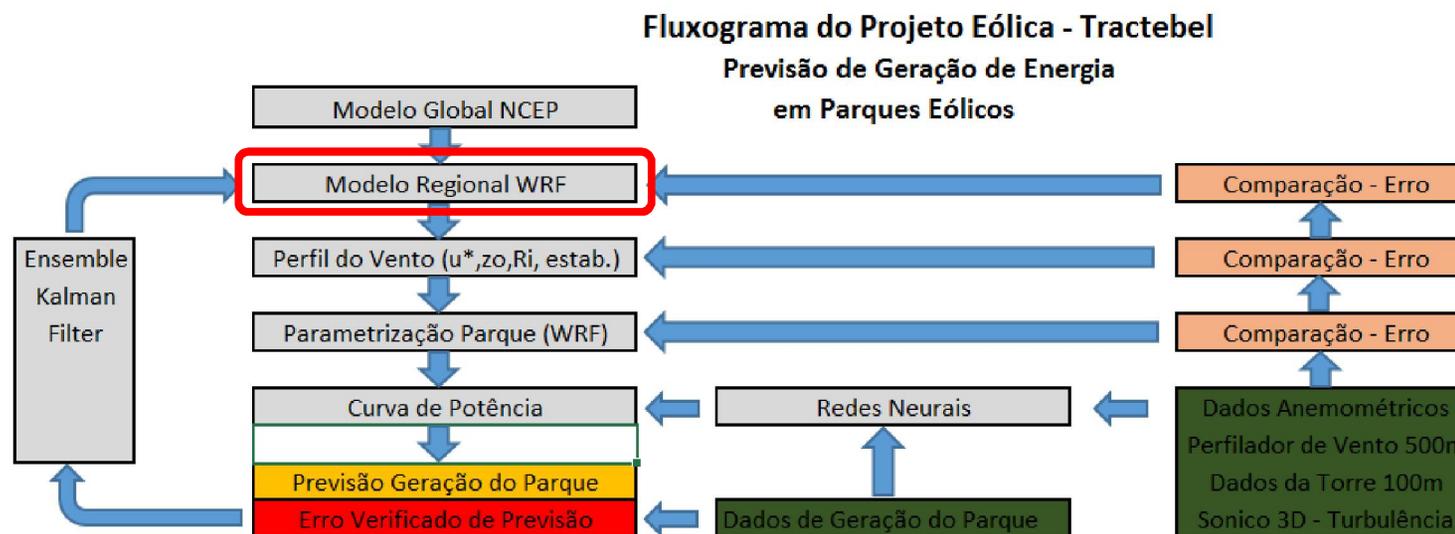
## Modelo Global – GFS (Global Forecast System)

- Dados de 6h em 6h
- 0.5 grau de resolução
- Formato grib2
- NCEP (National Centers for Environmental Prediction)



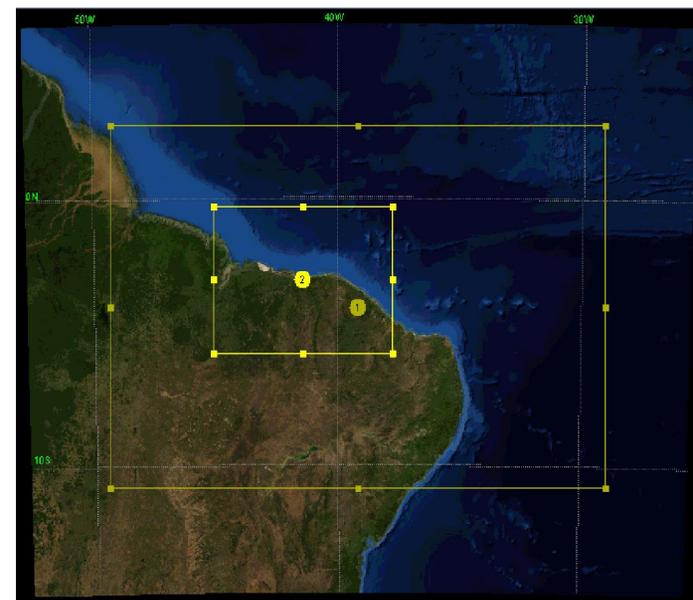
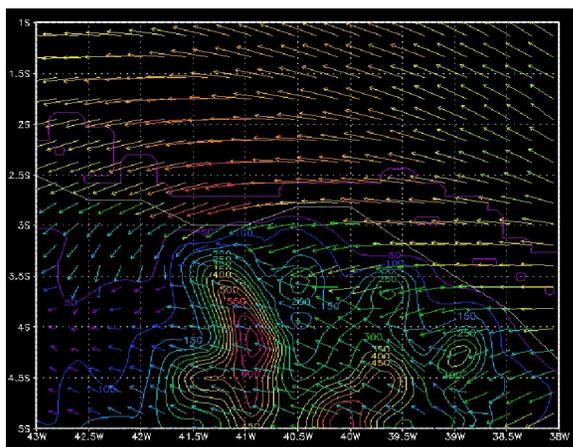
Fonte: NCEP (<http://www.nco.ncep.noaa.gov/pmb/products/gfs/>)

## Visão Geral – Previsão de Geração de Energia em Parques Eólicos



## Modelo Regional – WRF-ARW (Weather Research and Forecast)

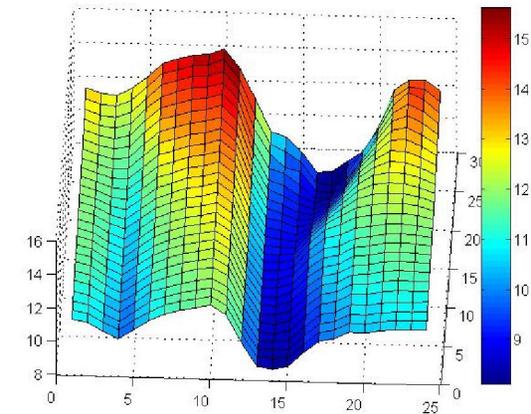
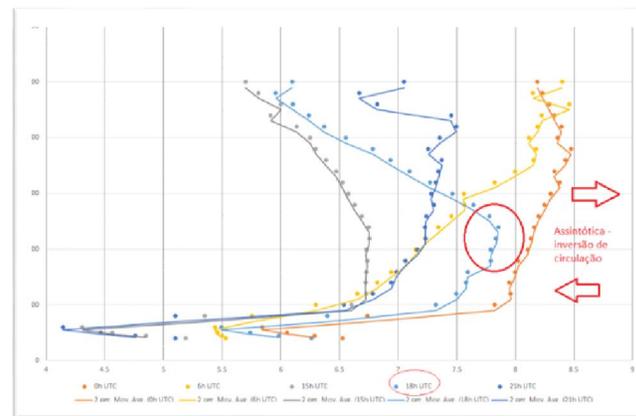
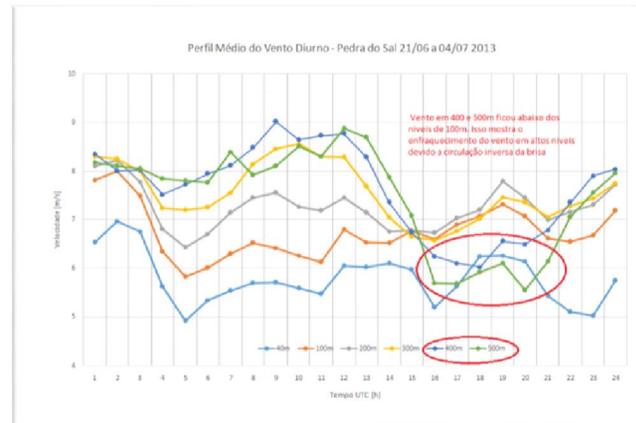
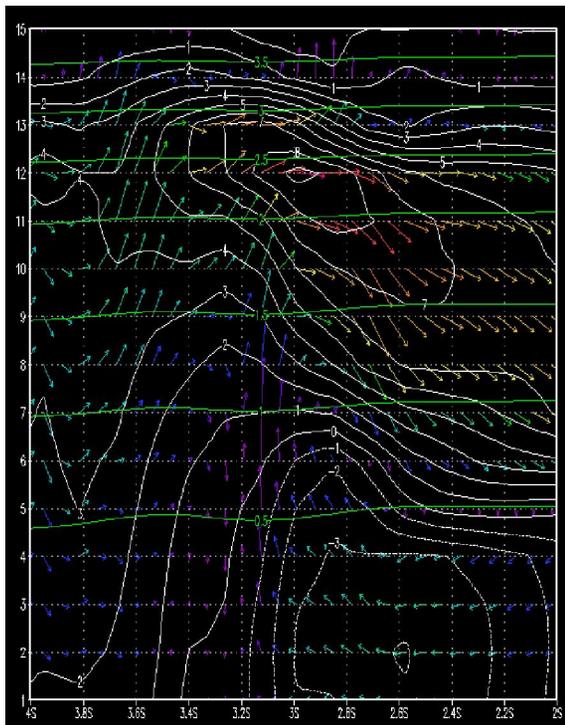
- Regionalização: 2 nesting
- Resolução temporal: 10min
- Resolução espacial: 3km
- Circulações Locais (brisa marítima)
- Influência da Topografia (meso escala)



Fonte: NCAR/NCEP (<http://www.wrf-model.org/>)  
Skamarock (2008)

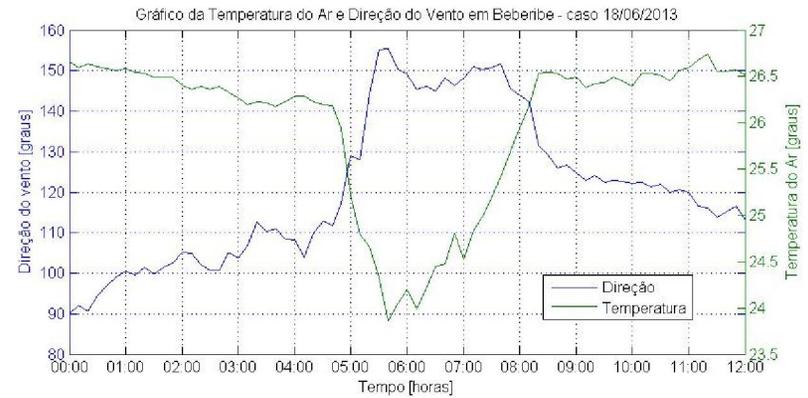
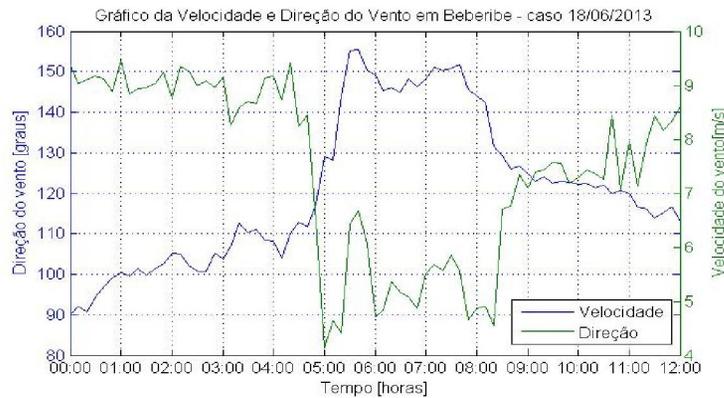
## Modelo Regional – WRF vs. LIDAR

- Circulação de brisa
- Perfil diário em Pedra do Sal
- Resultados do Lidar



## Modelo Regional – WRF Limitações

- Condições Costeiras
- Gradiente de temperatura (solo-agua)



$$\frac{d\vec{V}}{dt} + k\vec{V} = (\bar{T}_a - \bar{T}_b) \frac{R}{L} \ln \frac{p_0}{p_1};$$

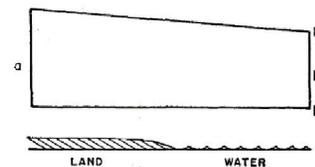
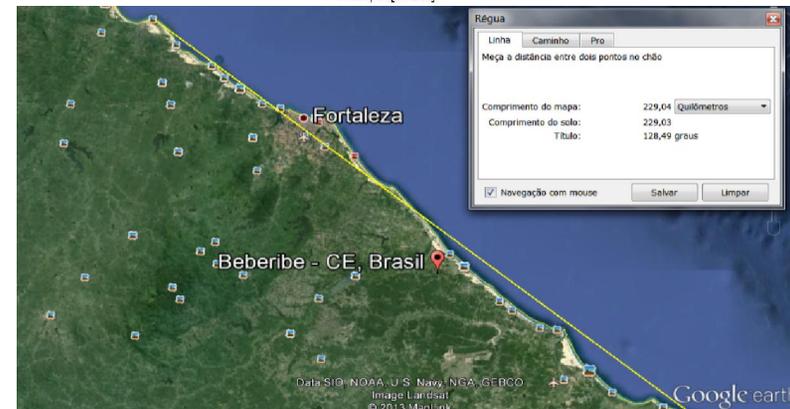
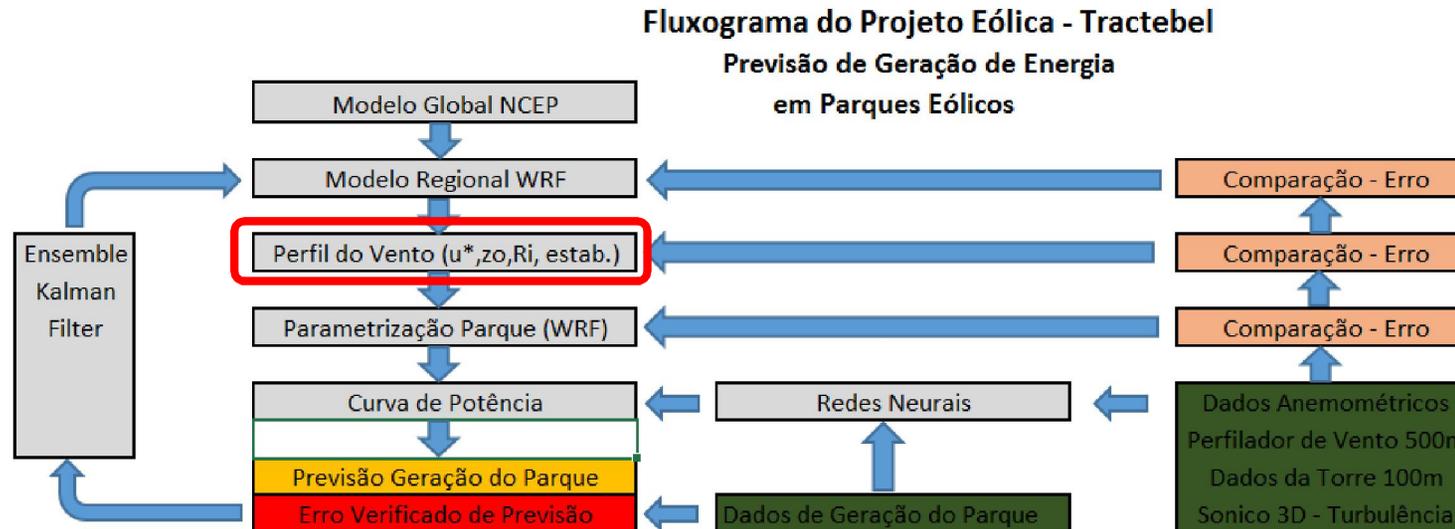


FIG. 1. Circulation integral for the sea-breeze circulation.

Fonte: Haurwits (1947)



## Visão Geral – Previsão de Geração de Energia em Parques Eólicos



## Perfil de Velocidade do Vento

- Camada Limite Atmosférica (~100m)
- Primeiro Nível do modelo: 1000hPa (~150m)
- Vento de 10m – parametrizado
- Correção do vento na altura da Nascele
- Perfil Neutro

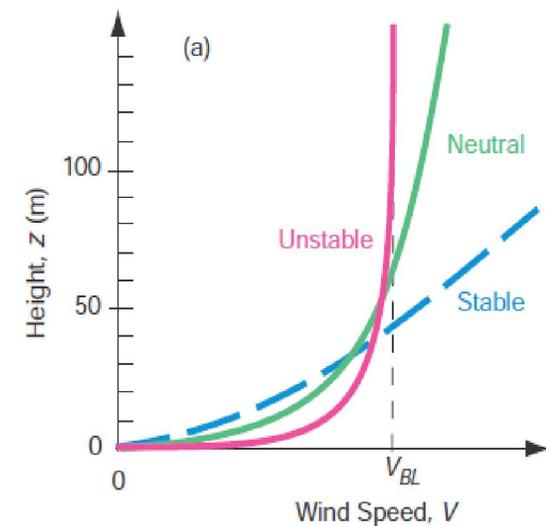
$$U(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left( \frac{z}{z_0} \right)$$

Fonte: Arya(2001)

$$u_* = \sqrt{-\tau_{t,xz}/\rho} \text{ at } z = 0$$

friction velocity

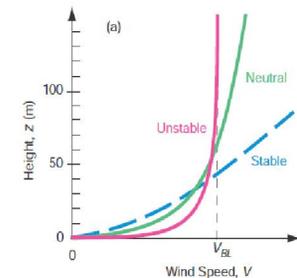
constant  $z_0$  is called roughness length



Fonte: Wallace (2006)

## Perfil de Velocidade do Vento II

- Ajuste do perfil na Camada Limite Atmosférica (CLA)
  - Correção estabilidade: Neutra, Estável, Instável
  - Teoria MOST (Monin Obukov similarity theory)
  - Análise de sensibilidade – software eddypro



$$\partial_z U = \frac{u_*}{\kappa z} \Phi_m(H, u_*, z)$$

$$\Phi_m\left(\frac{z}{L}\right) = \begin{cases} \frac{1}{\left(1-16\frac{z}{L}\right)} & \text{for unstable stratification, } \frac{z}{L} < 0 \\ 1 & \text{for neutral stratification, } \frac{z}{L} = 0 \\ \left(1 + 5\frac{z}{L}\right) & \text{for stable stratification, } \frac{z}{L} > 0. \end{cases}$$

Fonte: Panofsky (1963), Lange (2007)

$$L = -\frac{u_*^3 \Theta c_p \rho}{\kappa g H}$$

**EDDYPRO**

[http://www.licor.com/env/products/eddy\\_covariance/software.html](http://www.licor.com/env/products/eddy_covariance/software.html)

## Estabilidade – Diferentes Técnicas

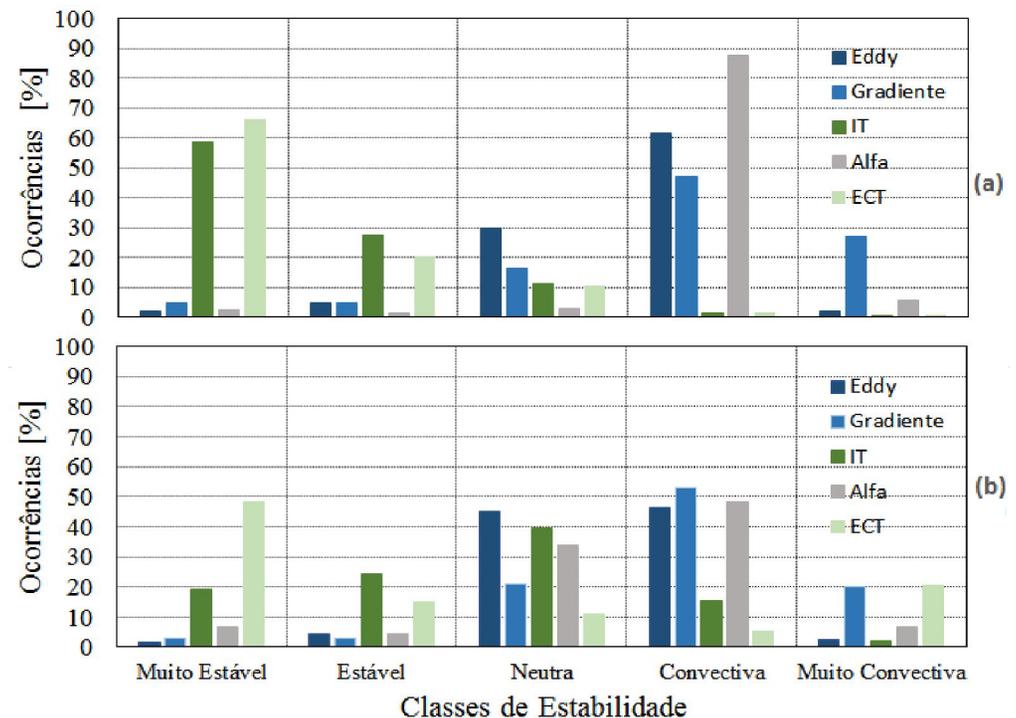
- Eddy covariance, Gradiente, Intensidade Turbulenta, Coeficiente de Cisalhamento e Energia Cinética Turbulenta.

Classe	L	ECT	IT	Alfa
Muito Estável	$0 < L < 50$	$ECT < 0,4$	$IT < 8\%$	$\alpha > 0,3$
Estável	$50 < L < 200$	$0,4 < ECT < 0,6$	$8\% < IT < 10\%$	$0,2 < \alpha < 0,3$
Neutra	$200 < L < 300$	$0,6 < ECT < 1,0$	$10\% < IT < 20\%$	$0,1 < \alpha < 0,2$
Convectiva	$-300 < L < -15$	$1,0 < ECT < 1,4$	$20\% < IT < 30\%$	$0,0 < \alpha < 0,1$
Muito convectiva	$-15 < L < 0$	$ECT > 1,4$	$IT > 30\%$	$\alpha < 0,0$

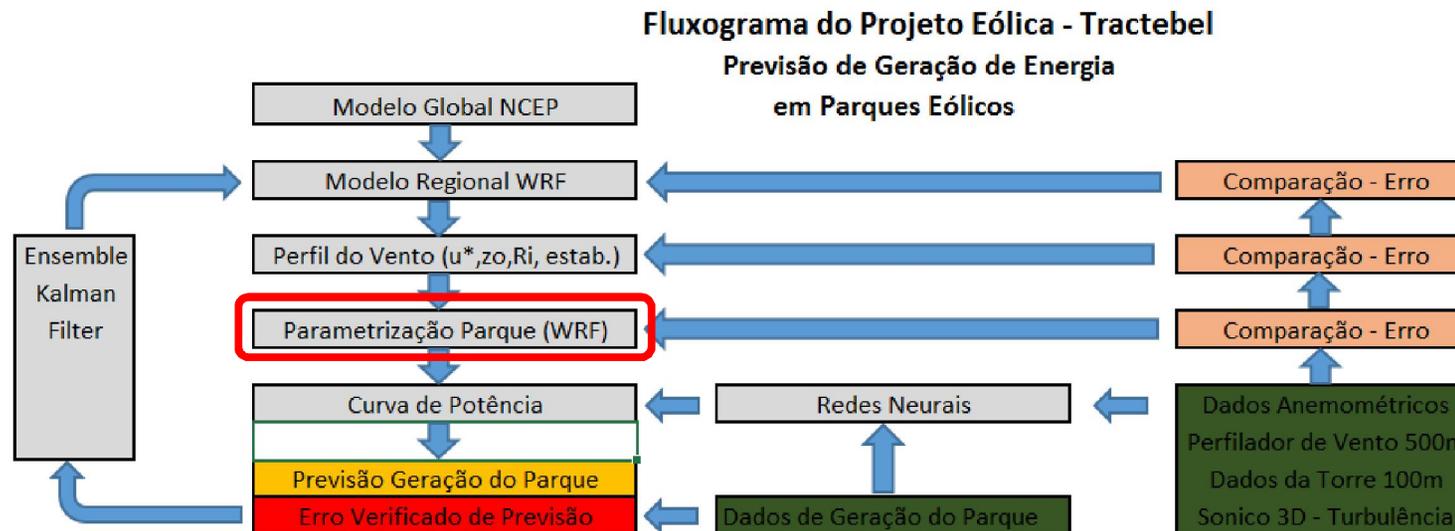
$$ECT = \frac{1}{2} (\overline{u'u'} + \overline{v'v'} + \overline{w'w'})$$

$$IT = \frac{\sigma_v}{\bar{U}} \quad U(z) = U_r \left( \frac{z}{z_r} \right)^\alpha$$

- Trabalho aceito no VIII Workshop de Micrometeorologia 2013.



## Visão Geral – Previsão de Geração de Energia em Parques Eólicos

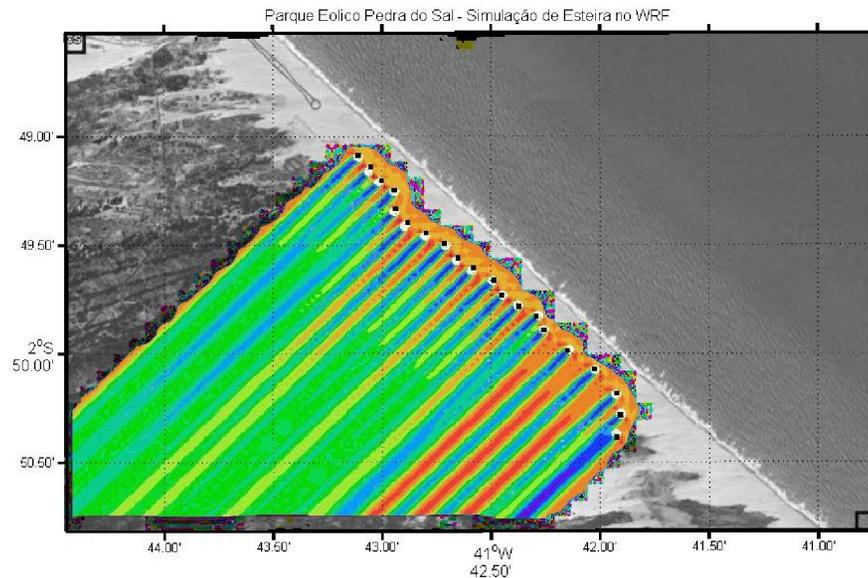
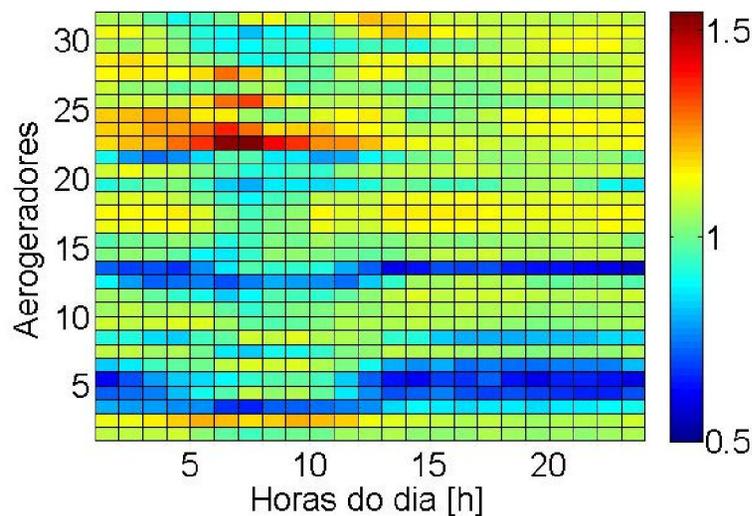


## Modelo do Parque – WRF Windfarm

- Aerogerador = sumidouro de energia cinética (KE)
- Resolução espacial: 44m
- Resolução vertical: 10m

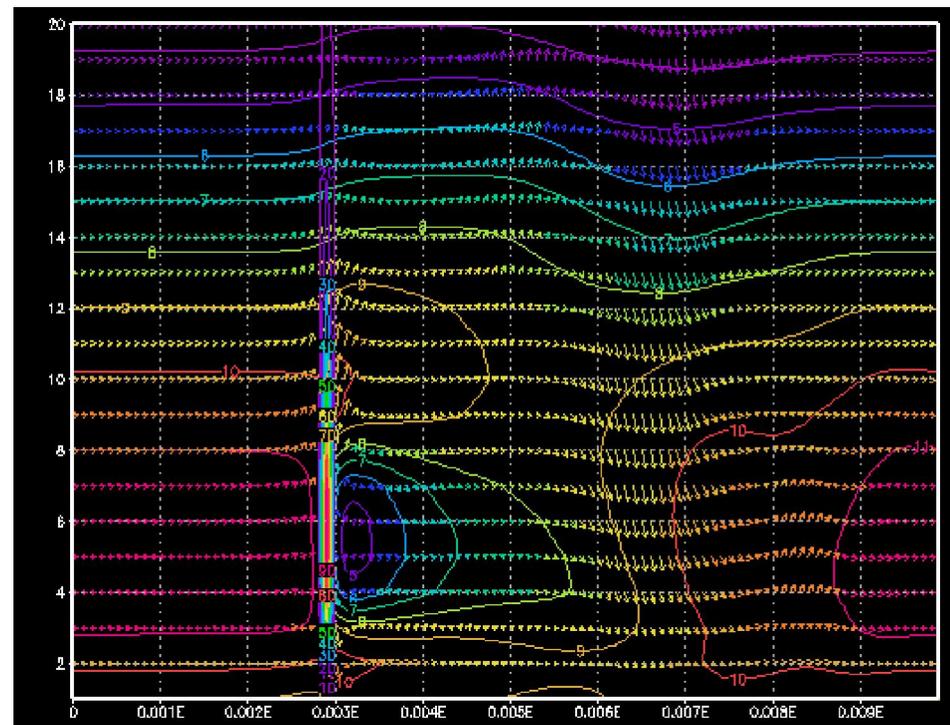
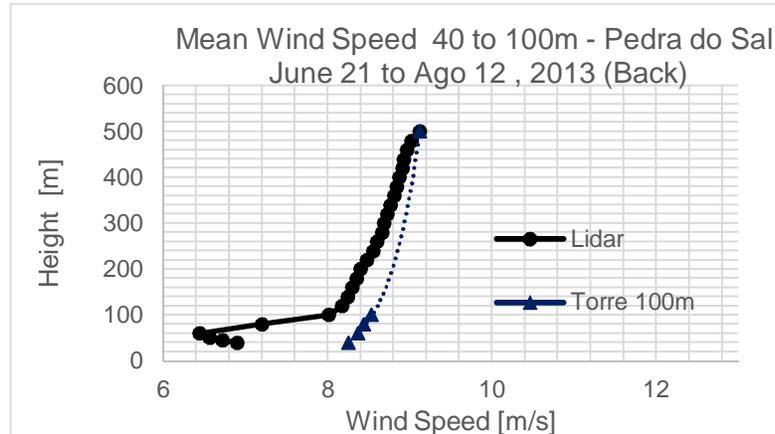
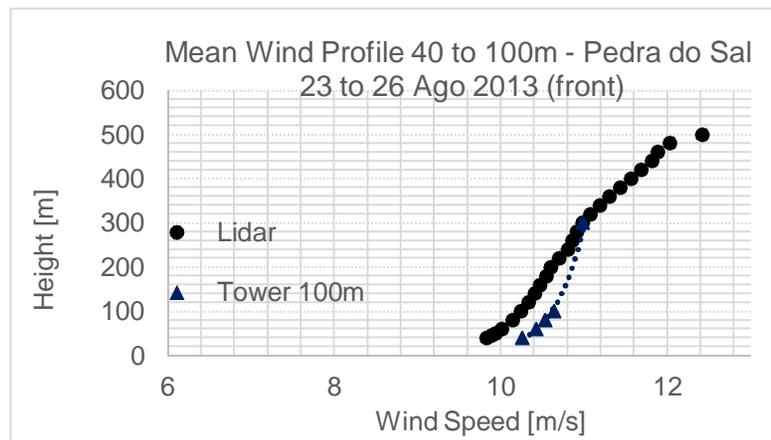
$$\frac{\partial KE_{\text{drag}}}{\partial t} = -\frac{1}{2}C_T(|\mathbf{V}|)\rho|\mathbf{V}|^3A.$$

Fonte: Fitch (2012)



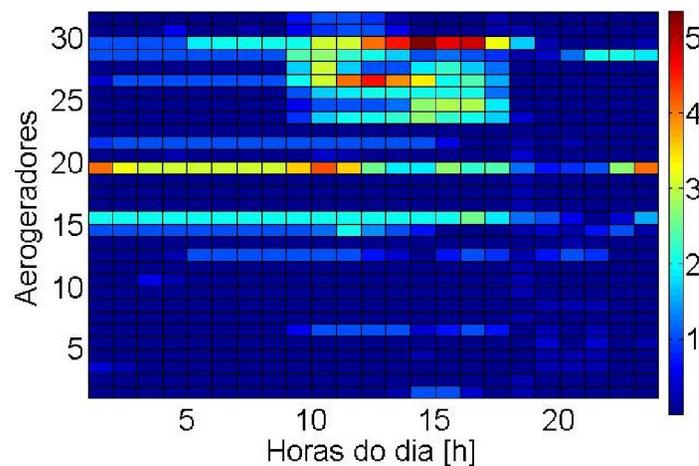
## Modelo do Parque – WRF Windfarm

- Perfil Velocidade na esteira

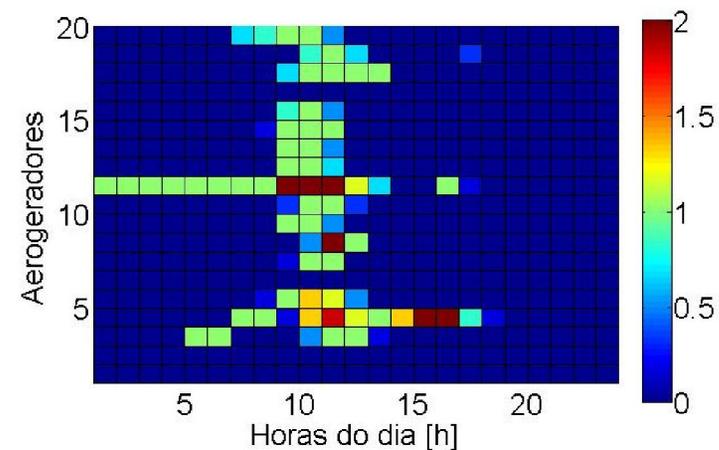


## Modelo do Parque – Manutenção

- 0,5 a 1,5% do tempo parado
- Velocidade do vento > cut-in (2,5m/s) e Geração zero
- Horário comercial

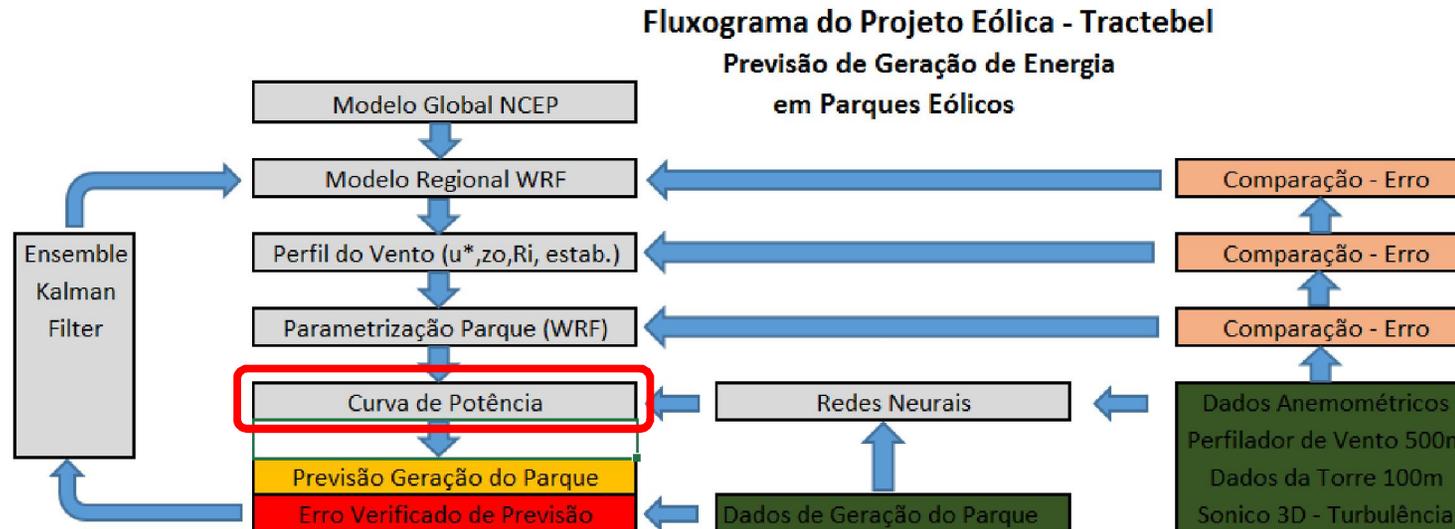


Beberibe-CE



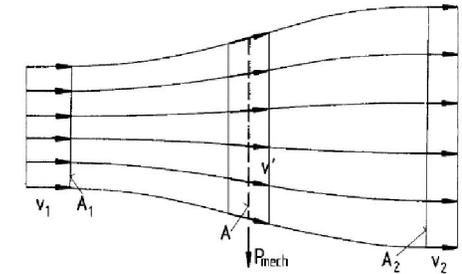
Pedra do Sal-PI

## Visão Geral – Previsão de Geração de Energia em Parques Eólicos

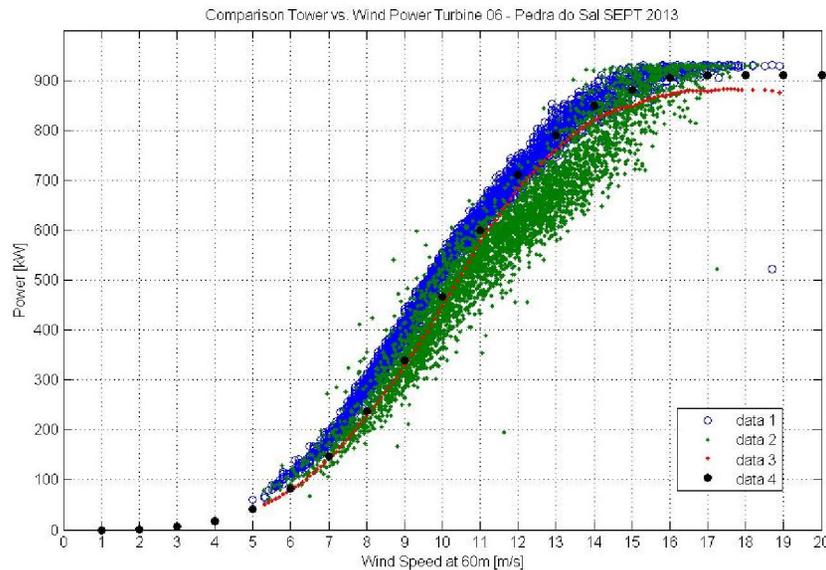


## Curva de Potência

- Pelo vento na altura da nascele no Aerogerador
- Pelo vento na altura da nascele na Torre de 100m
- Pelo perfil do vento (equivalente)



$$c_p = \frac{P}{P_o} = \frac{\frac{1}{4}\rho A (v_1^2 - v_2^2) (v_1 + v_2)}{\frac{1}{2}\rho A v_1^3}$$

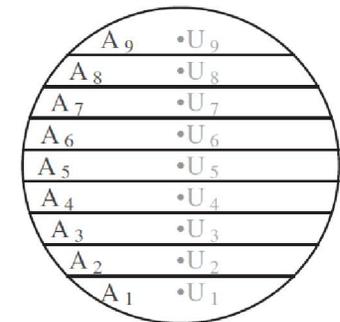


$$P = \frac{1}{2}\rho v^3 A \quad (W)$$

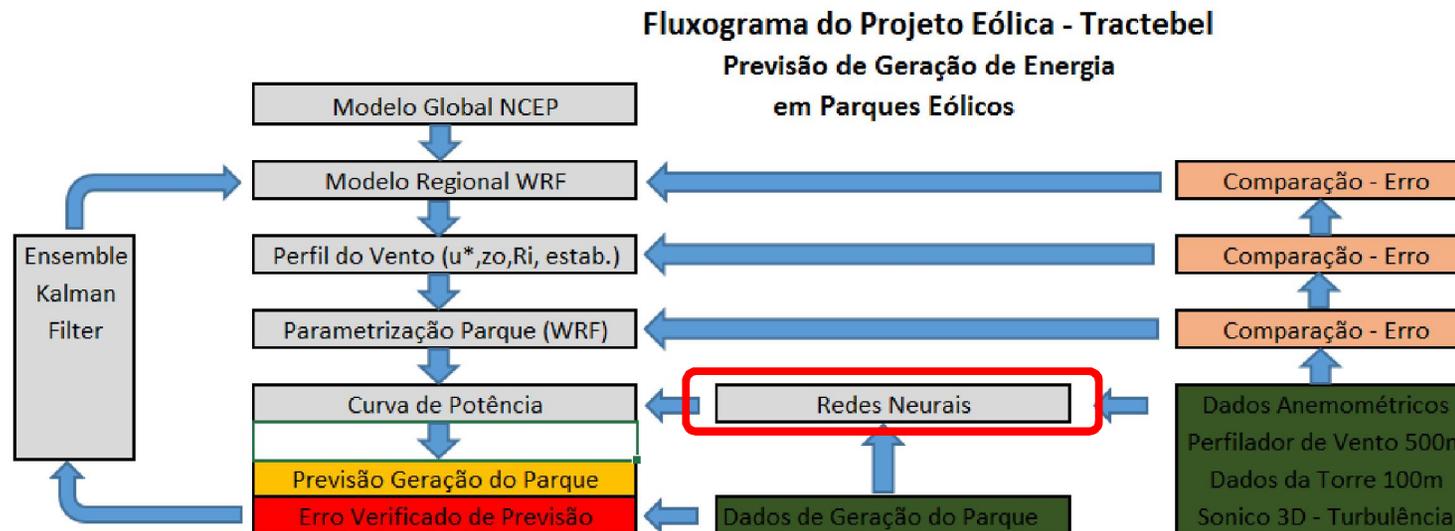
[Hau \(2006\)](#)

$$KE_{\text{prof}} = \sum_i \frac{1}{2}\rho u_i^3 A_i$$

[Wagner \(2011\)](#)

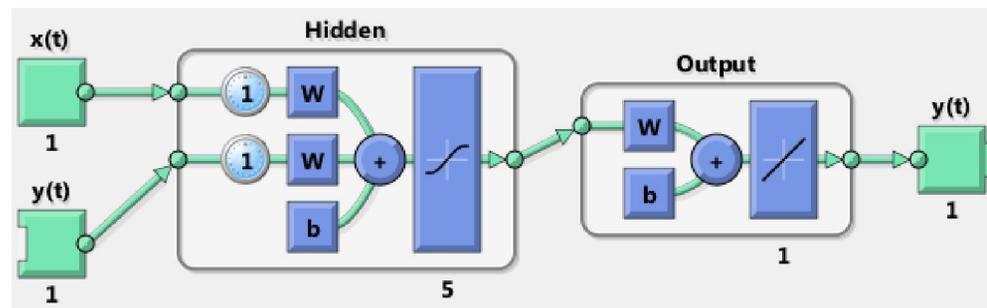


## Visão Geral – Previsão de Geração de Energia em Parques Eólicos

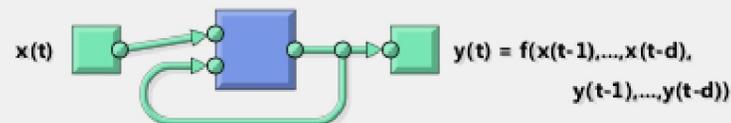


## Redes Neurais

- Método: Nonlinear Autoregressive with external input (NARX)
- Treinamento: Banco de dados de previsão GFS e dados de Geração
- Delay: 1 step
- Hidden Layer: 5
- Matlab

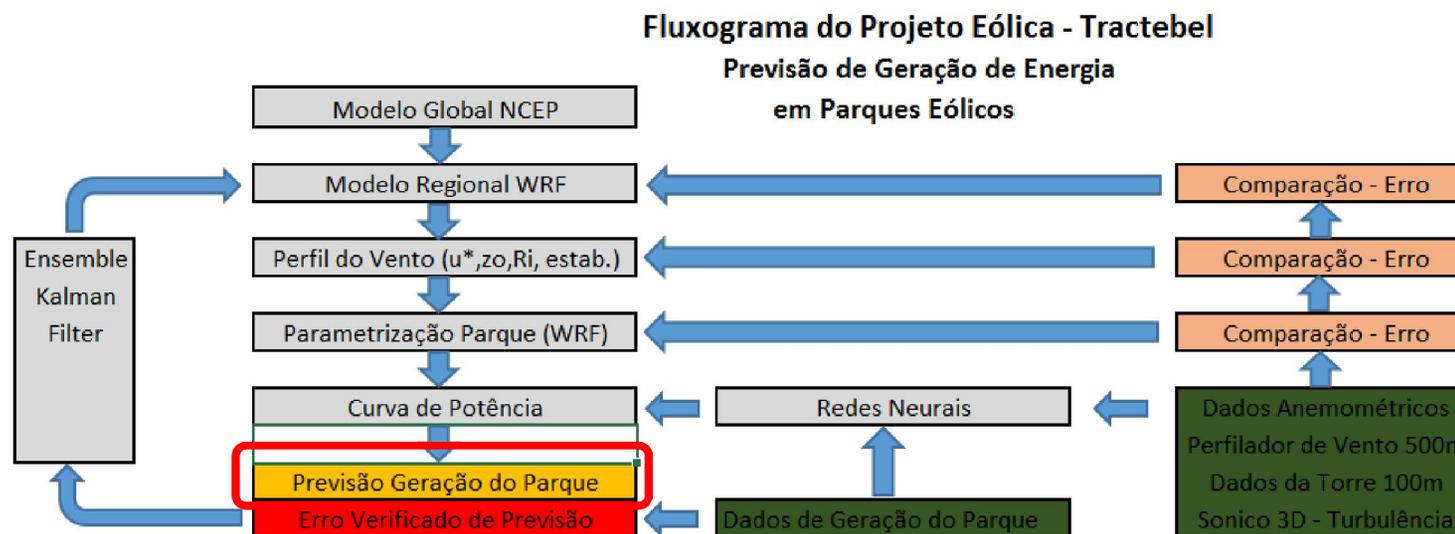


- Nonlinear Autoregressive with External (Exogenous) Input (NARX)  
Predict series  $y(t)$  given  $d$  past values of  $y(t)$  and another series  $x(t)$ .



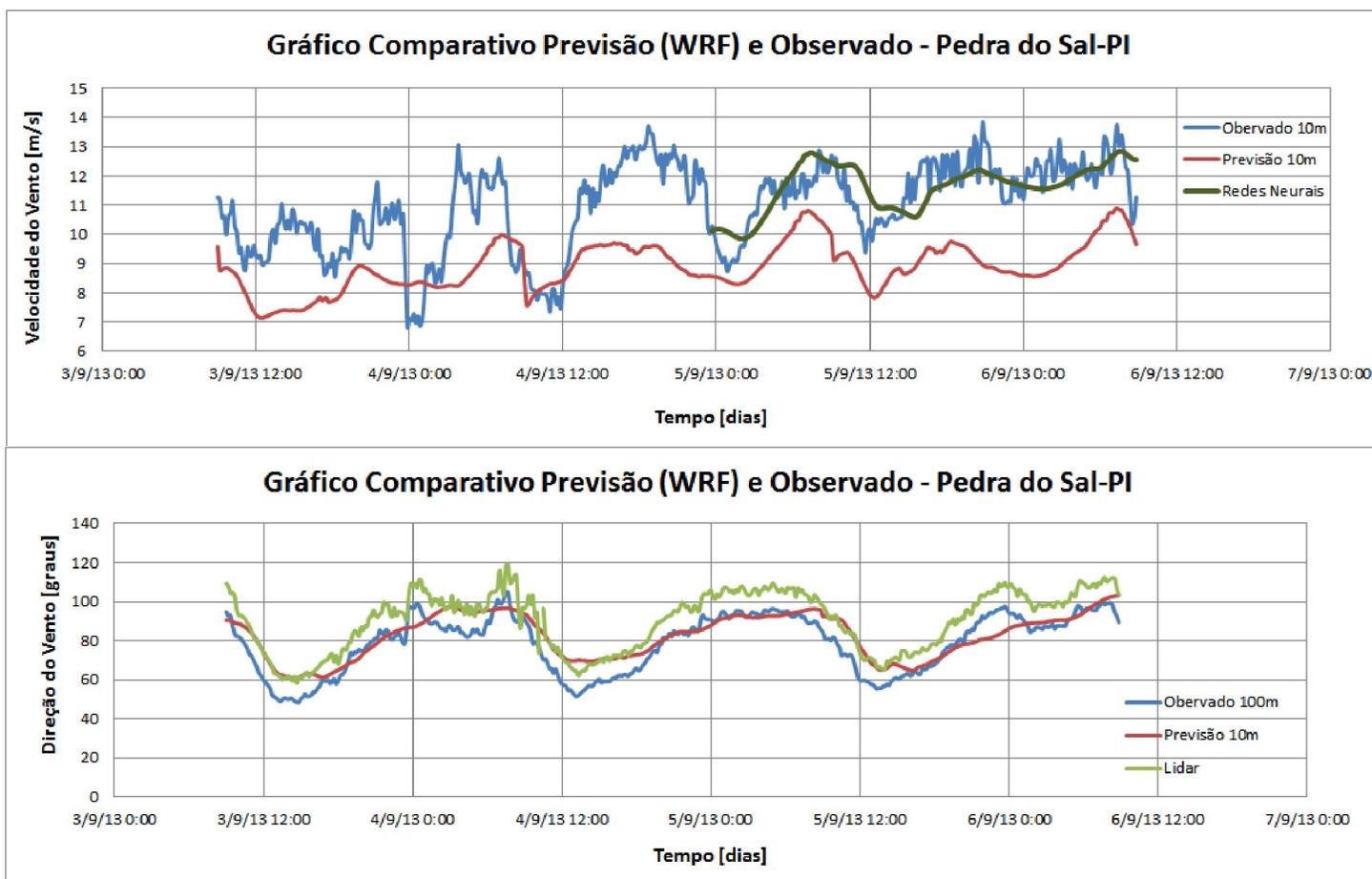
Fonte: Matlab

## Visão Geral – Previsão de Geração de Energia em Parques Eólicos



## Previsão de Vento

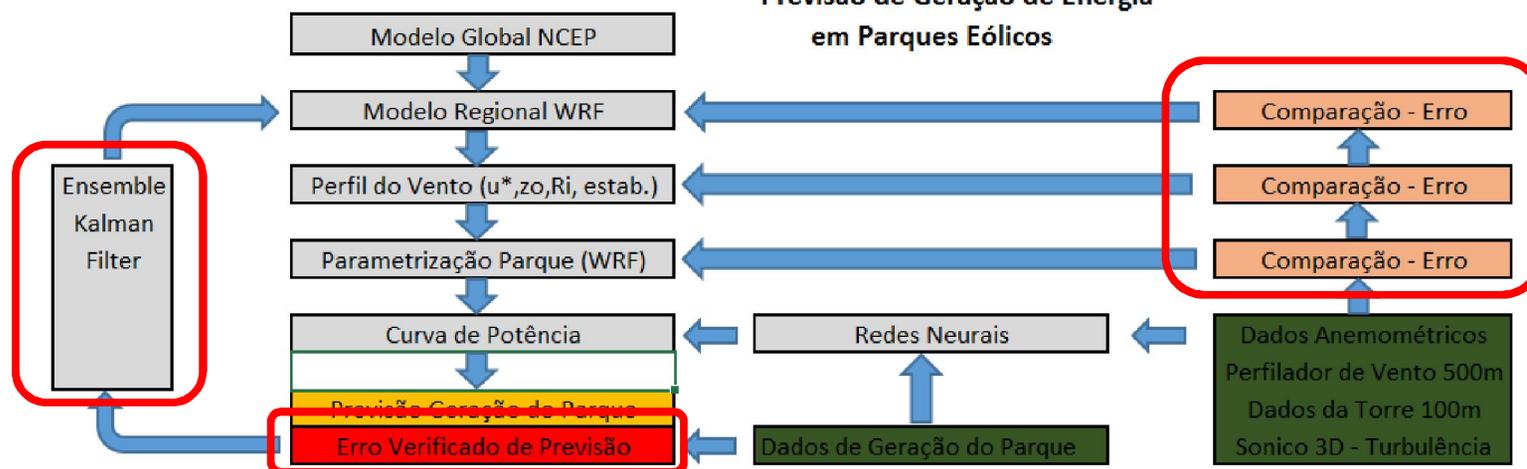
- Em 10m (por enquanto)



## Visão Geral – Previsão de Geração de Energia em Parques Eólicos

Fluxograma do Projeto Eólica - Tractebel

Previsão de Geração de Energia  
em Parques Eólicos



# LEPTEN

Laboratórios de Engenharia de Processos  
de Conversão e Tecnologia de Energia

# Seminário – Resultados Preliminares

Obrigado pela Atenção.

Agradecimentos:

Tractebel Energia  
GDF SVEZ

LEPTEN

 INSTITUTO FEDERAL  
SANTA CATARINA



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
UNIVERSIDADE FEDERAL  
DE SANTA CATARINA