

LEPTEN

Laboratórios de Engenharia de Processos
de Conversão e Tecnologia de Energia



Energia Eólica: Panorama Nacional e Novas Tecnologias



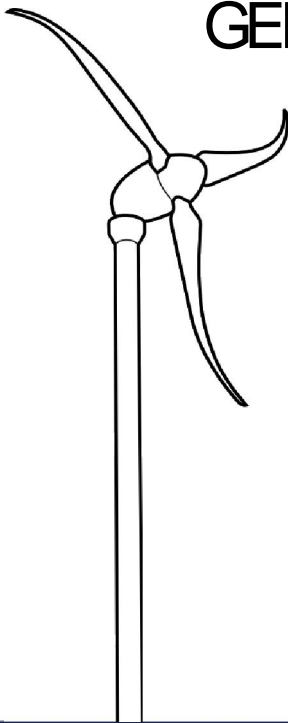
LEPTEN

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



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

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

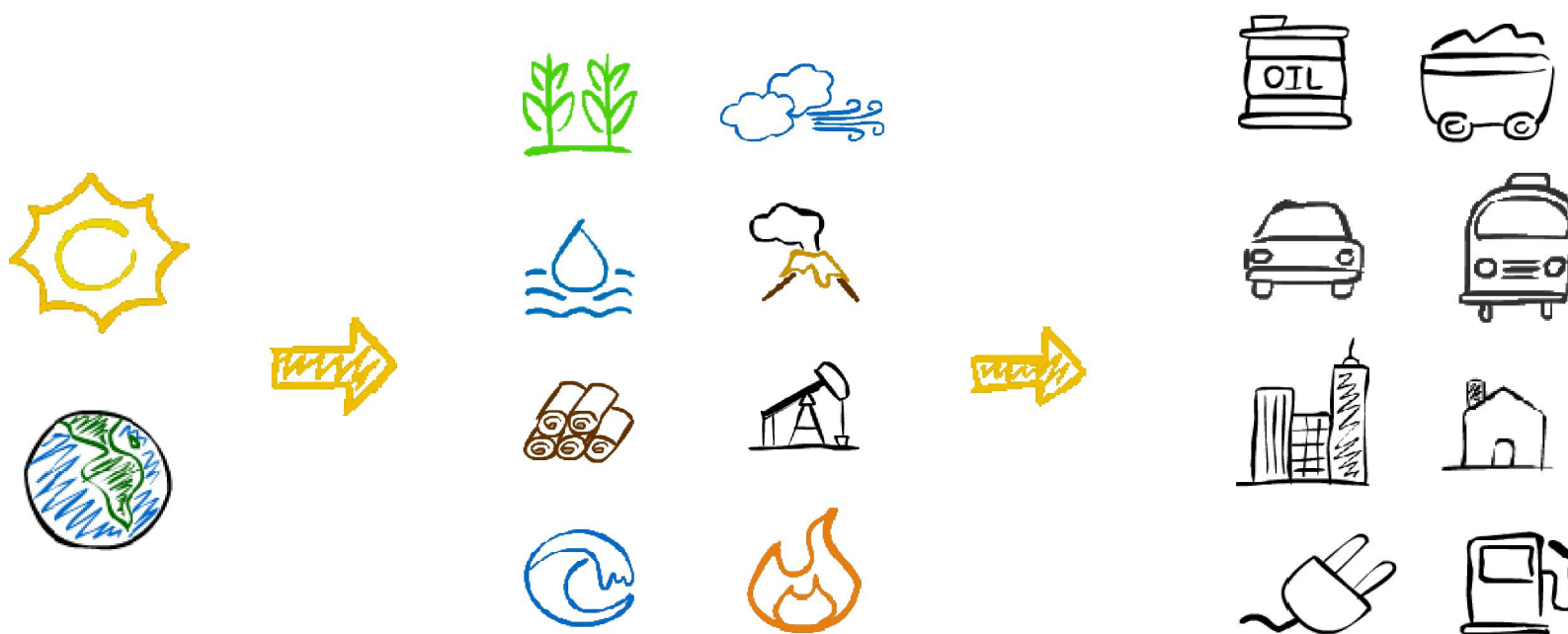
Laboratórios de Engenharia de Processos
de Conversão e Tecnologia de Energia



Panorama da Energia Elétrica no Brasil e no Mundo



Fontes de Energia

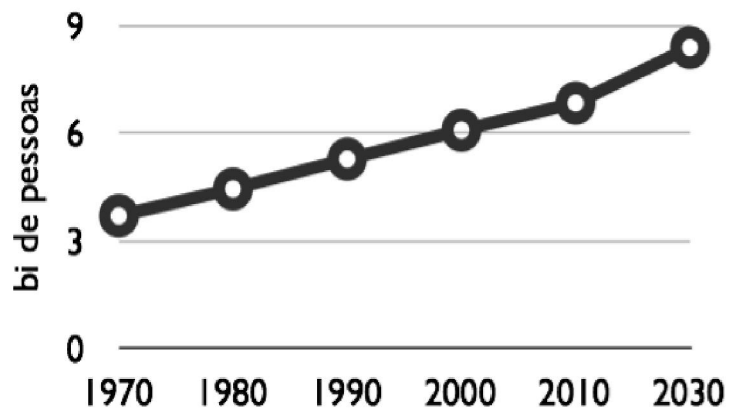


População x PIB

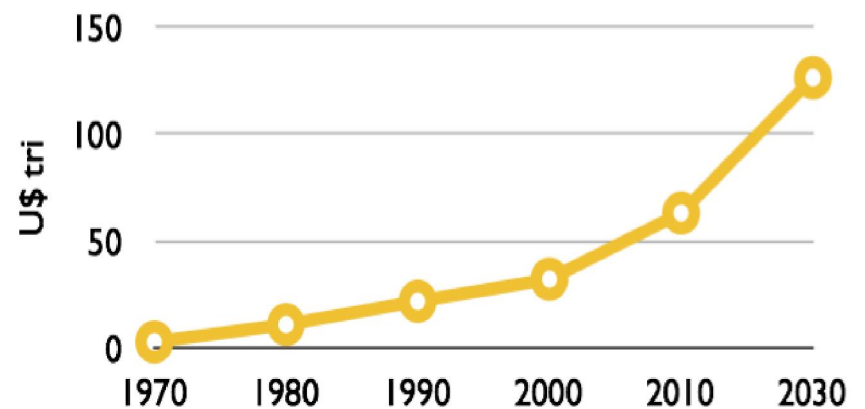
Nos últimos 20 anos, a população mundial aumentou em 1,6 bi, enquanto o PIB cresceu 87%.

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

População

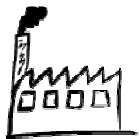


PIB mundial



Tendências

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



Industrialização



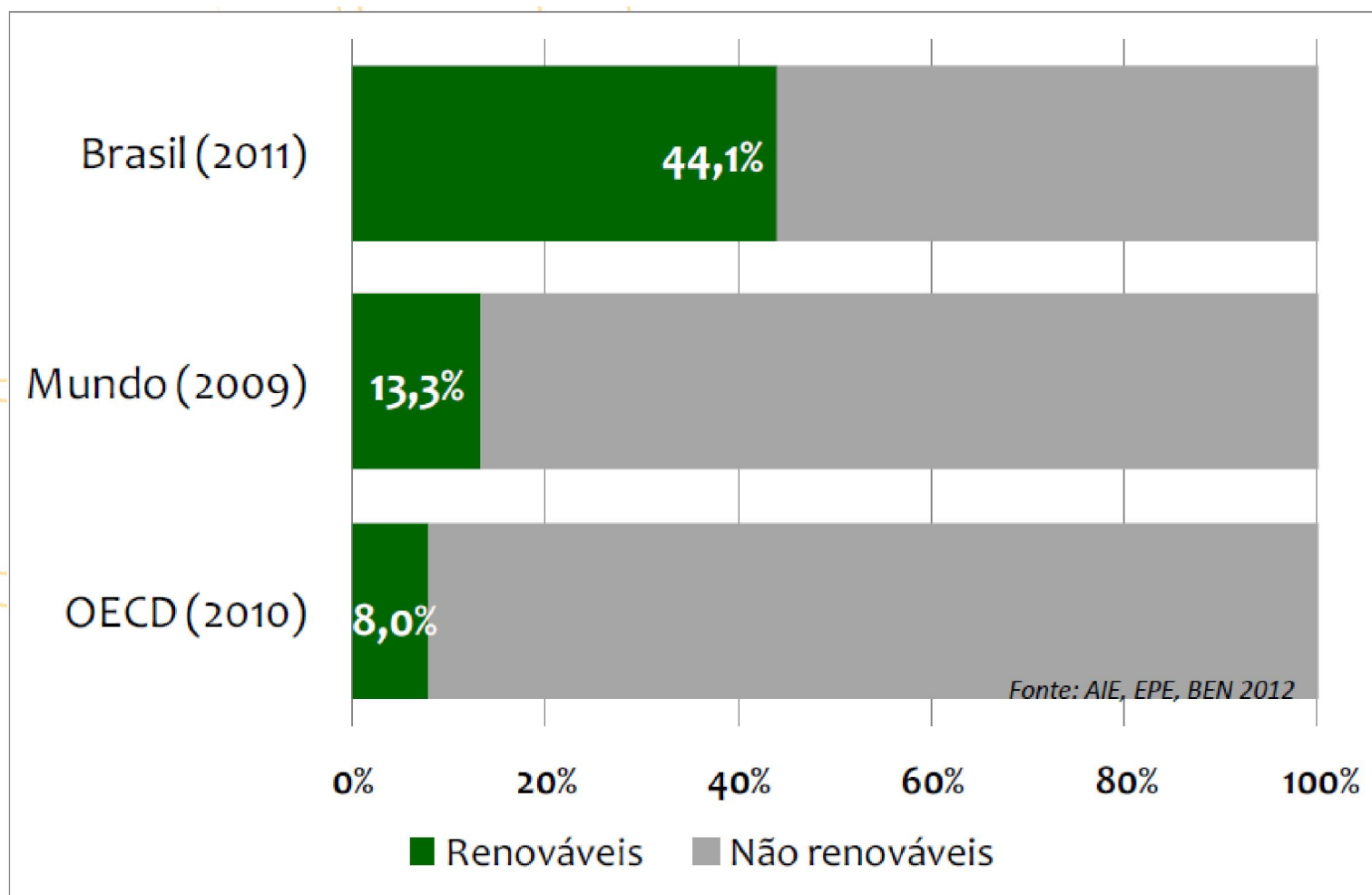
Transporte



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%

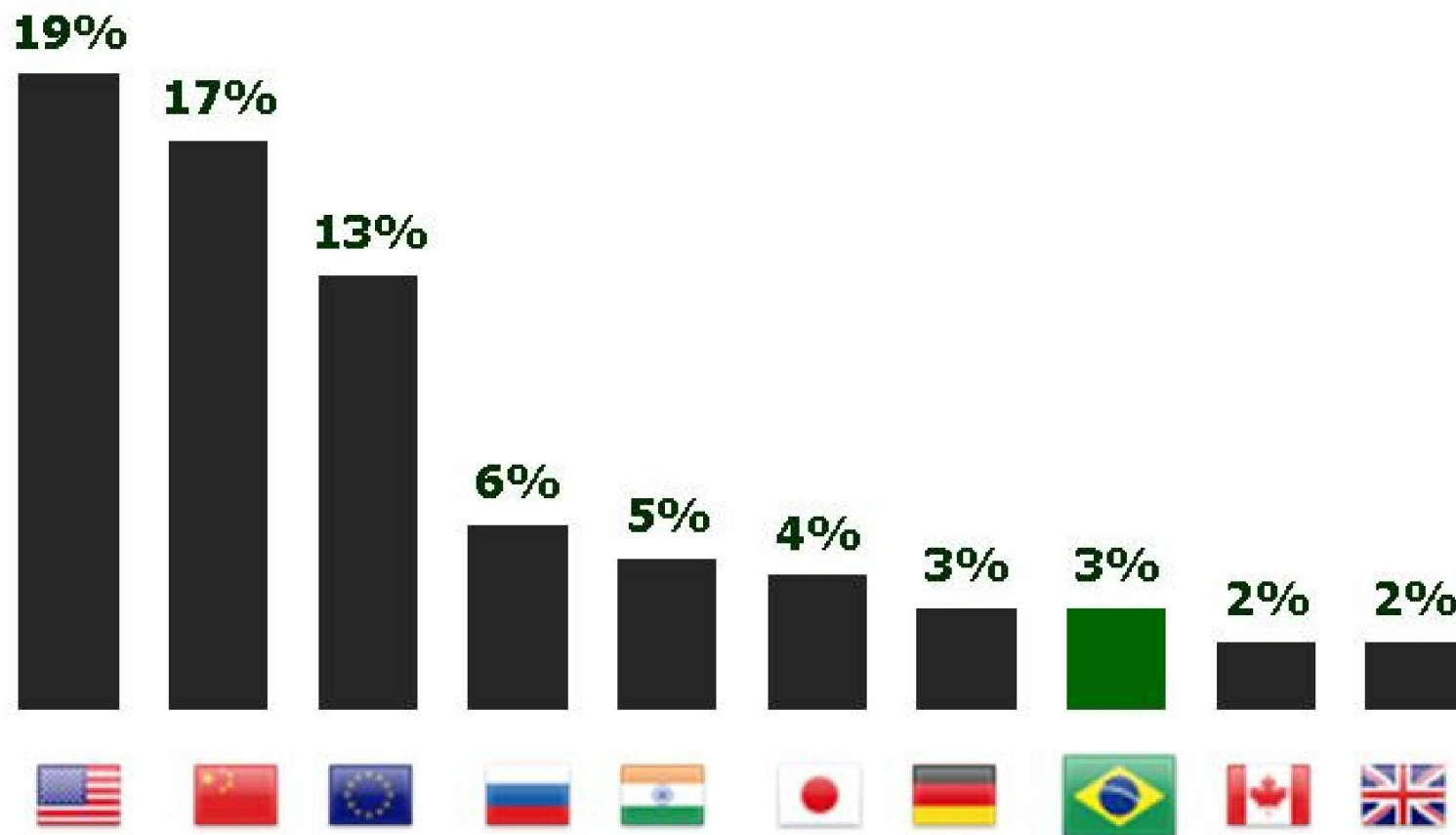


urânio
1,5%

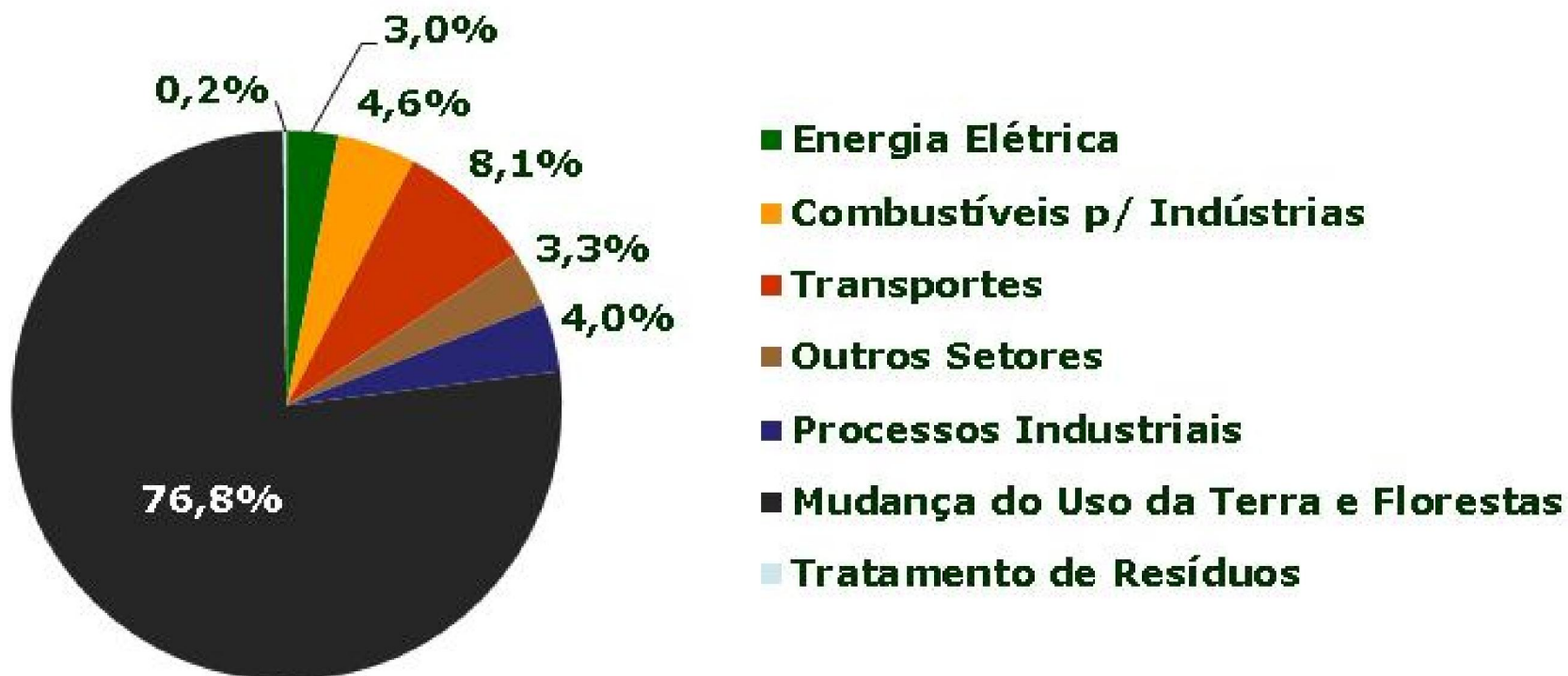


Fonte: EPE, BEN 2012

Emissões de CO₂ Antropogênico

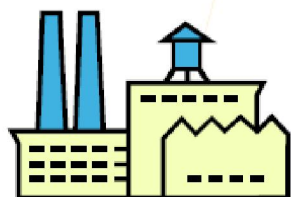


Emissões de CO₂ no Brasil



Uso da energia no Brasil

indústrias
35,9%



transportes
30,1%



residências
9,5%

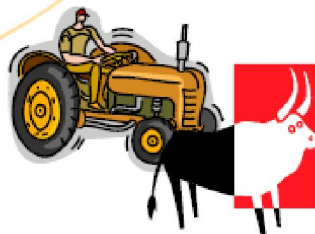


setor energético
8,9%

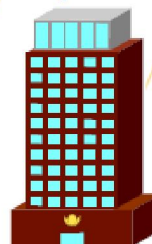


Produção industrial, transporte de carga e mobilidade das pessoas e famílias respondem por 66% do consumo de energia do país

agropecuária
4,0%



serviços
4,4%

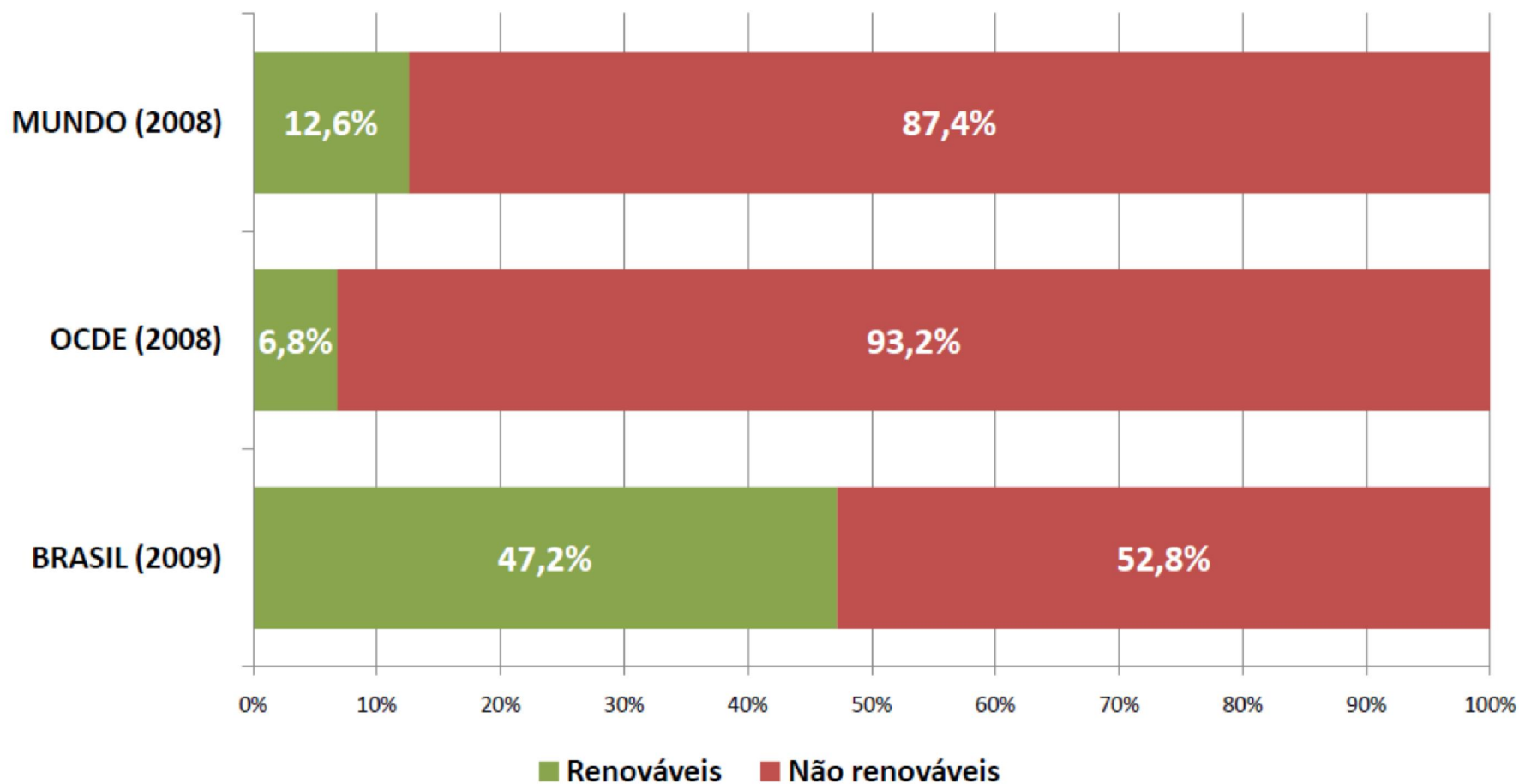


*Dados referentes a 2011
Fonte: EPE, BEN 2012*

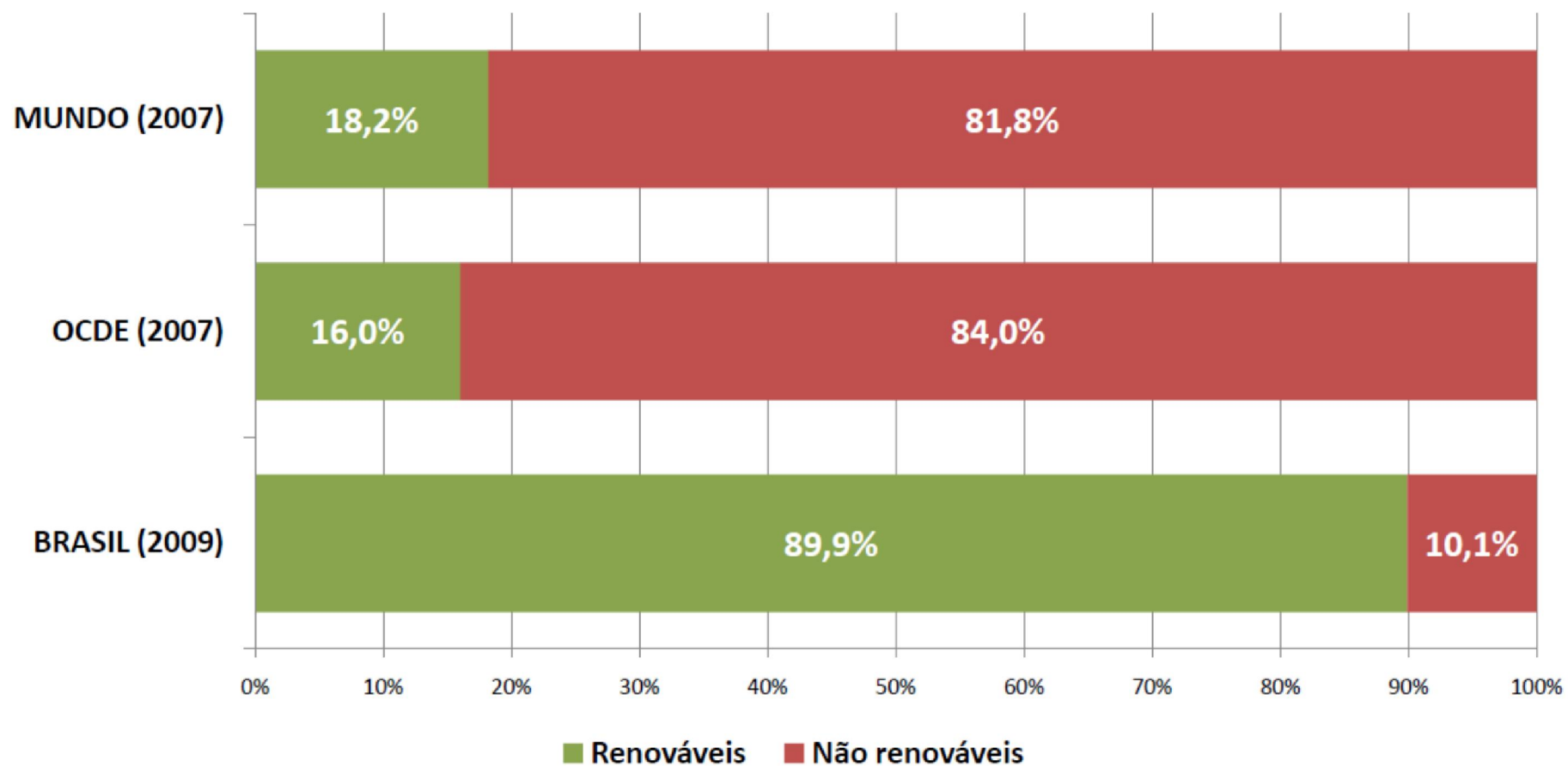
Energia Elétrica



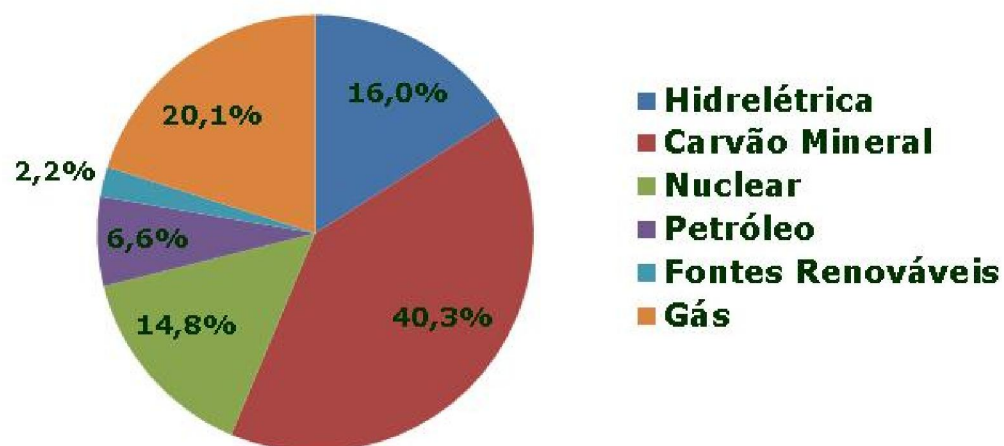
Fontes Renováveis na Matriz Energética



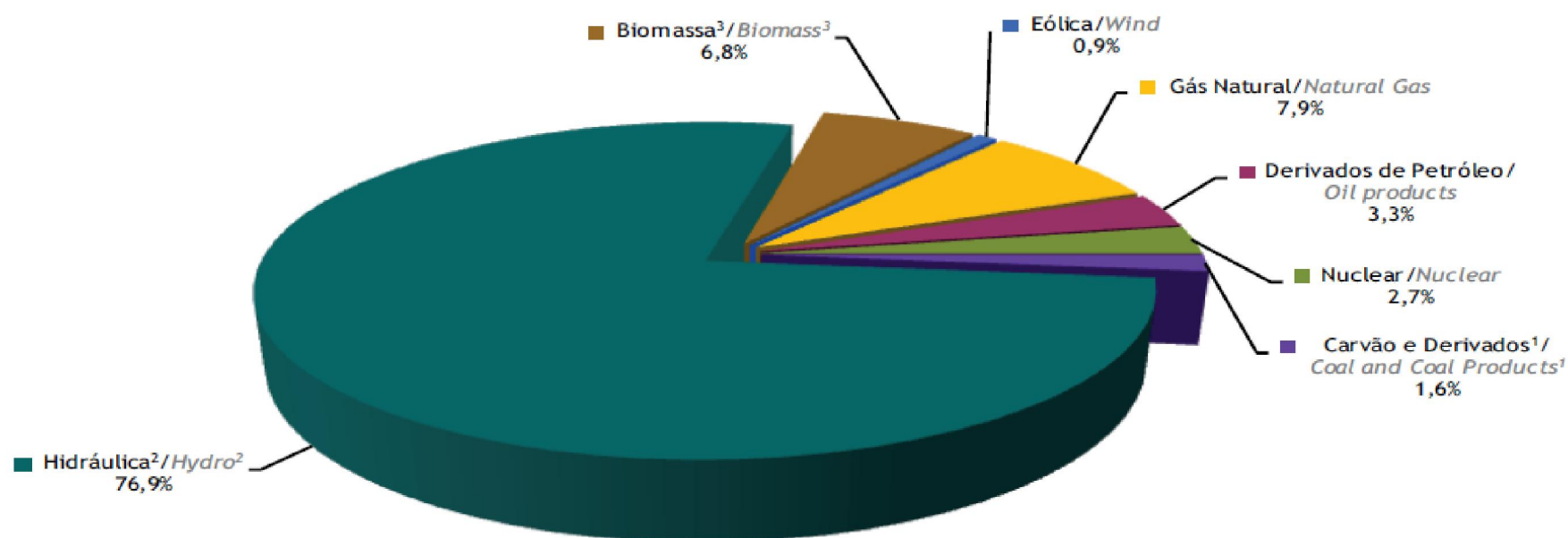
Fontes Renováveis na Matriz de Energia Elétrica



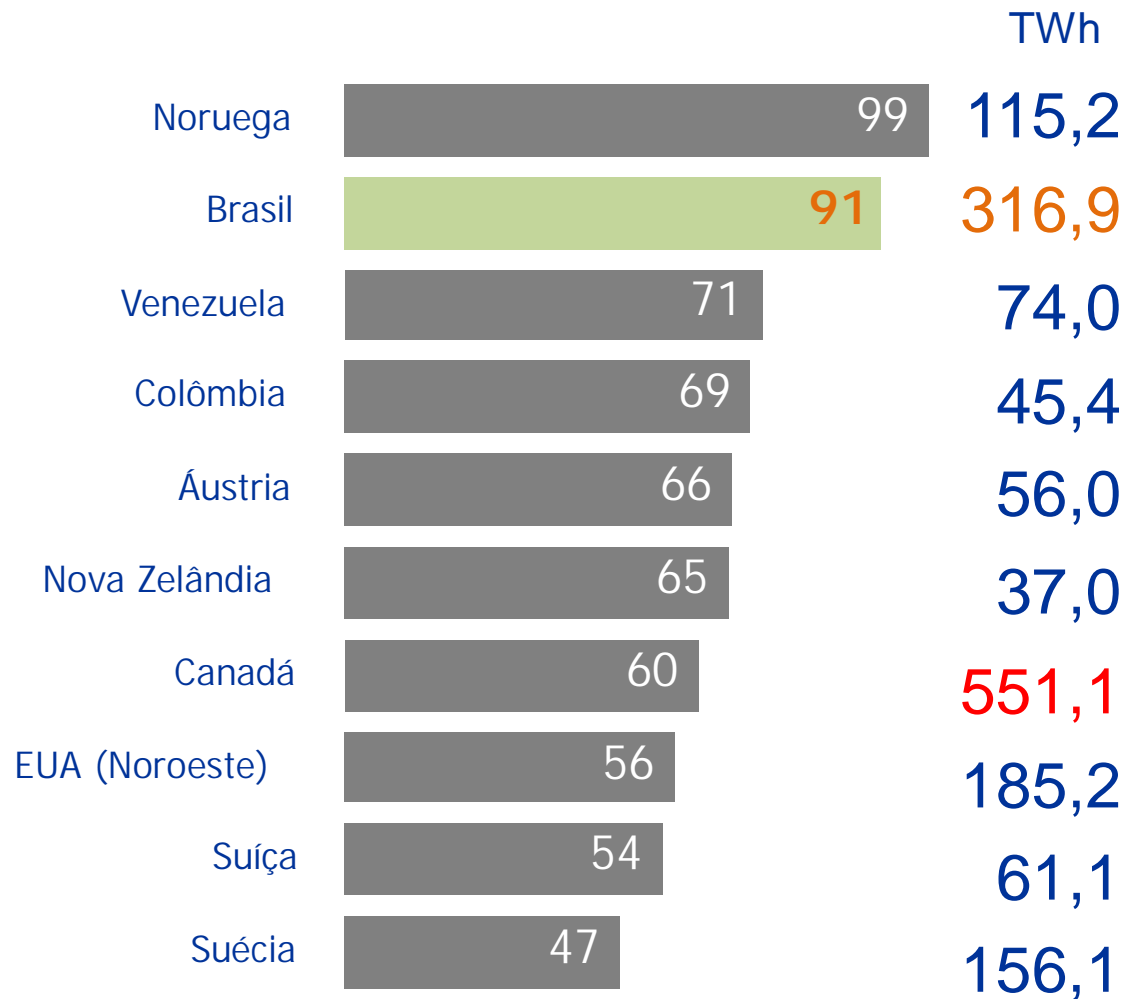
Matriz de Energia Elétrica – Mundo



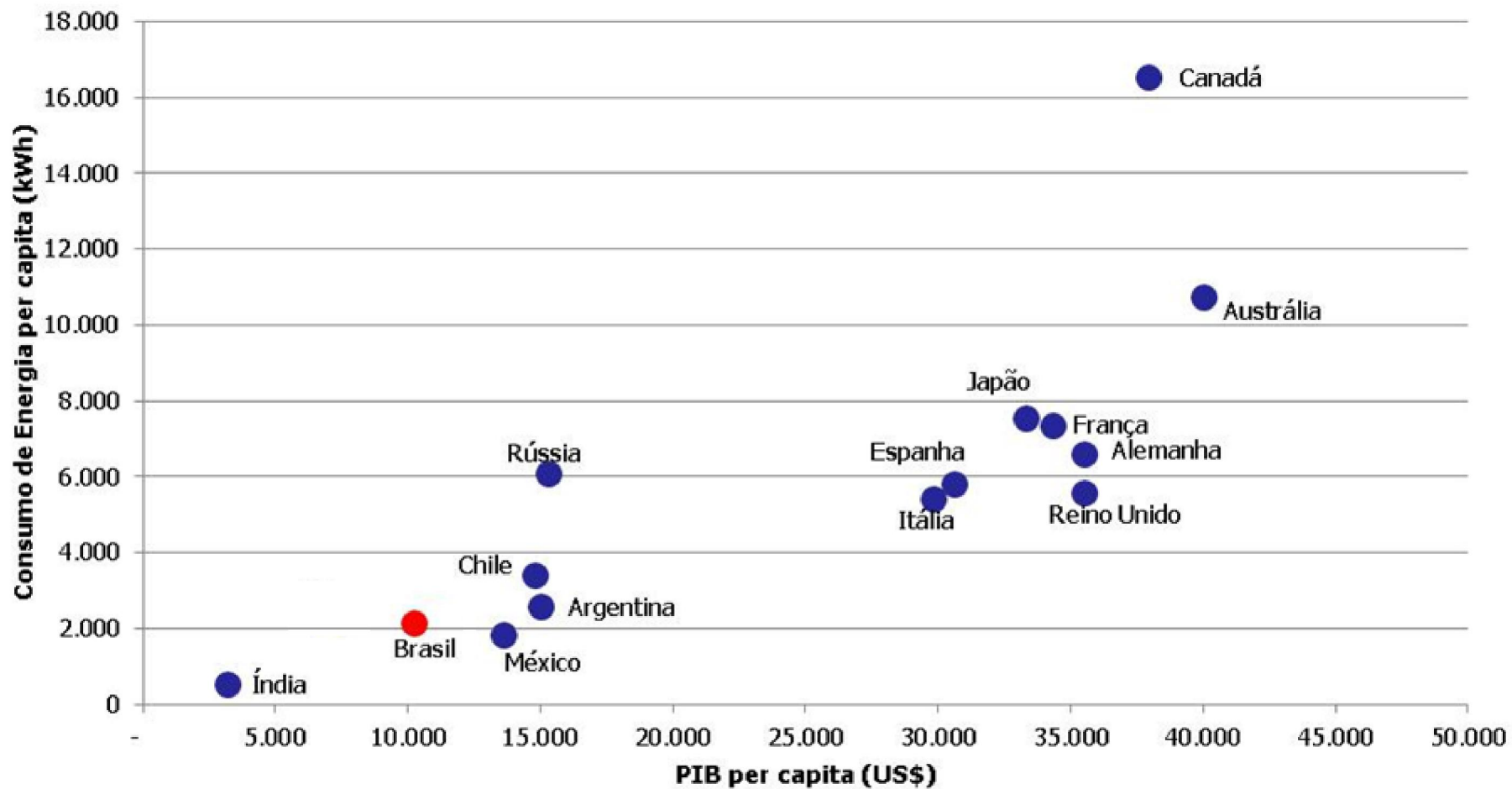
Matriz de Energia Elétrica – Brasil



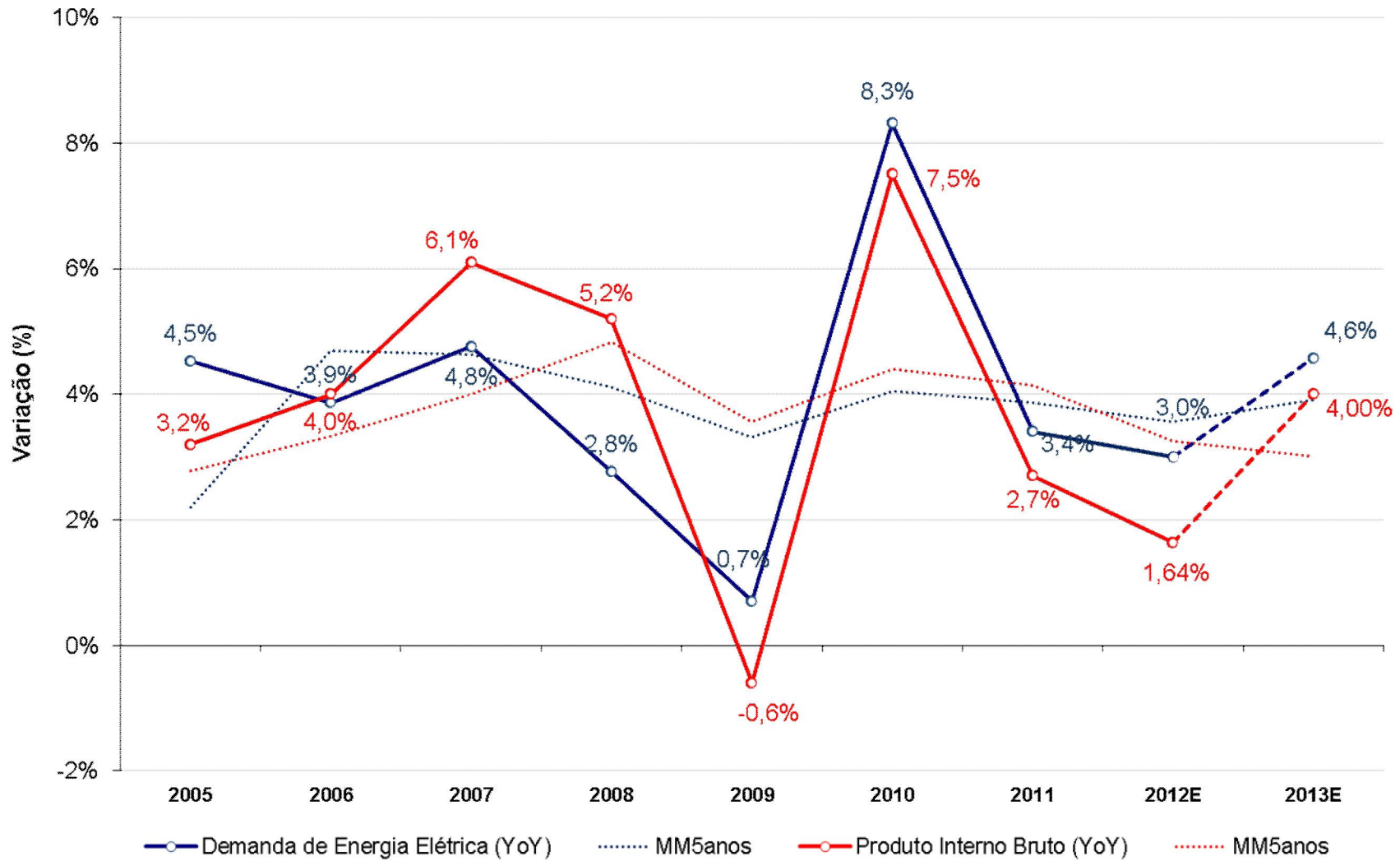
Geração Hidrelétrica



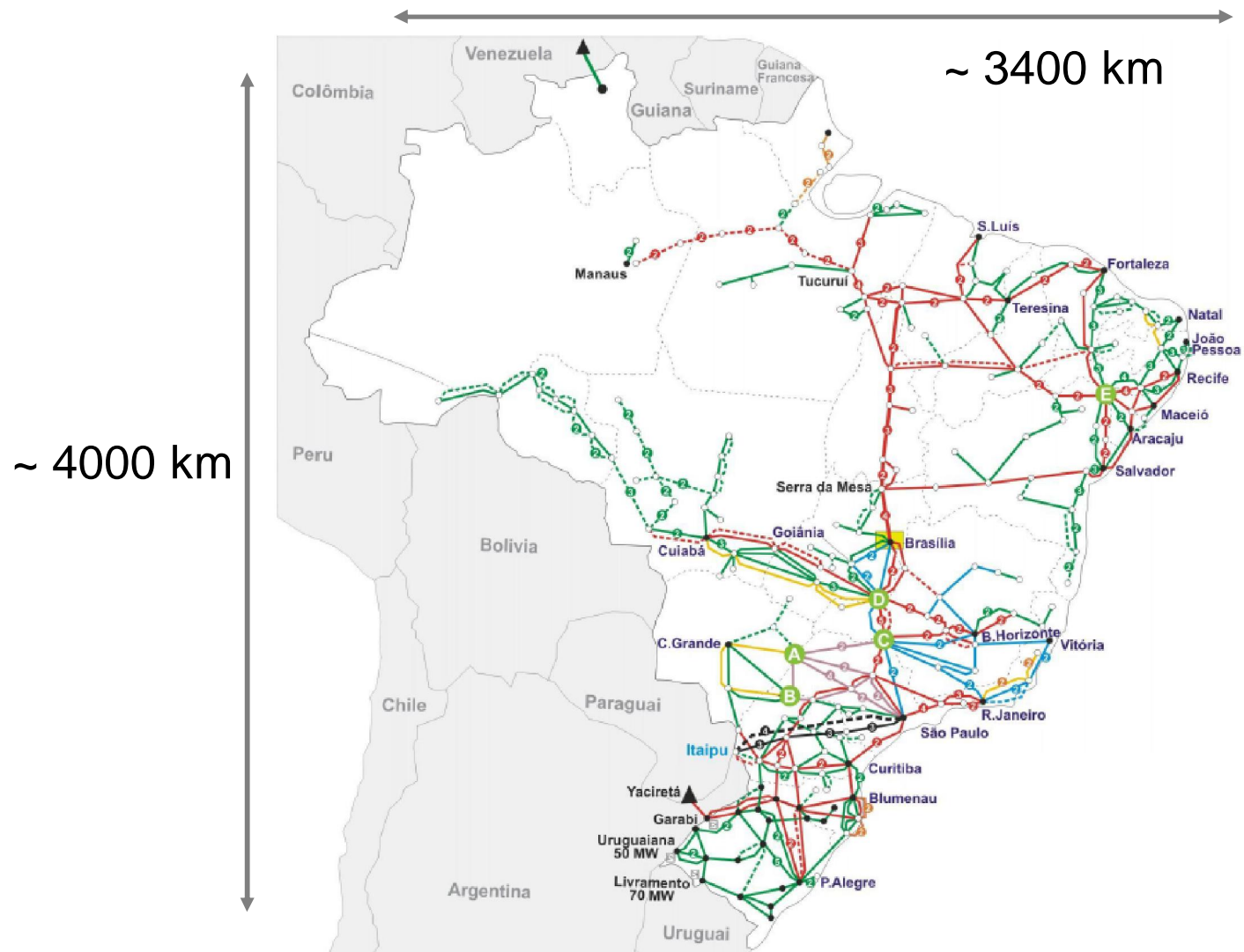
Padrão de Consumo



PIB x Consumo



Sistema Interligado Nacional





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%
Total	108.034	100%	137.913	100%	29.879	28%

Geração no SIN em 23/10/2013

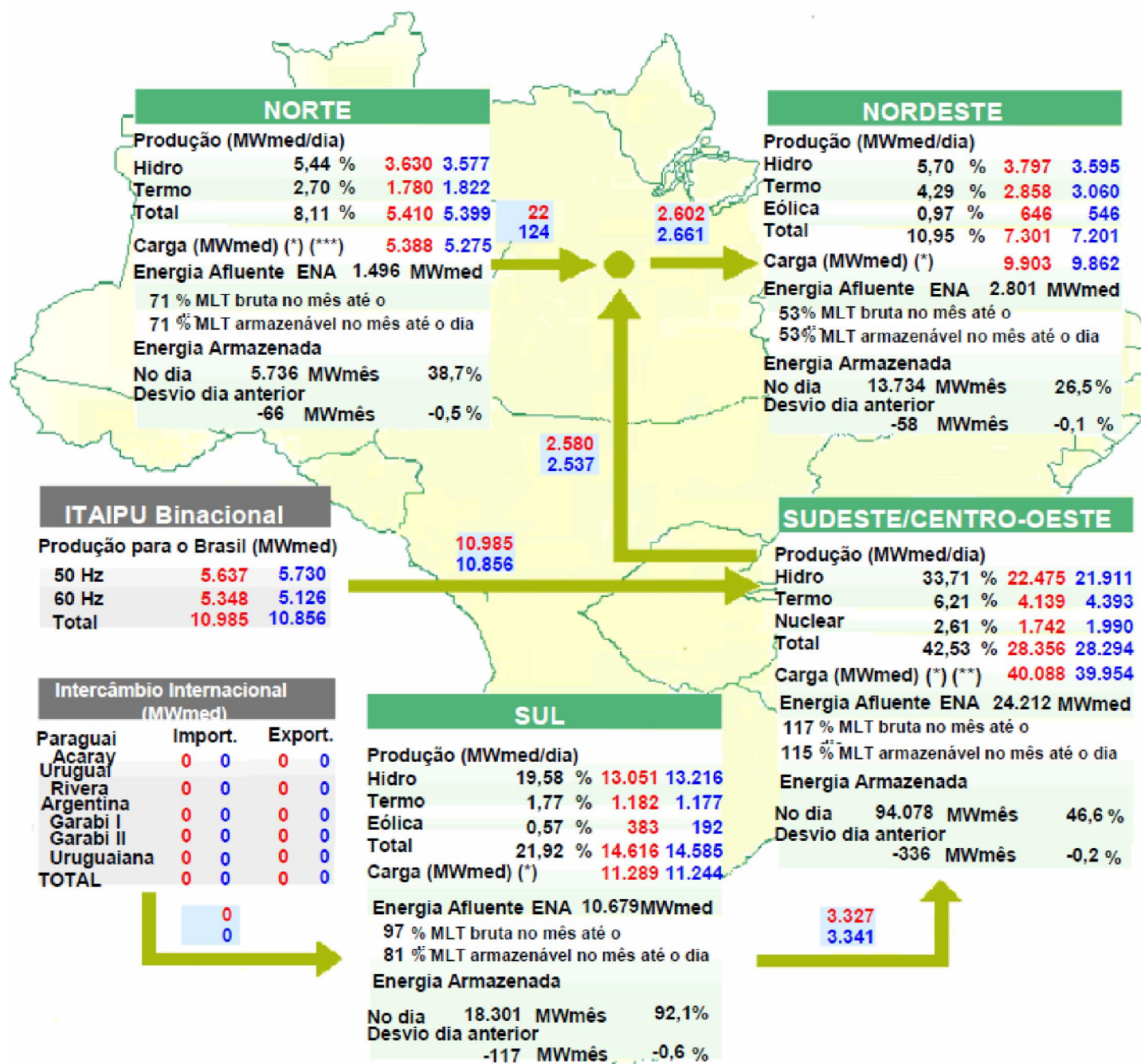
1 - Balanço de Energia

LEGENDA:  Verificado
 Programado

SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL - SIN - MWmed			
Produção			
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

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

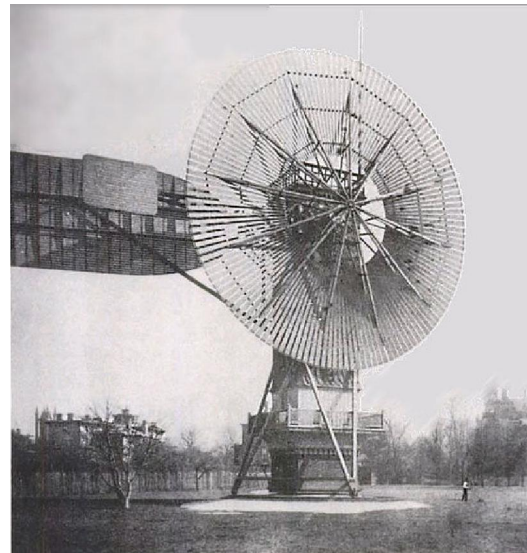


Onshore

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



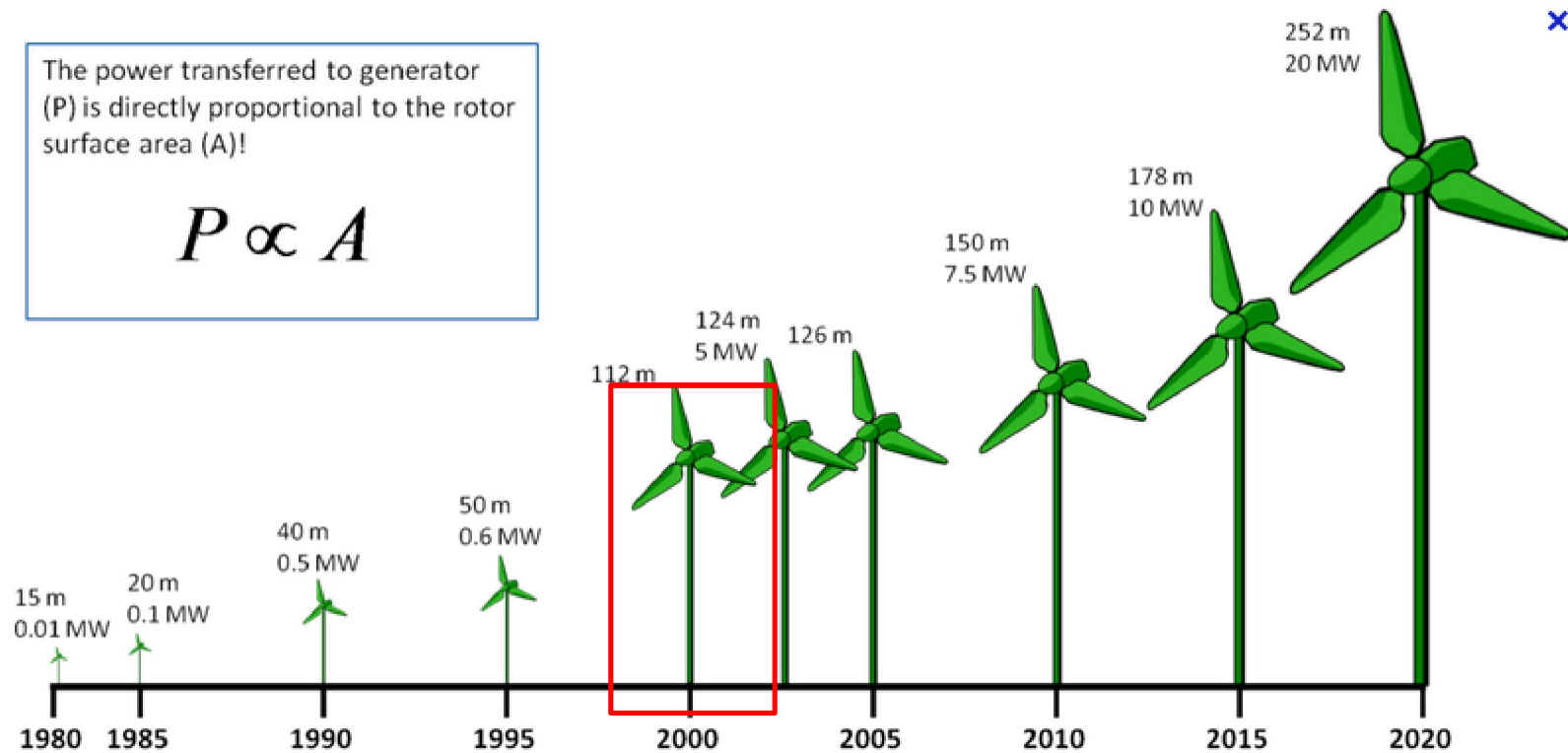
Aerogerador Instalado em Água Doce

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%

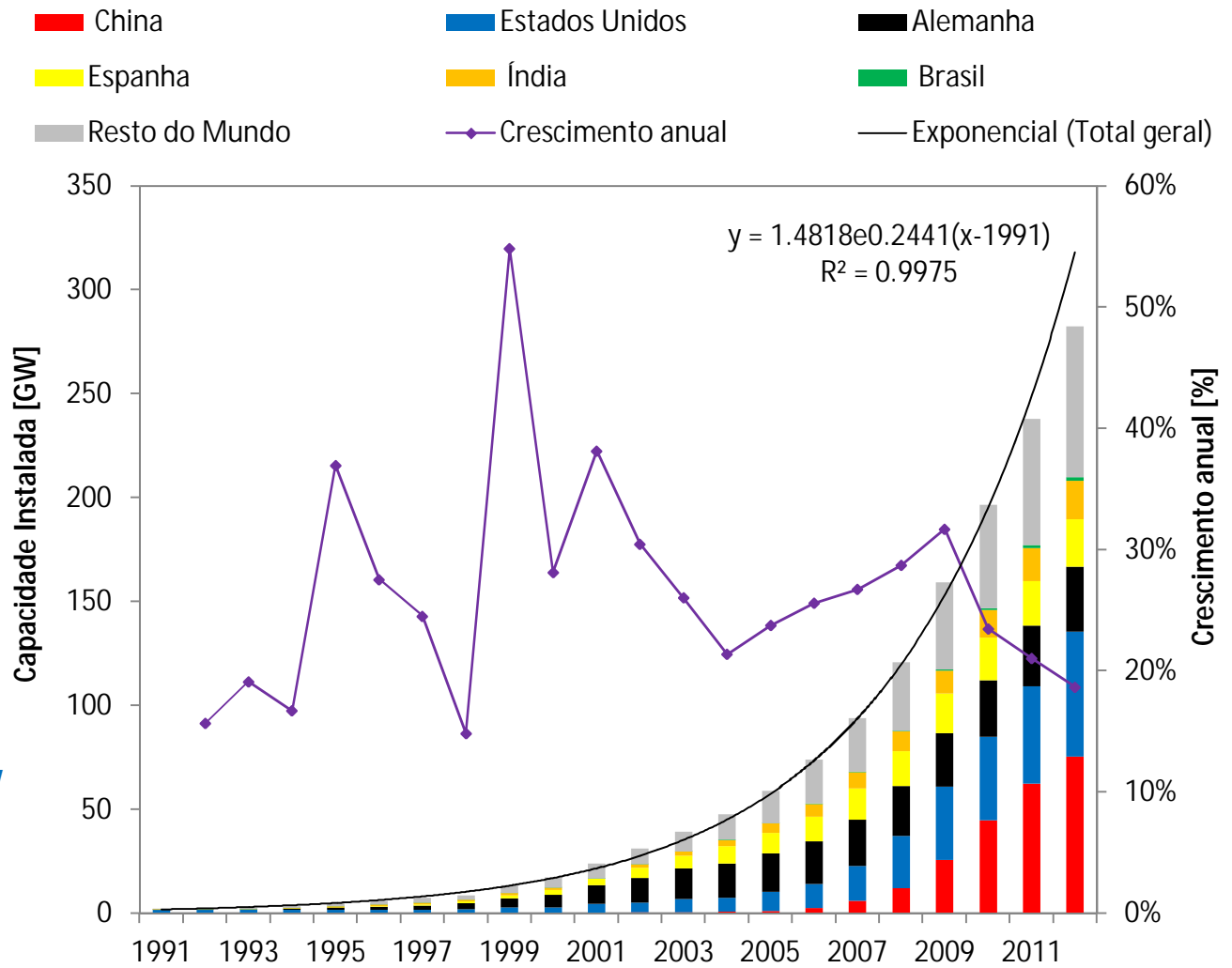
Final de 2012:

Potência: 282 GW

Aerogeradores: 225 mil

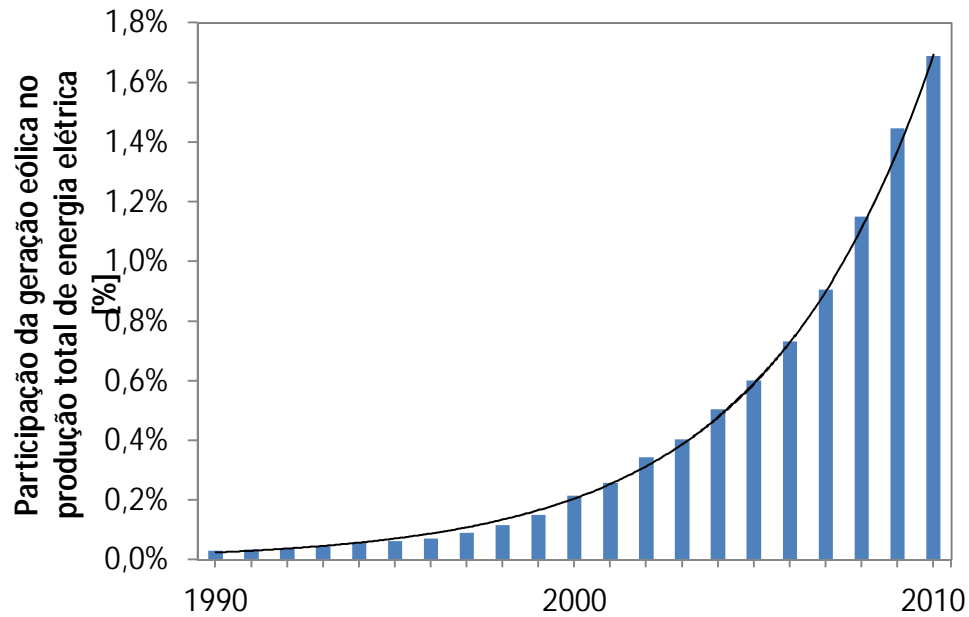
Ranking: China, Estados Unidos, Alemanha, Espanha e Índia (75% do total)

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



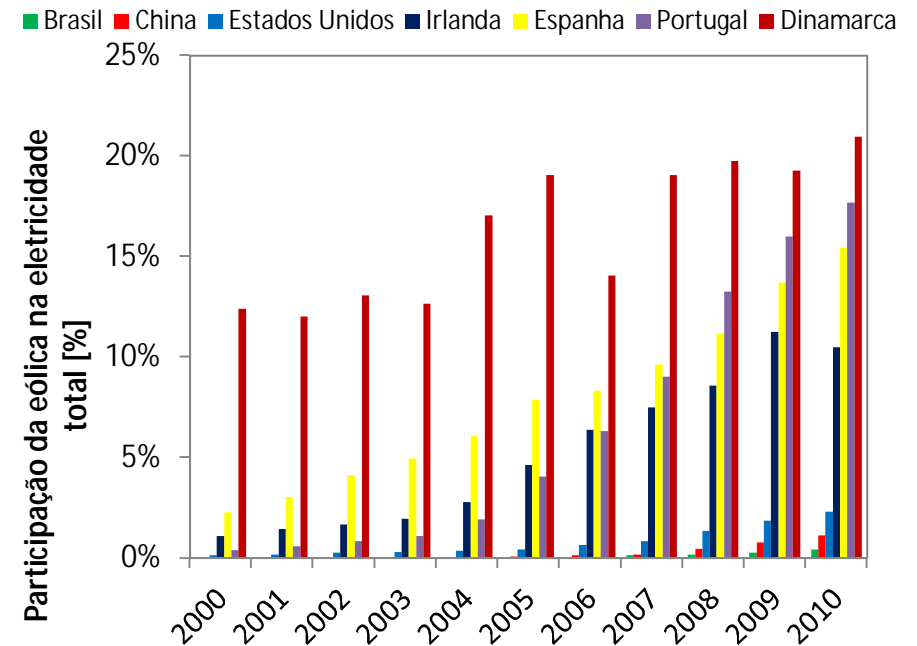
Geração Eólicoelétrica

Participação na geração total (EIA)

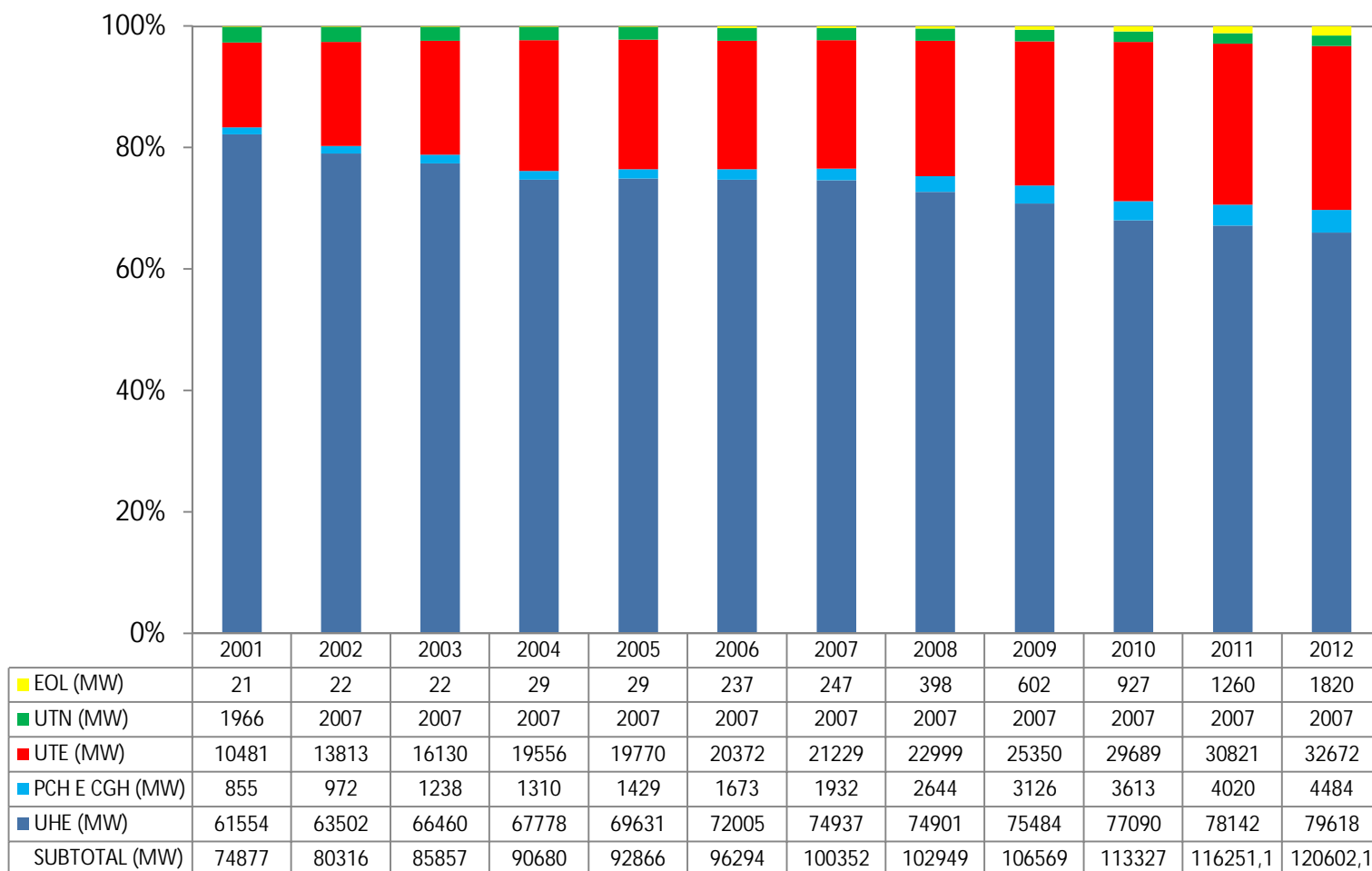


2012 (GWEC e EPE):

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

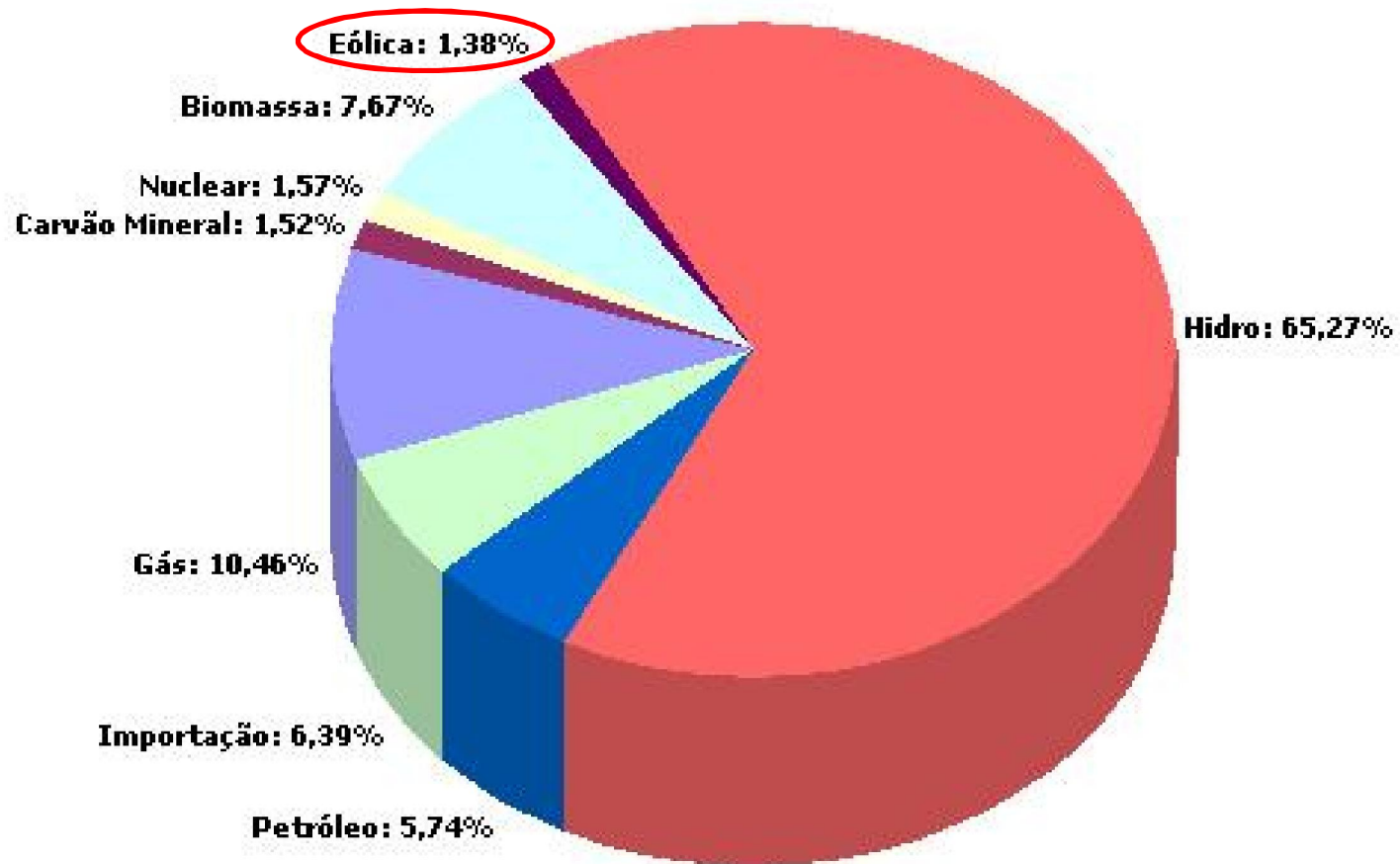


Evolução da Matriz Elétrica Nacional



ENERGIA EÓLICA: BRASIL

Fontes de Energia Exploradas para Geração de Energia Elétrica



Capacidade Instalada

Operação:

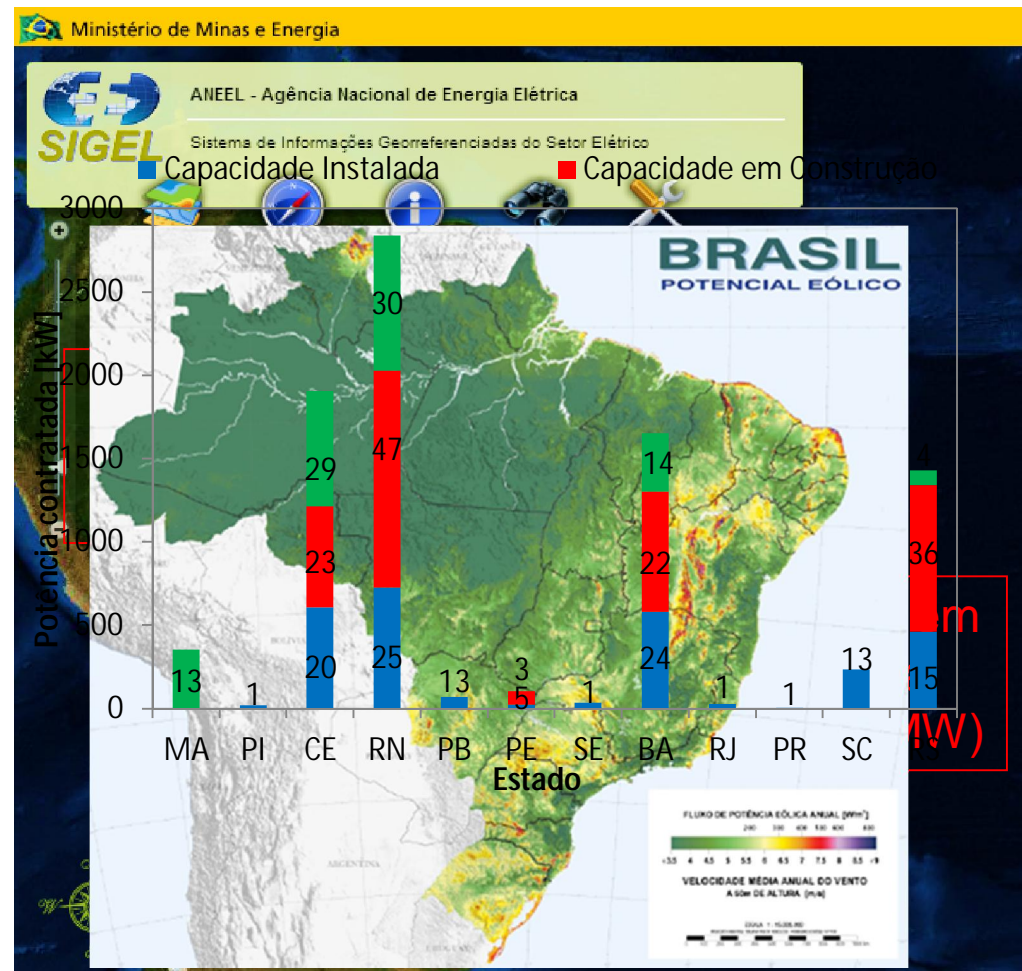
Total: 125 GW (2983 usinas)
Eólica: 2,1 GW (103 usinas) 2%
SC: 238,9 MW

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%

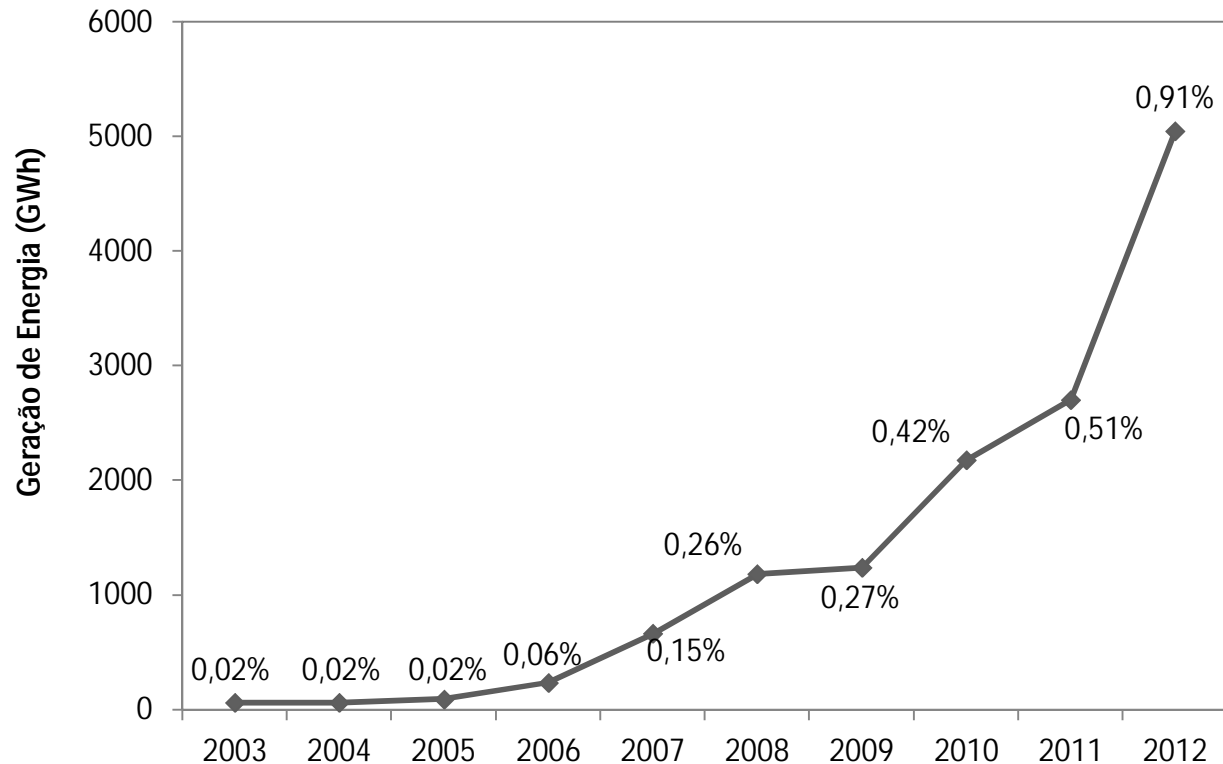


Geração Eólicoelétrica

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

ENERGIA EÓLICA: BRASIL

Evolução do preço da energia eólica no Brasil

•2004 – PROINFA

R\$ 270 /MWh

•2009 – Leilão de reserva (competividade)

R\$ 148/MWh

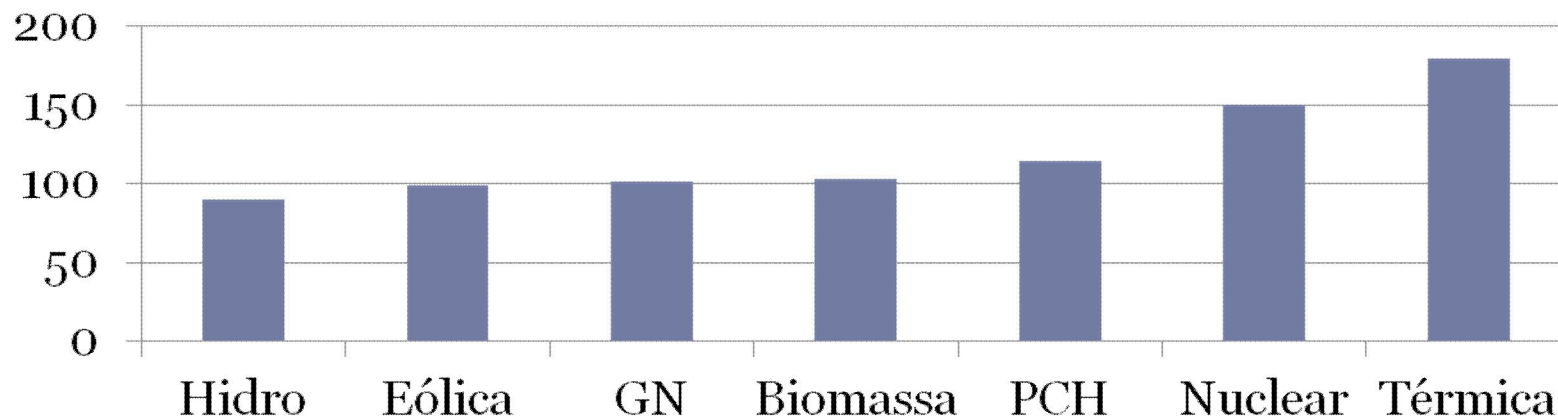
•2010 – Leilão de reserva (consolidação)

R\$ 122 /MWh

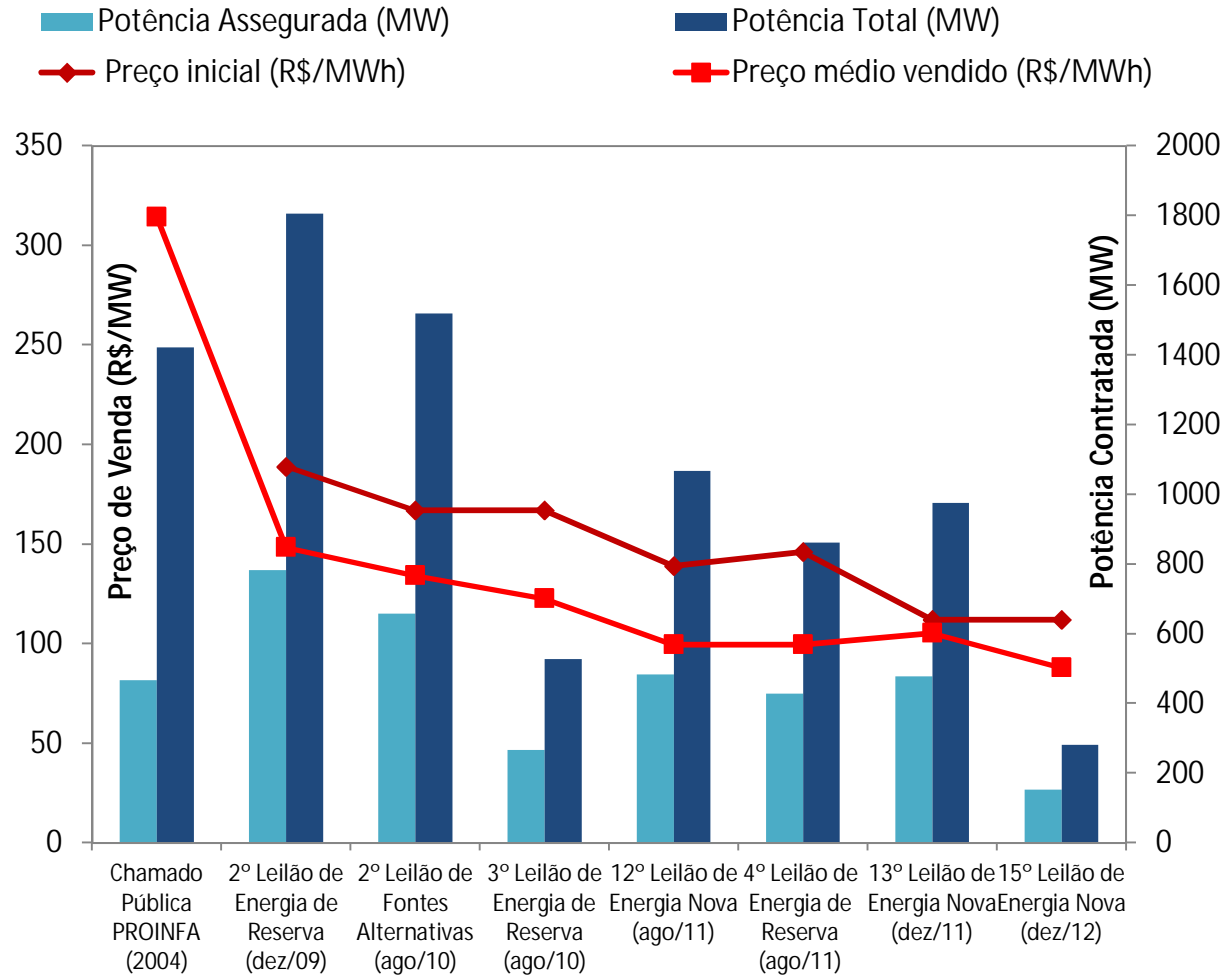
•2011 – Leilões A-5 e A-3 (domínio)

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
TOTAL	259,20

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

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
TOTAL	1.351,20

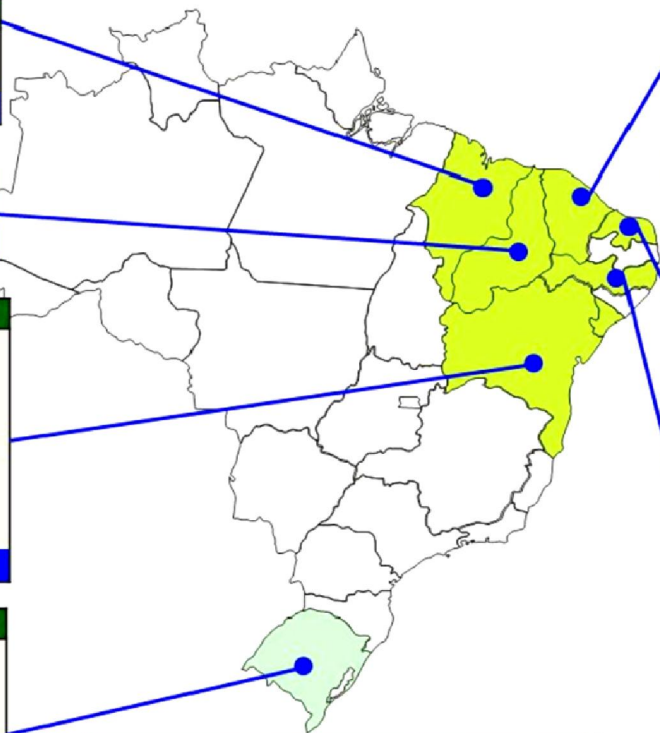
Montante Contratado	[MW]
2º LFA/2010 (2012)	226,20
3º LER/2010 (2013)	20,00
12º LEN A-3/2011 (2013)	492,00
4º LER/2011 (2014)	132,40
13º LEN A-5/2011 (2015)	119,60
14º LEN A-5/2012 (2017)	28,00
TOTAL	1.018,20

SIN	[MW]
TOTAL	6.399,50
240 EMPREENDIMENTOS	

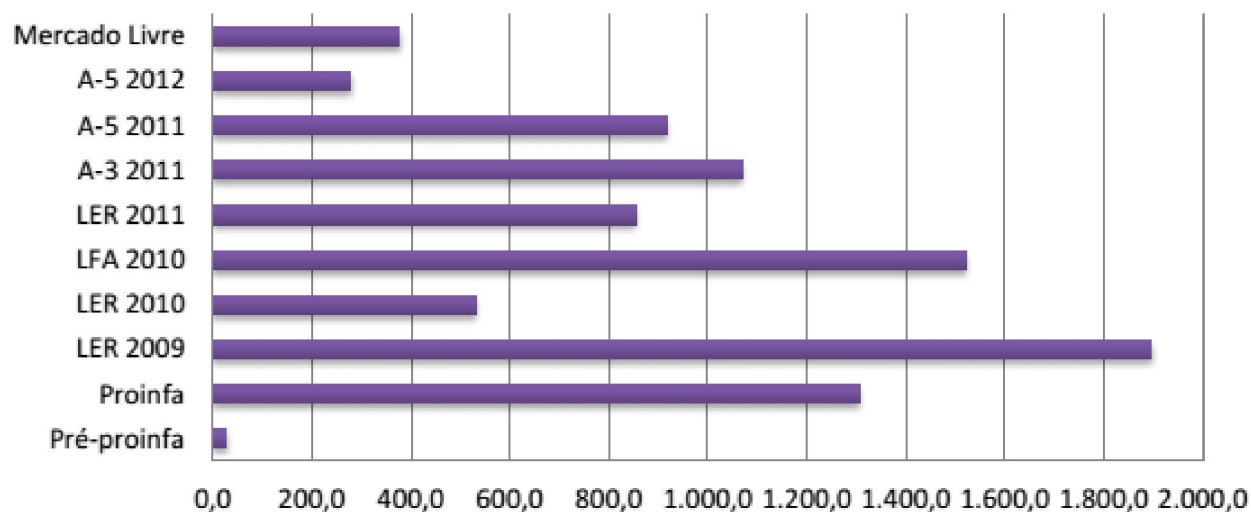
Montante Contratado	[MW]
2º LER/2009 (2013)	475,50
2º LFA/2010 (2013)	150,00
12º LEN A-3/2011 (2014)	103,60
4º LER/2011 (2014)	174,50
13º LEN A-5/2011 (2015)	328,00
TOTAL	1.231,60

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
TOTAL	2.385,70

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



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 200m²
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

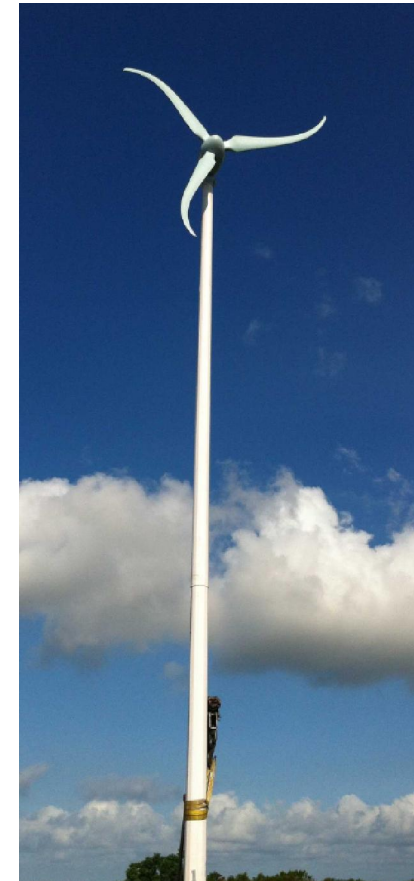
Fonte: LEPTEN/UFSC

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

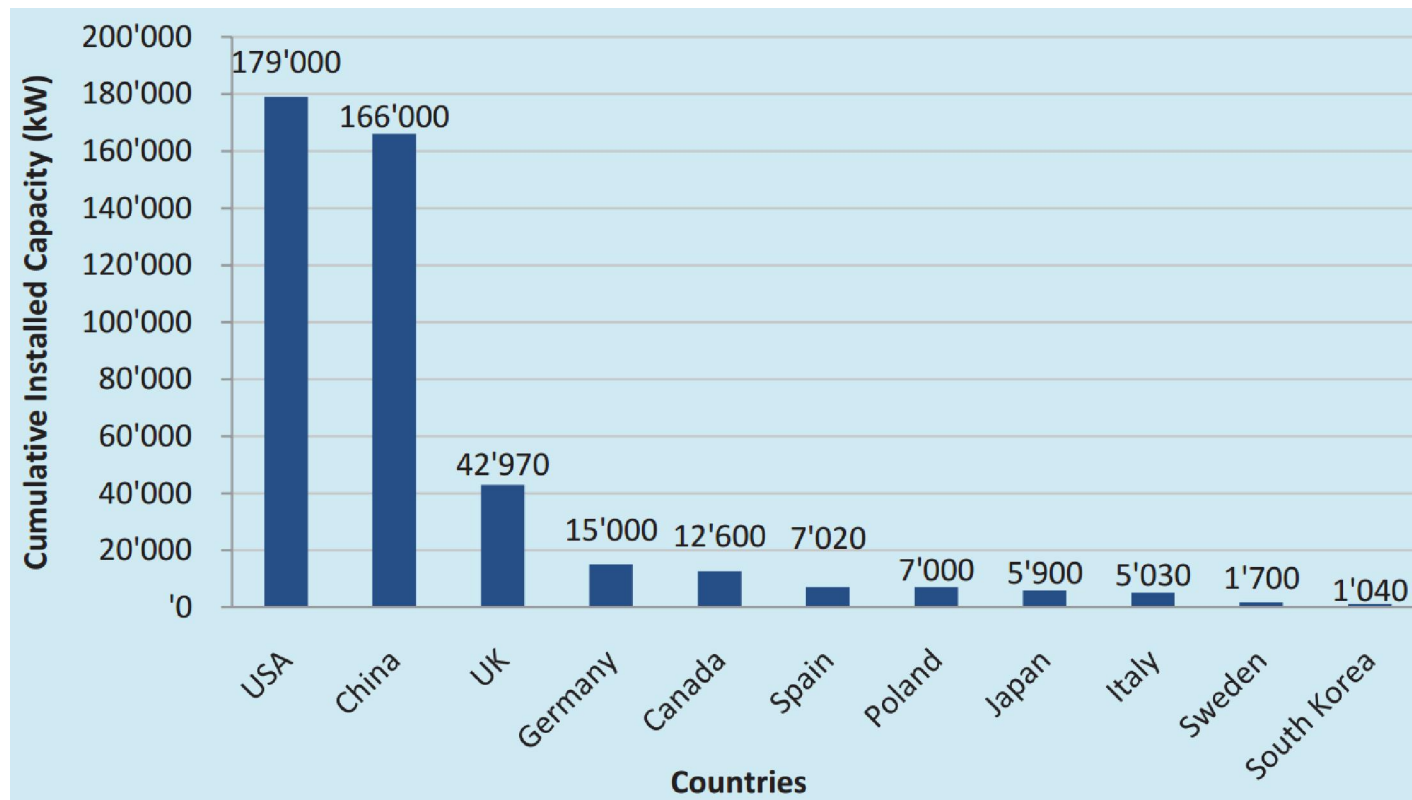
EUA e China são líderes com, respectivamente,
40% e 37% da capacidade instalada

Mais de 300 fabricantes de Pequenos Aerogeradores hoje

Contudo, pequenos aerogeradores representaram apenas,



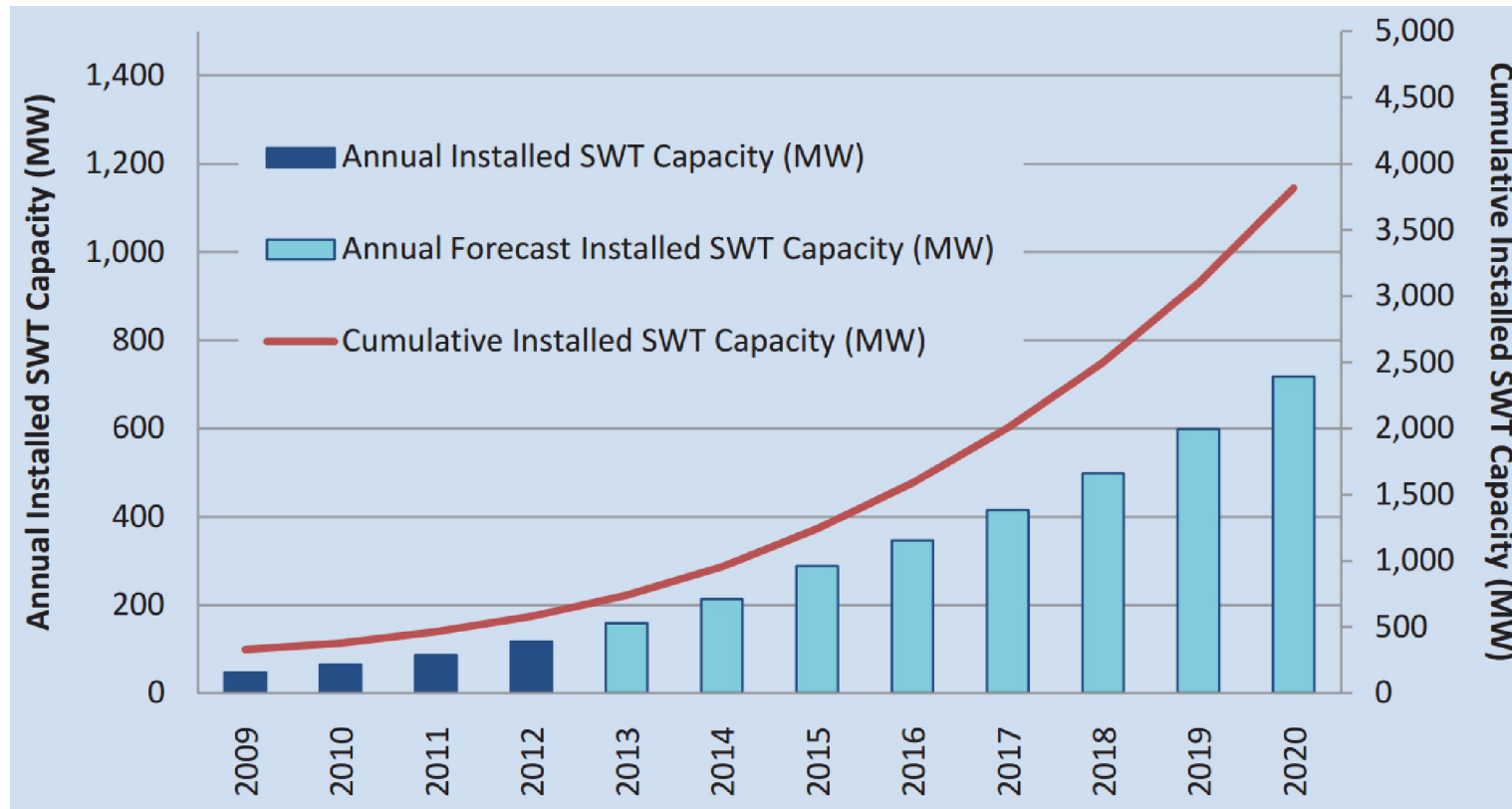
Ø Panorama Global: Capacidade Instalada por país em 2011



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%

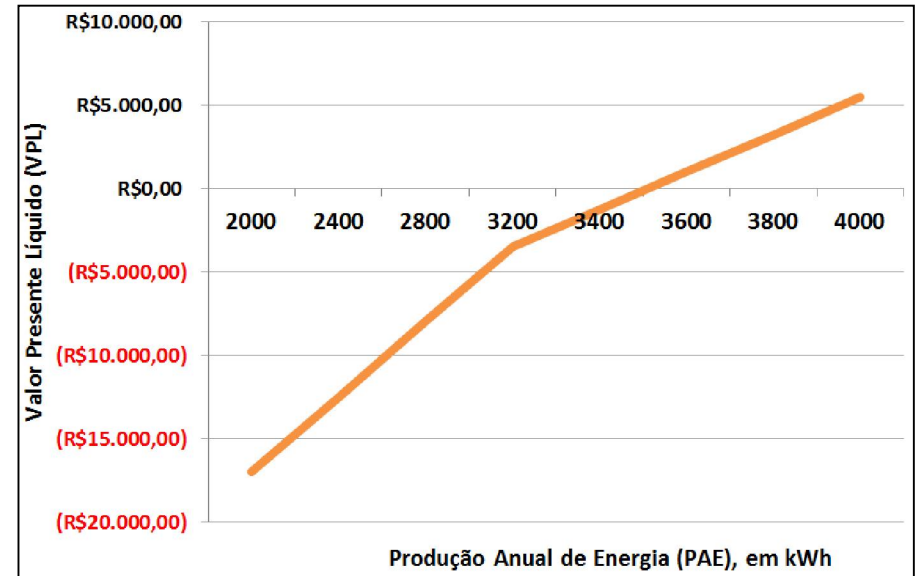
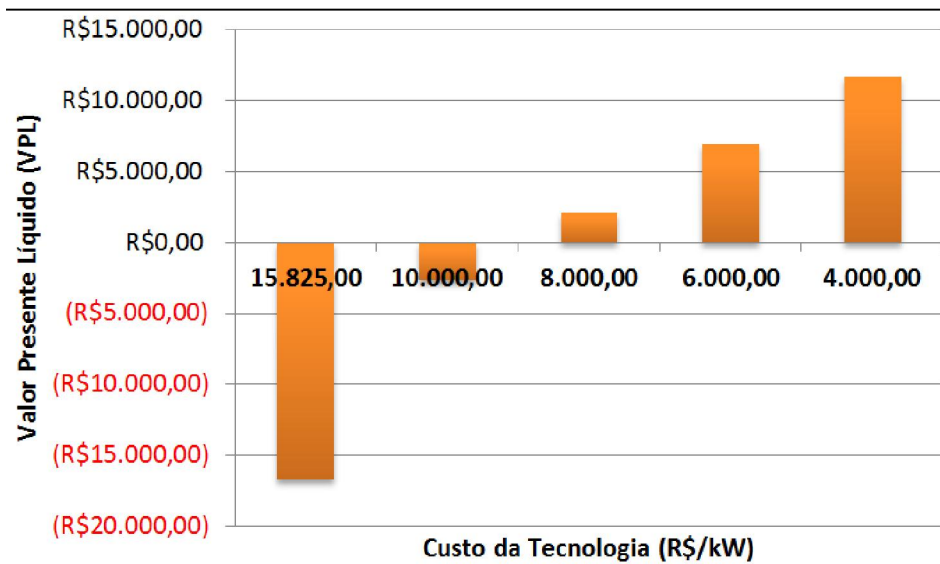
Validação dos Resultados (2 anos de operação)

	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):

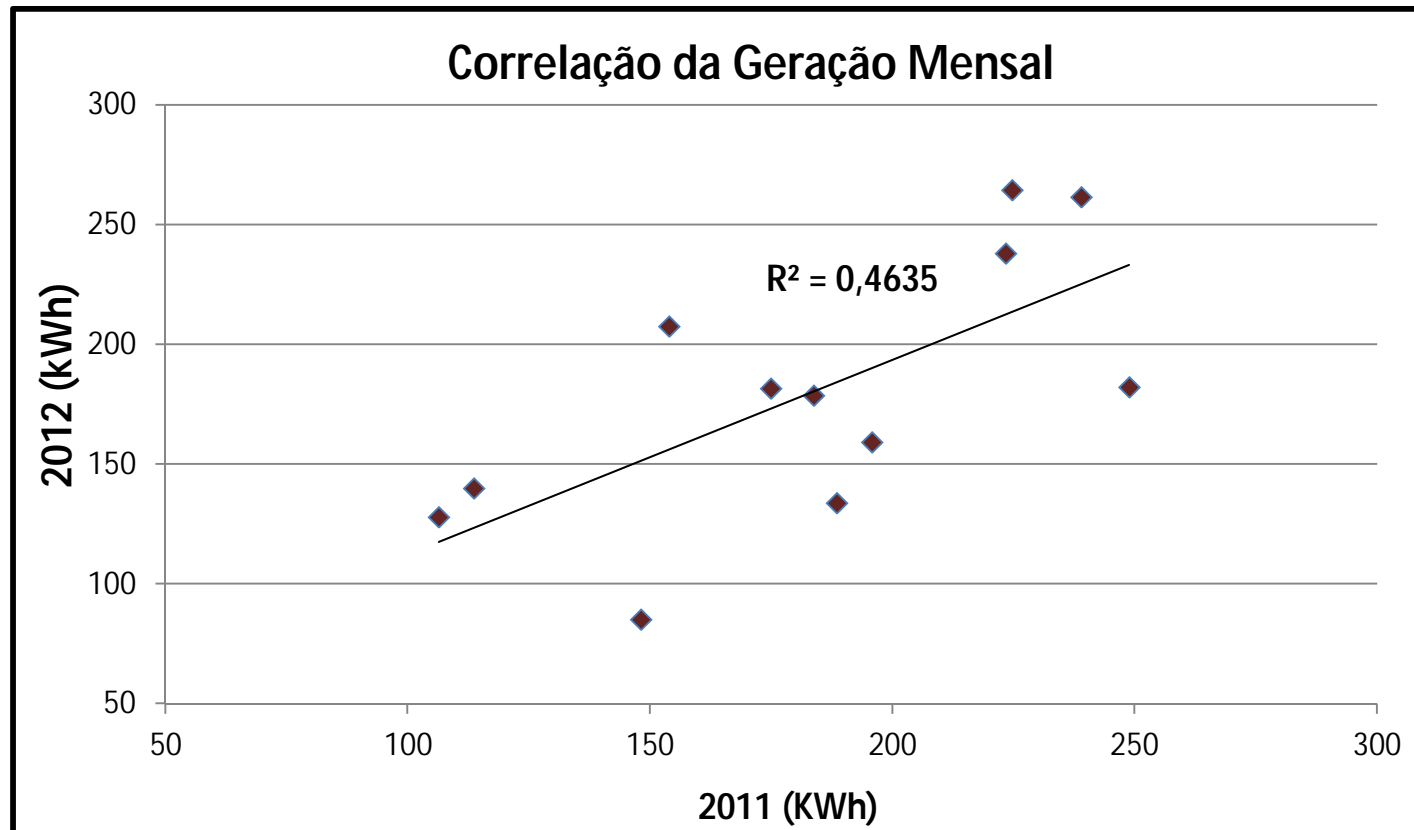


Custo Mundial Médio = R\$ 8900/kW

Fonte: WWEA, 2012

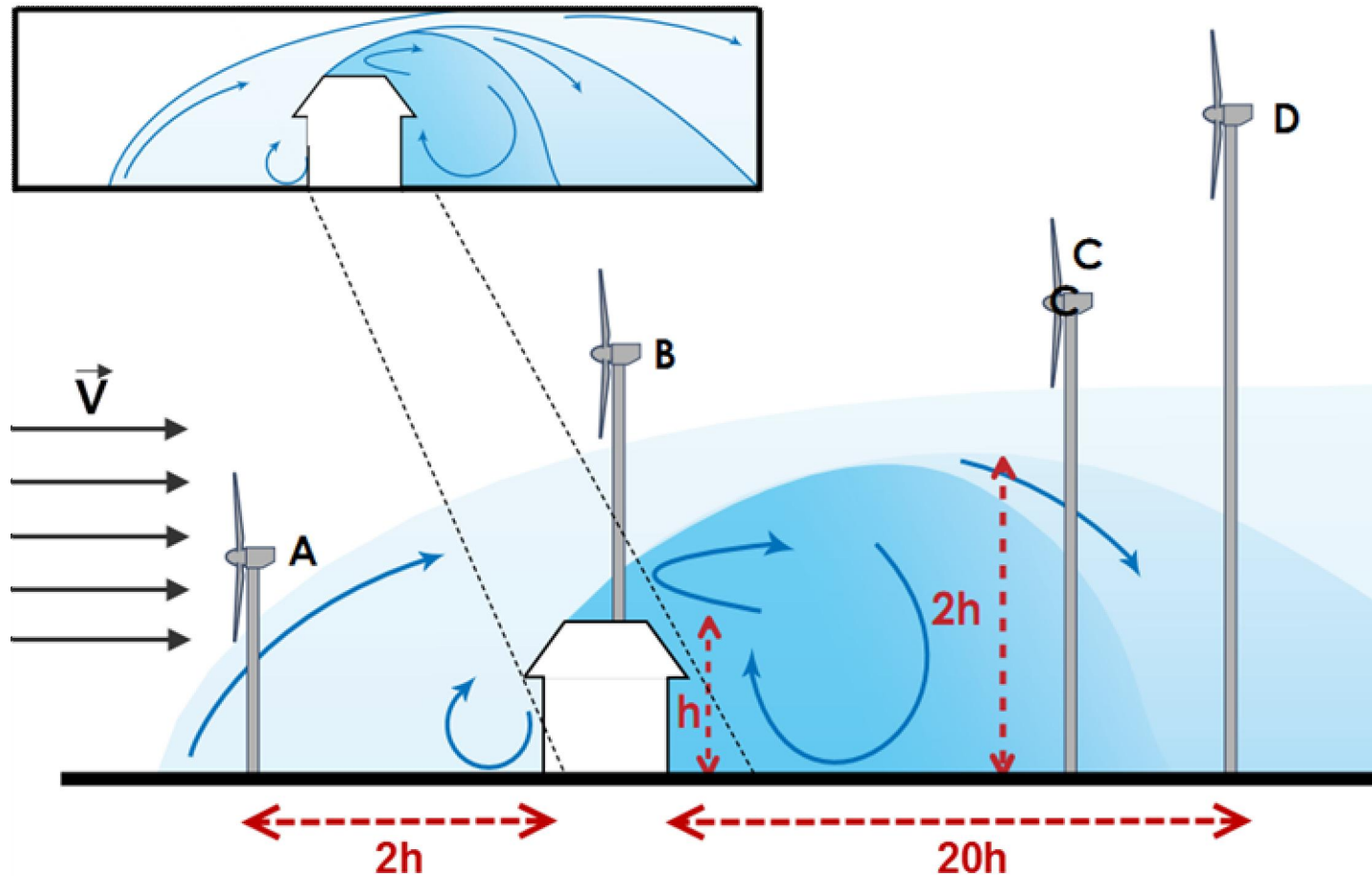
Custo Médio na China = R\$ 3200/kW

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

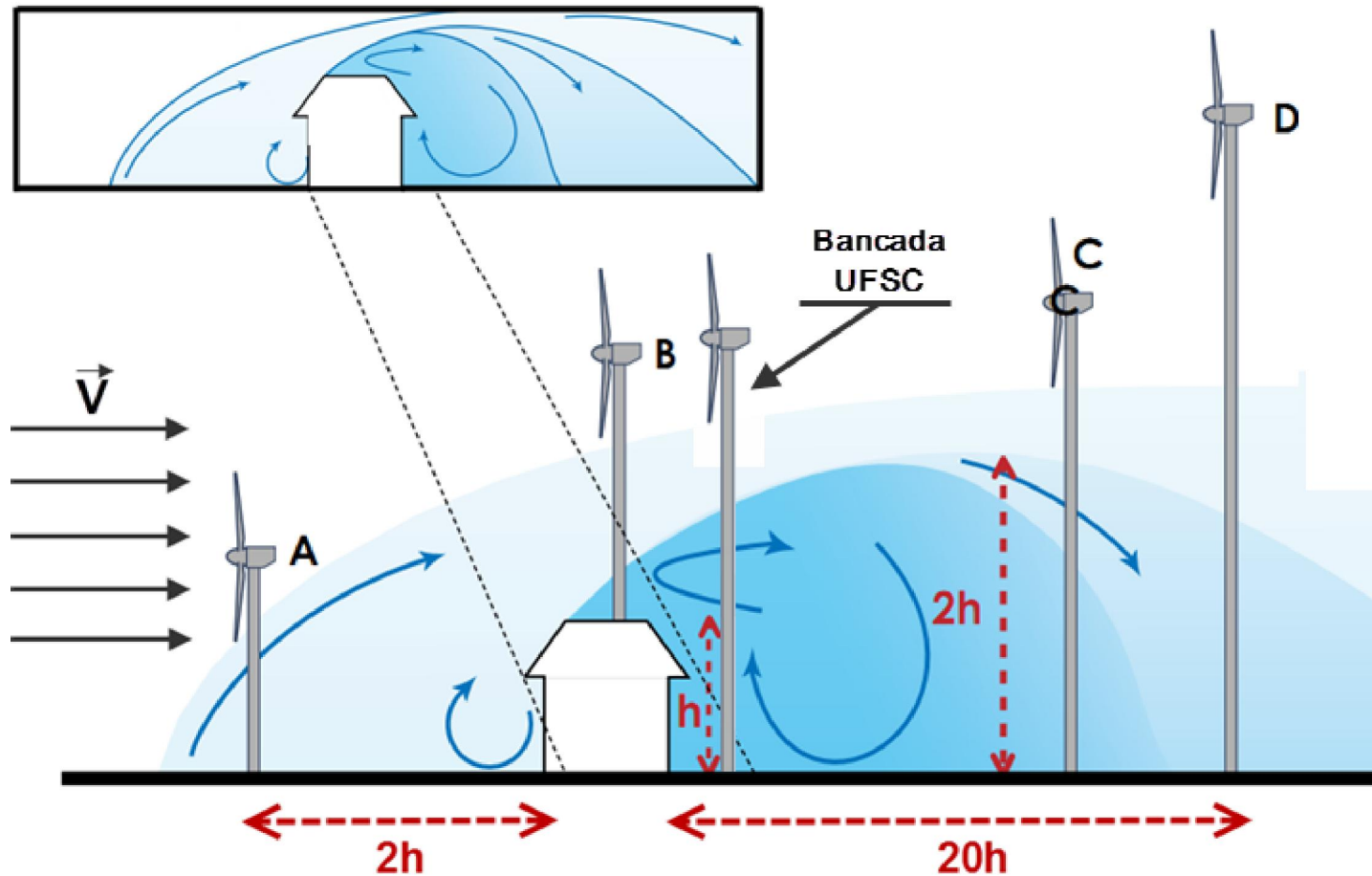


Micro e Mini Geração Eólica

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



LEPTEN

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



5. DESENVOLVIMENTO DE PROJETOS EÓLICOS

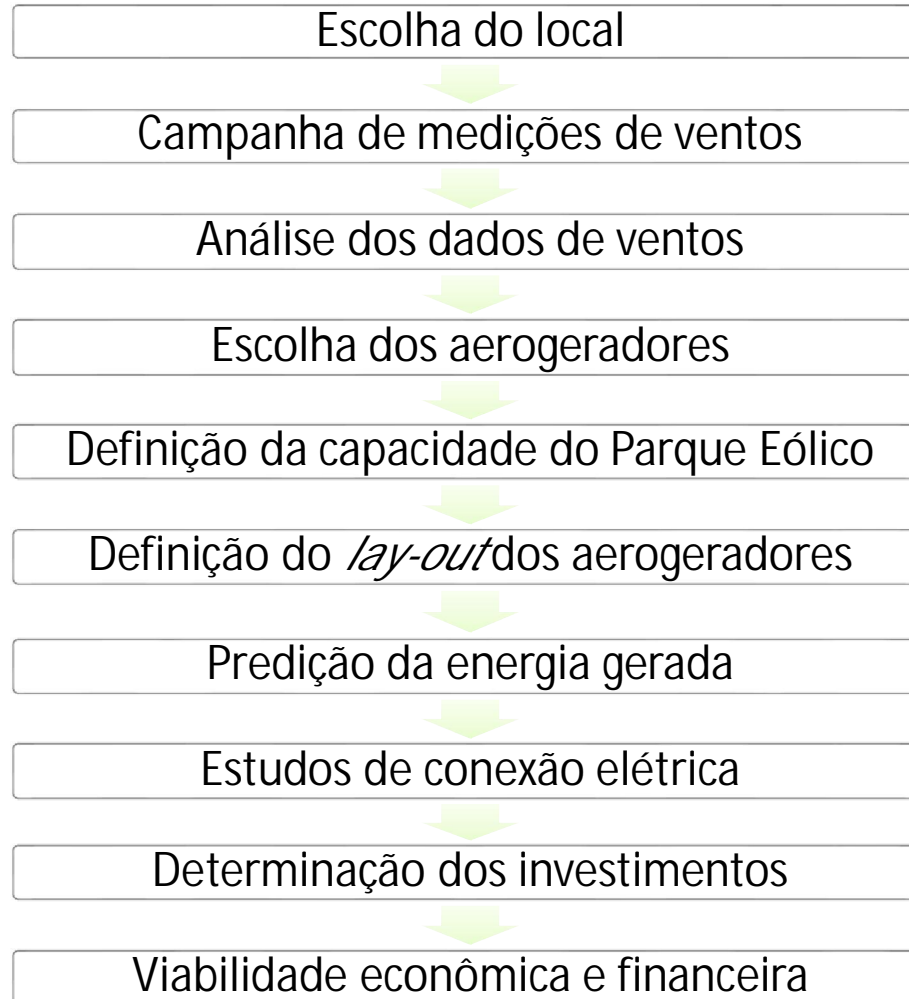
Local: Florianópolis, SC

Data: Outubro de 2013

Por: Leonardo Balvedi Damas

PROJETO EÓLICO: ETAPAS

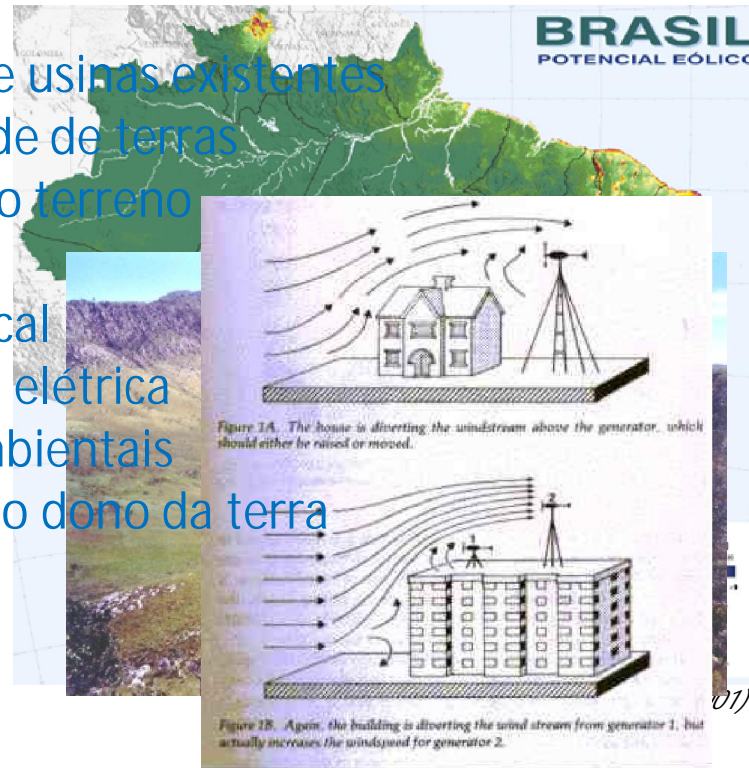
Estudos Técnicos



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

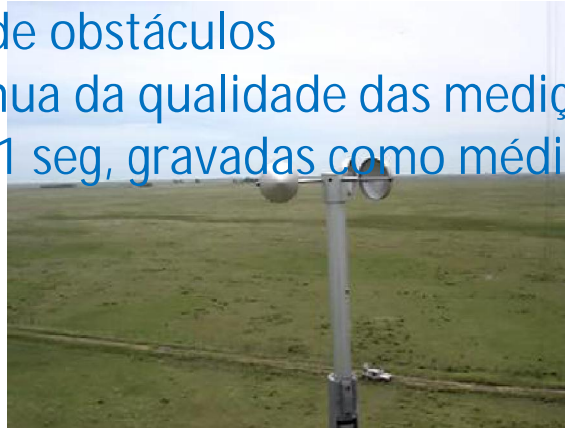
Estudos Técnicos

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



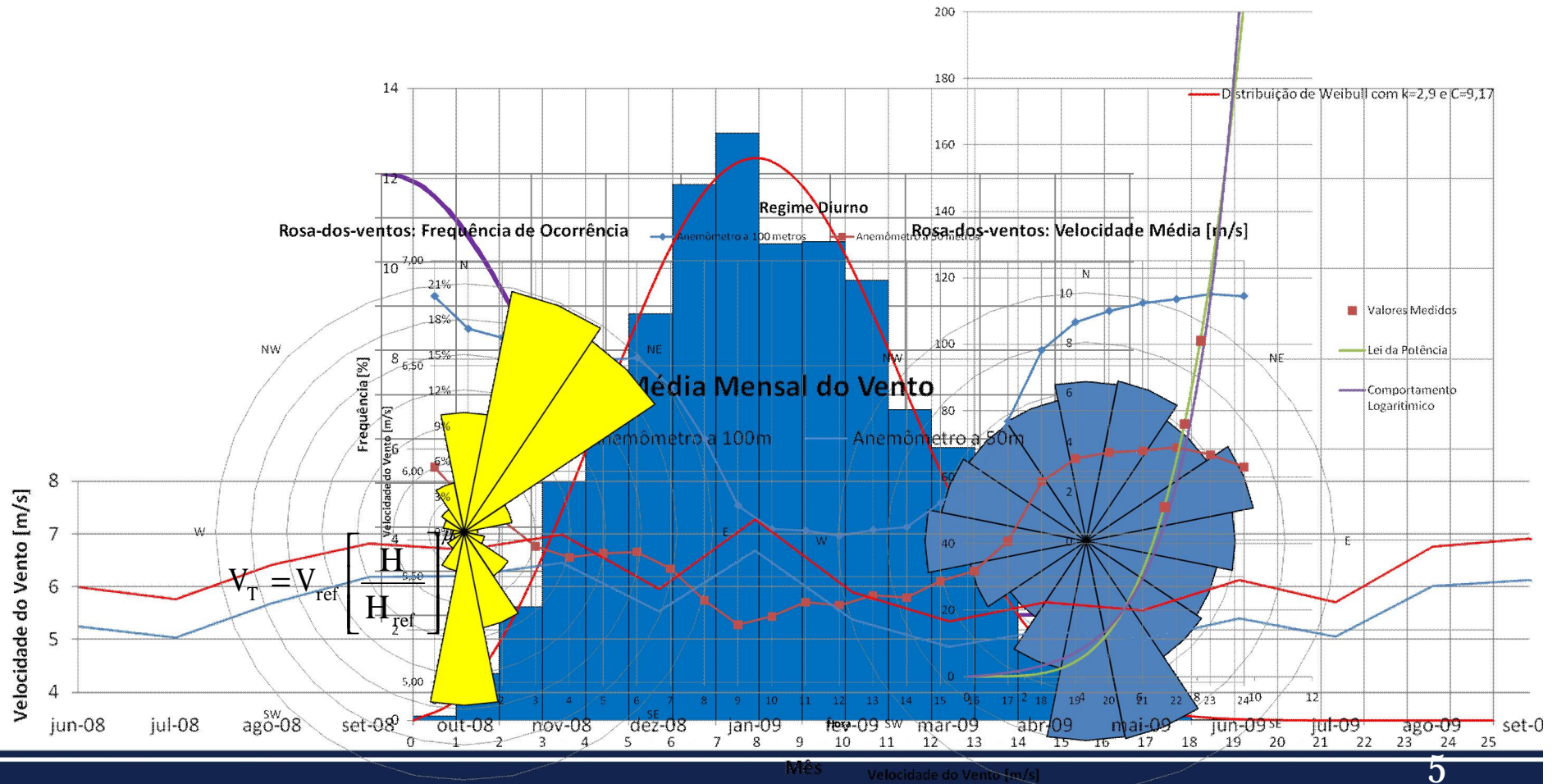
Sensor de direção

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:

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

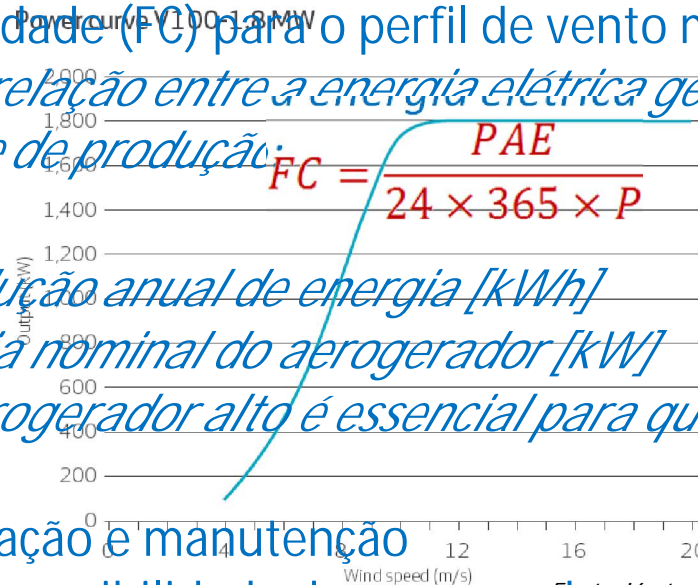
onde:

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



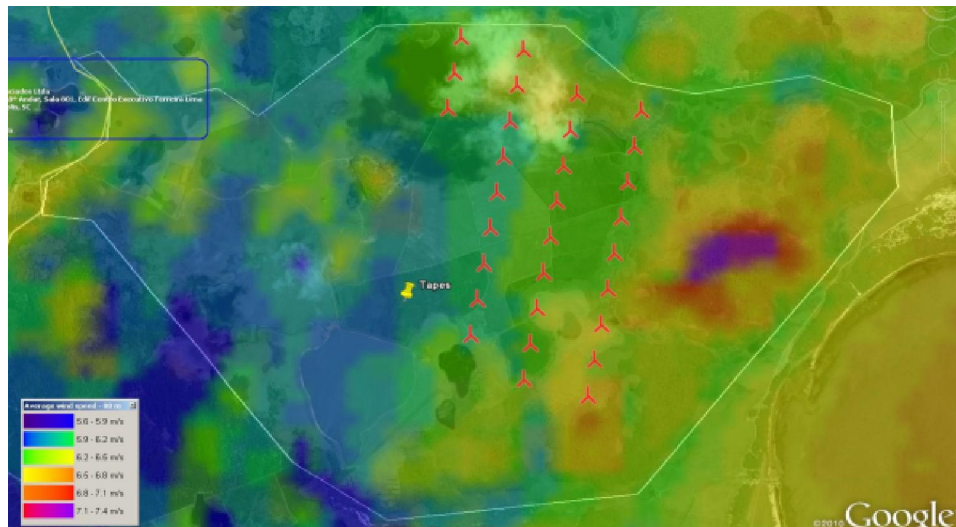
Fonte: Progresso Verde

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

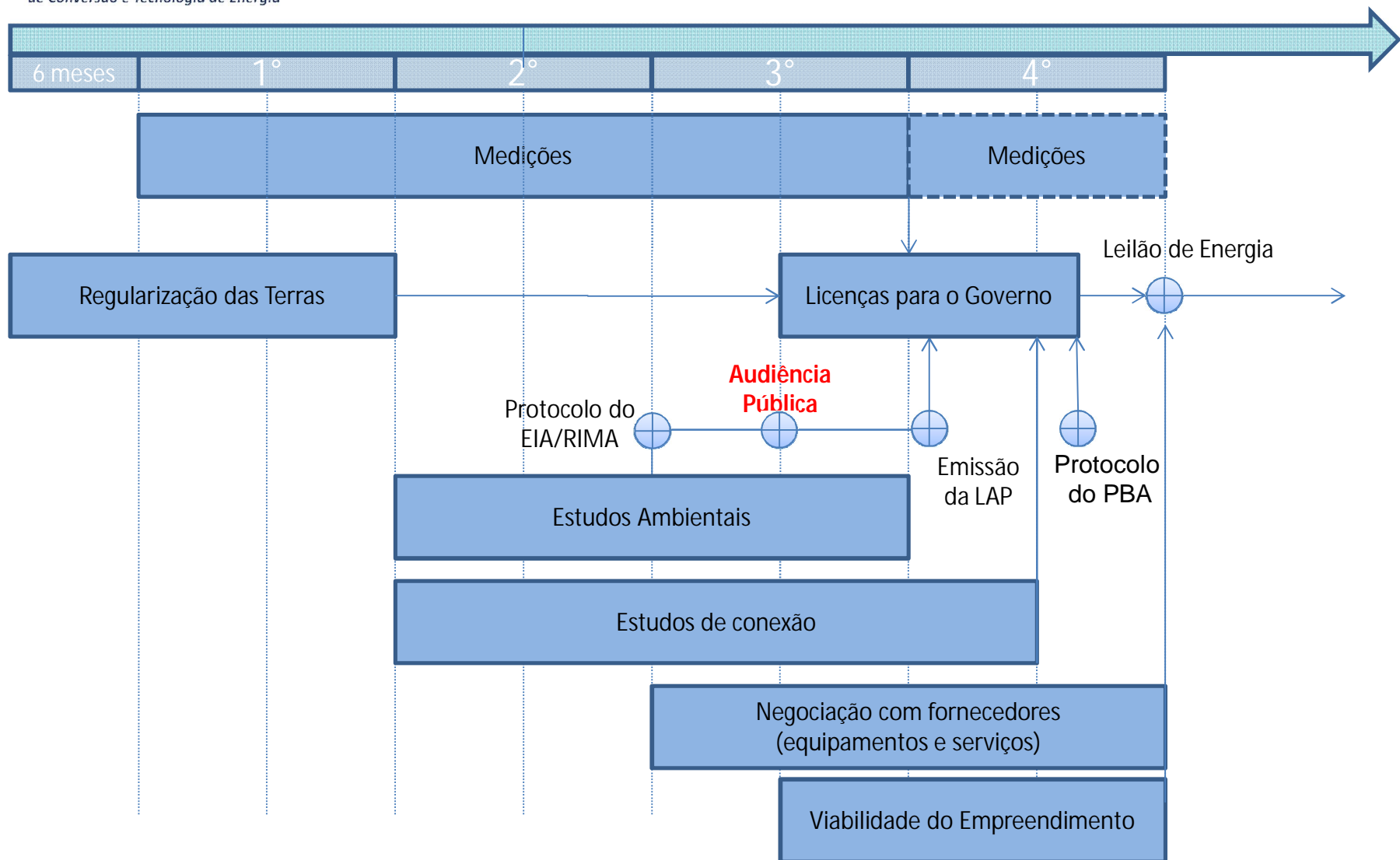
OPERAÇÃO

LO – Relatório
Comissionamento
IBAMA/OEA

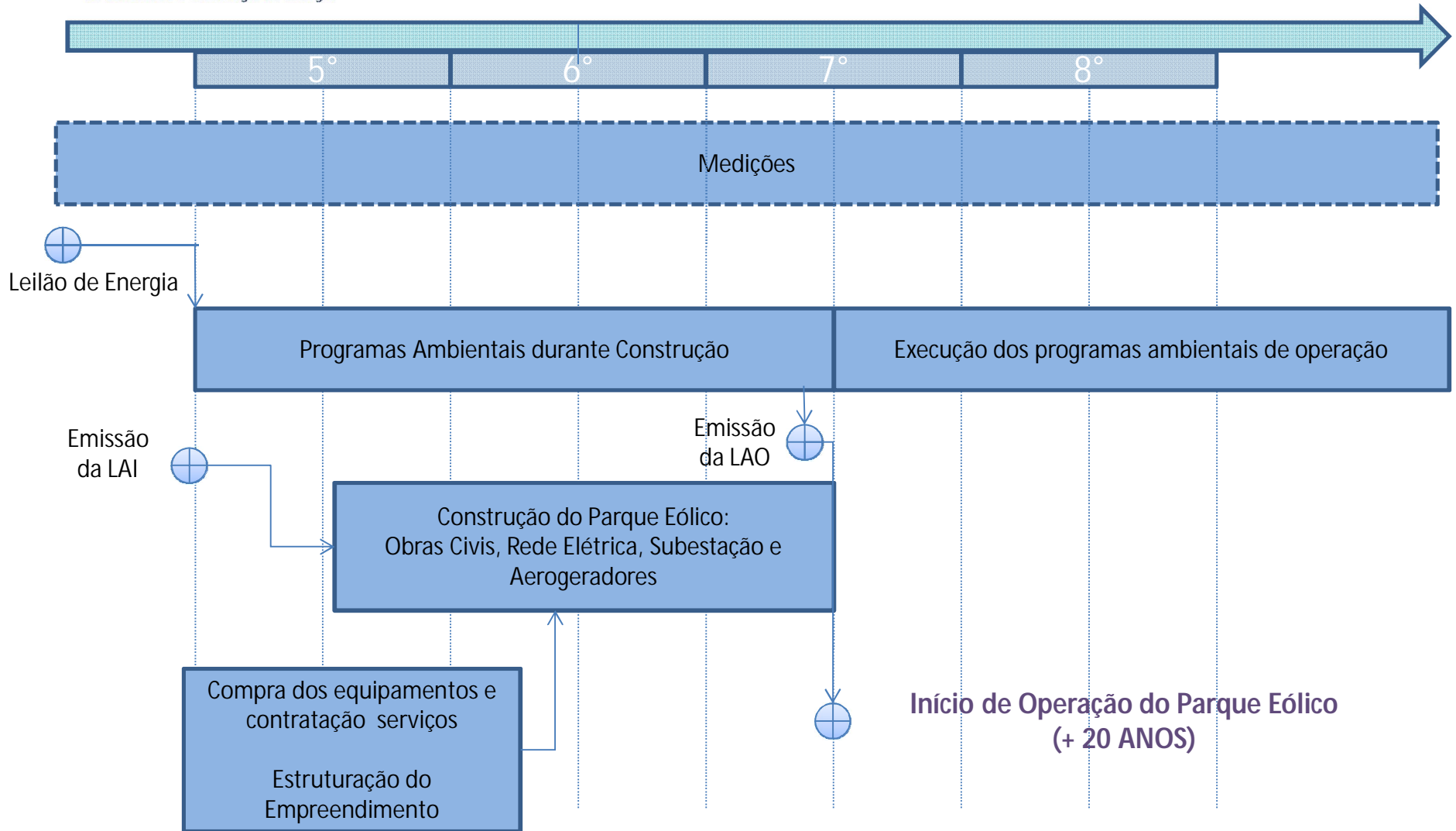


RENOVAÇÃO

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*



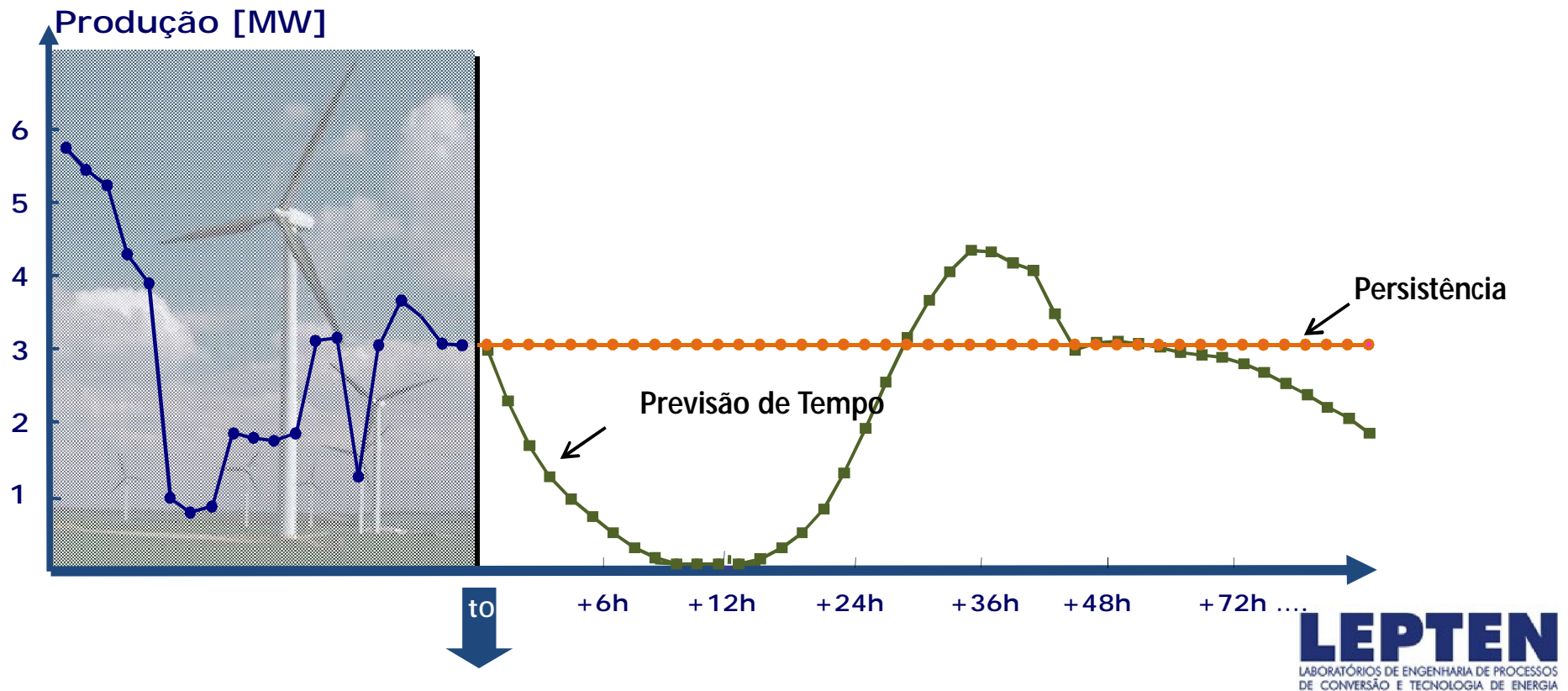
Departamento de
FÍSICA

Previsão Eólica de Curto Prazo

Tecnologias Disponíveis –

Reinaldo Haas (FSC/UFSC)

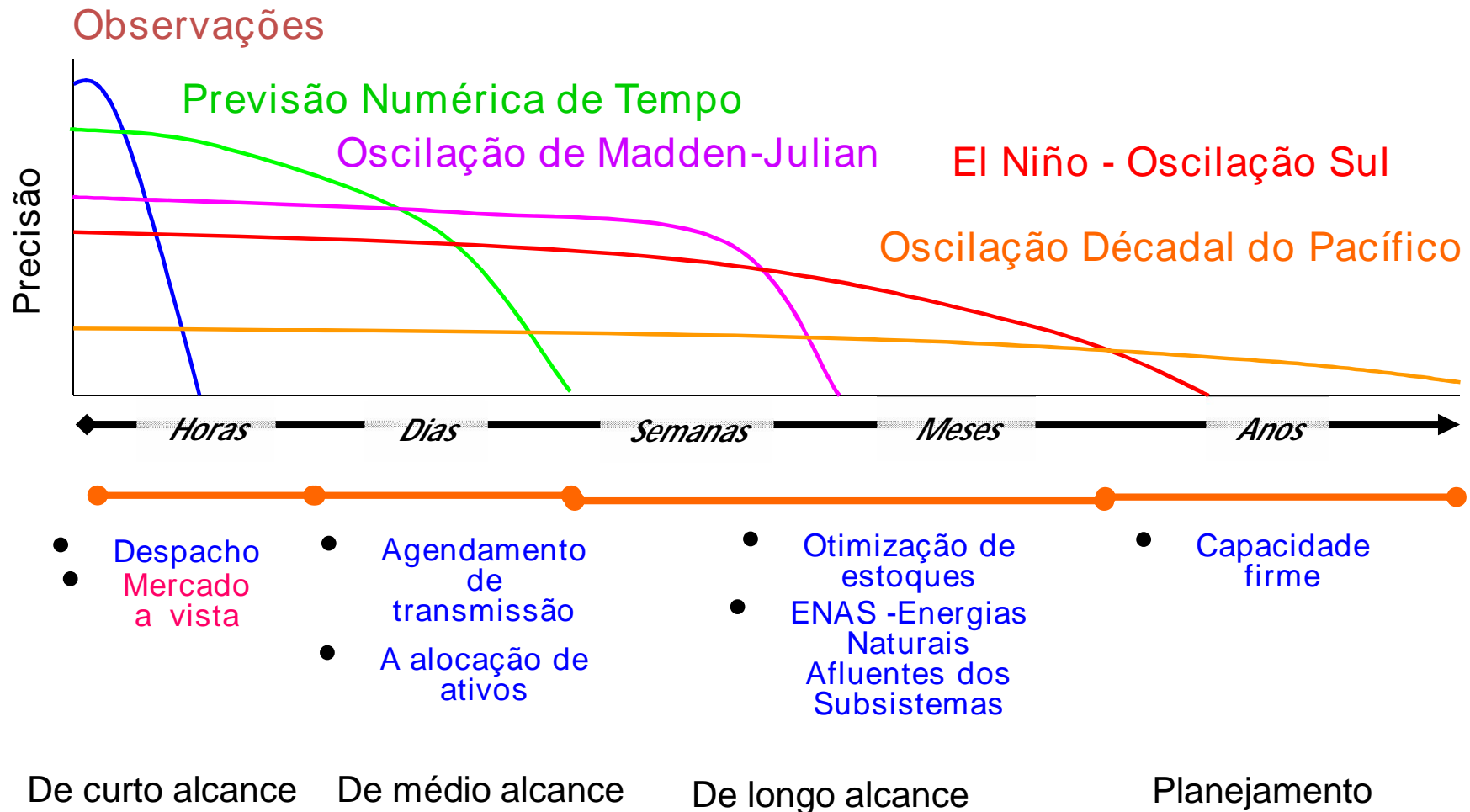
- Ø Previsão de geração eólica, baseado nas previsões do modelos de PNT- Previsão Numérica de Tempo:



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

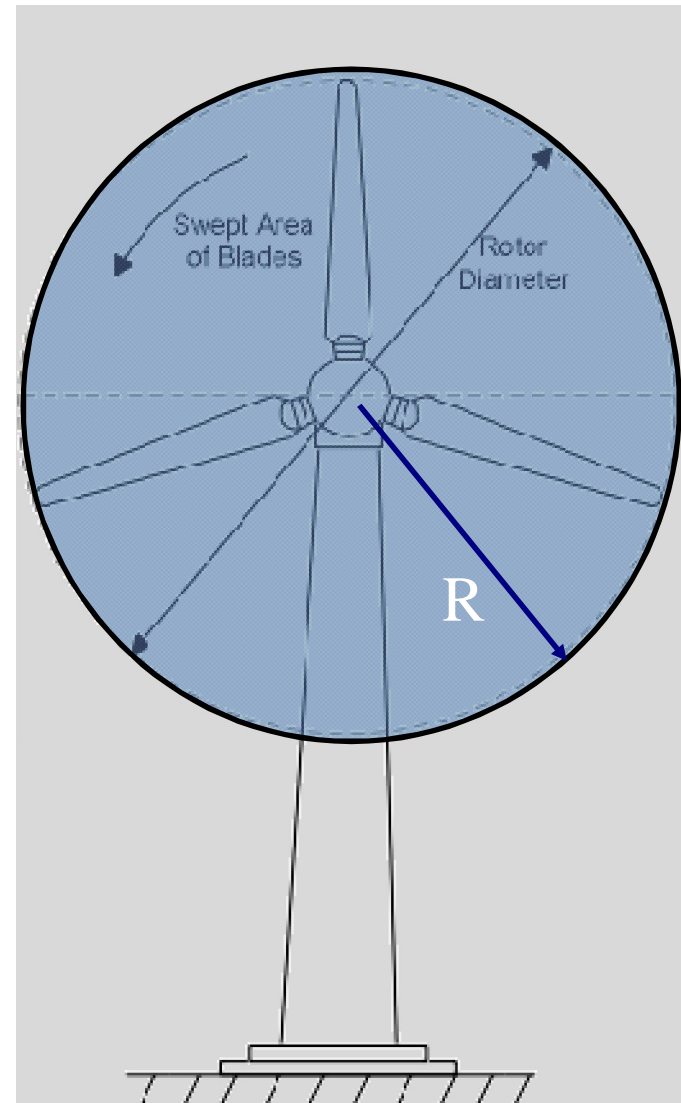
- Onde:

q ρ = densidade do ar,

q A = área varrida,

q V = velocidade do vento,

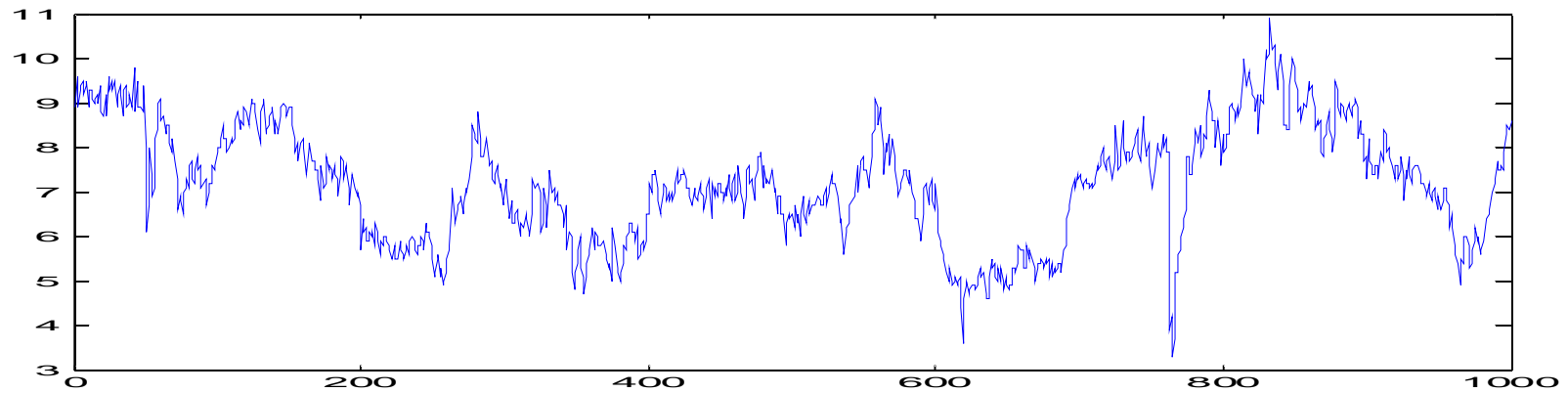
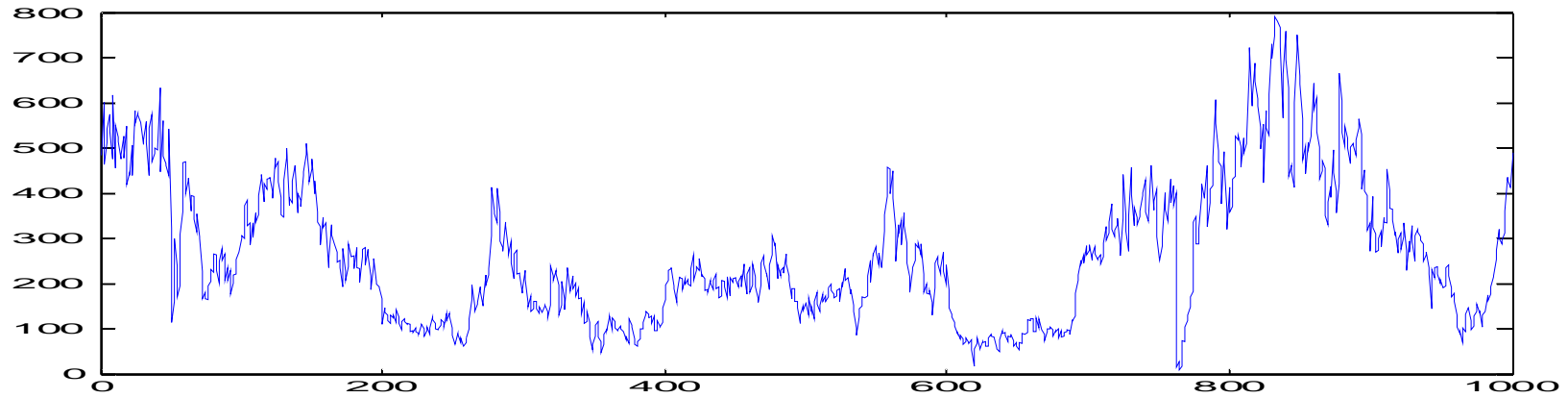
Área varrida: $A = \pi R^2$ é a área varrida pelo círculo do rotor (m^2).



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

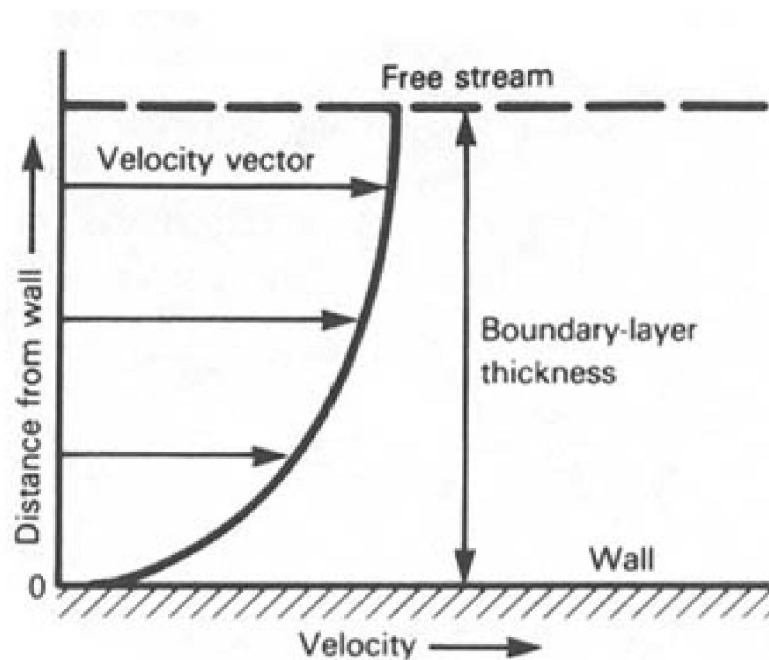


Efeito de Esteira Múltiplas

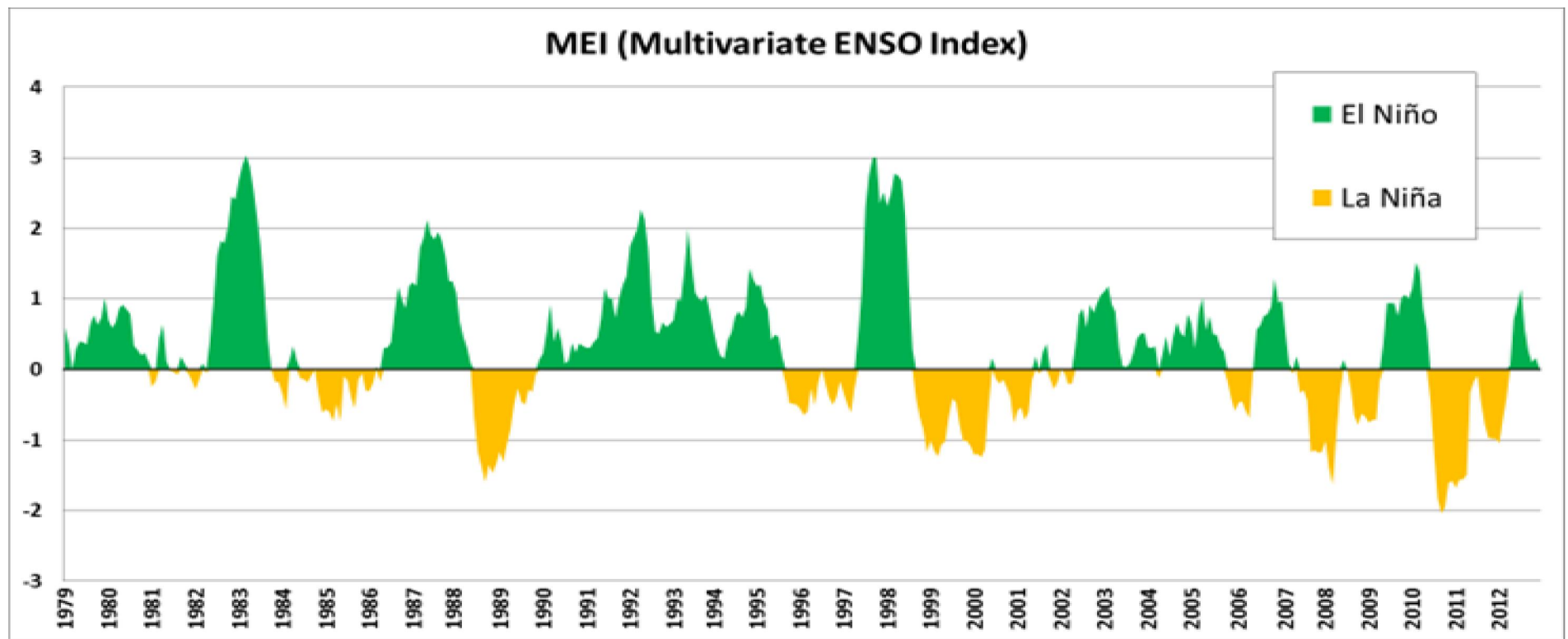


PROJETO P&D EÓLICA-UFSC

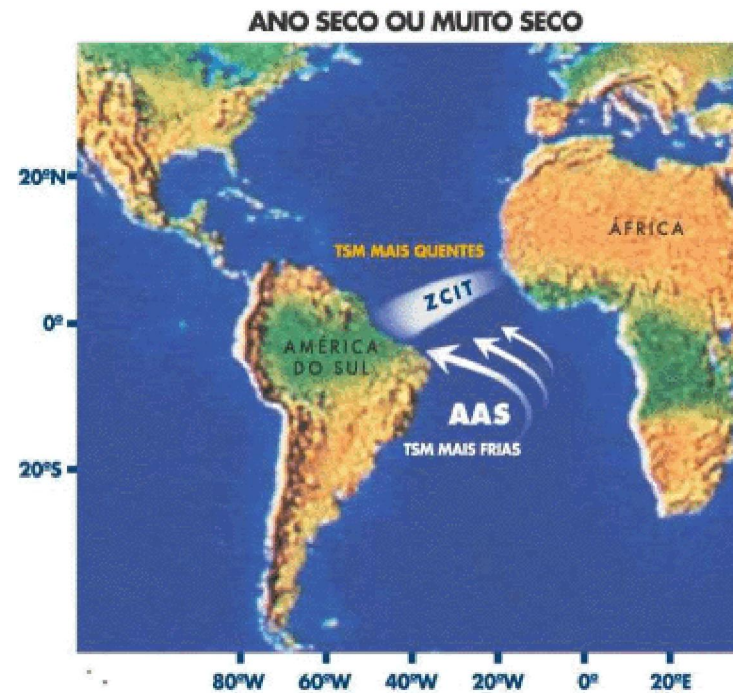
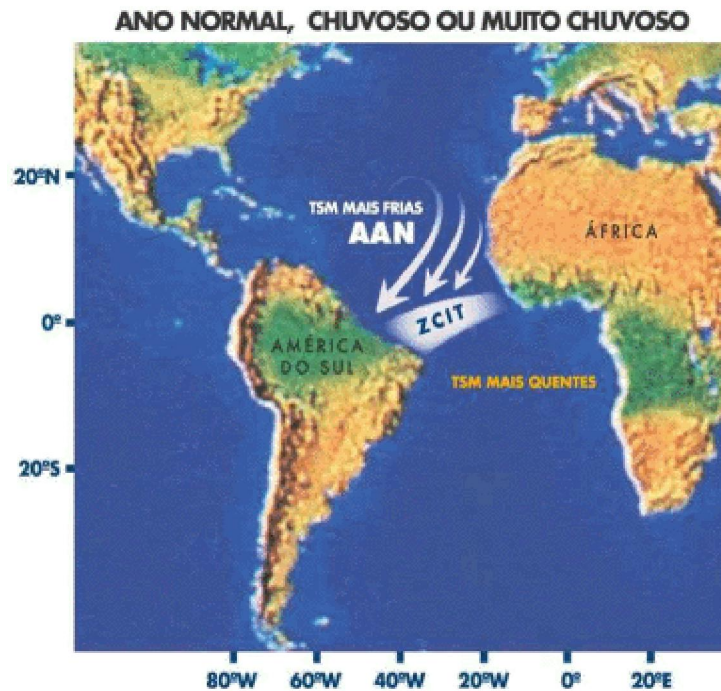
- Levantamento do **perfil completo do vento** em diferentes situações e locais, incluindo o efeito de esteira dos Aerogeradores, para validação dos modelos;



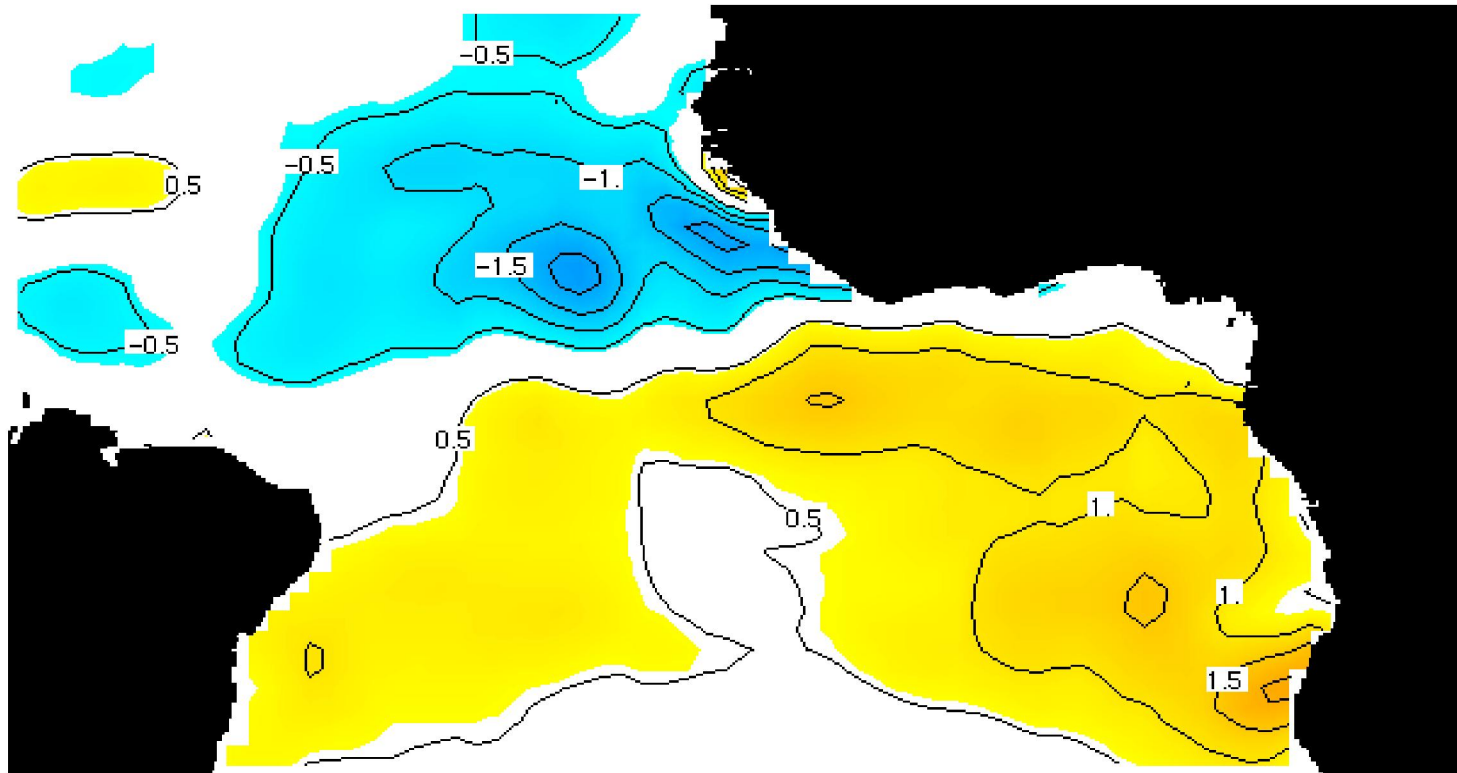
MEI (Multivariate ENSO Index)



Dipolo do Atlântico

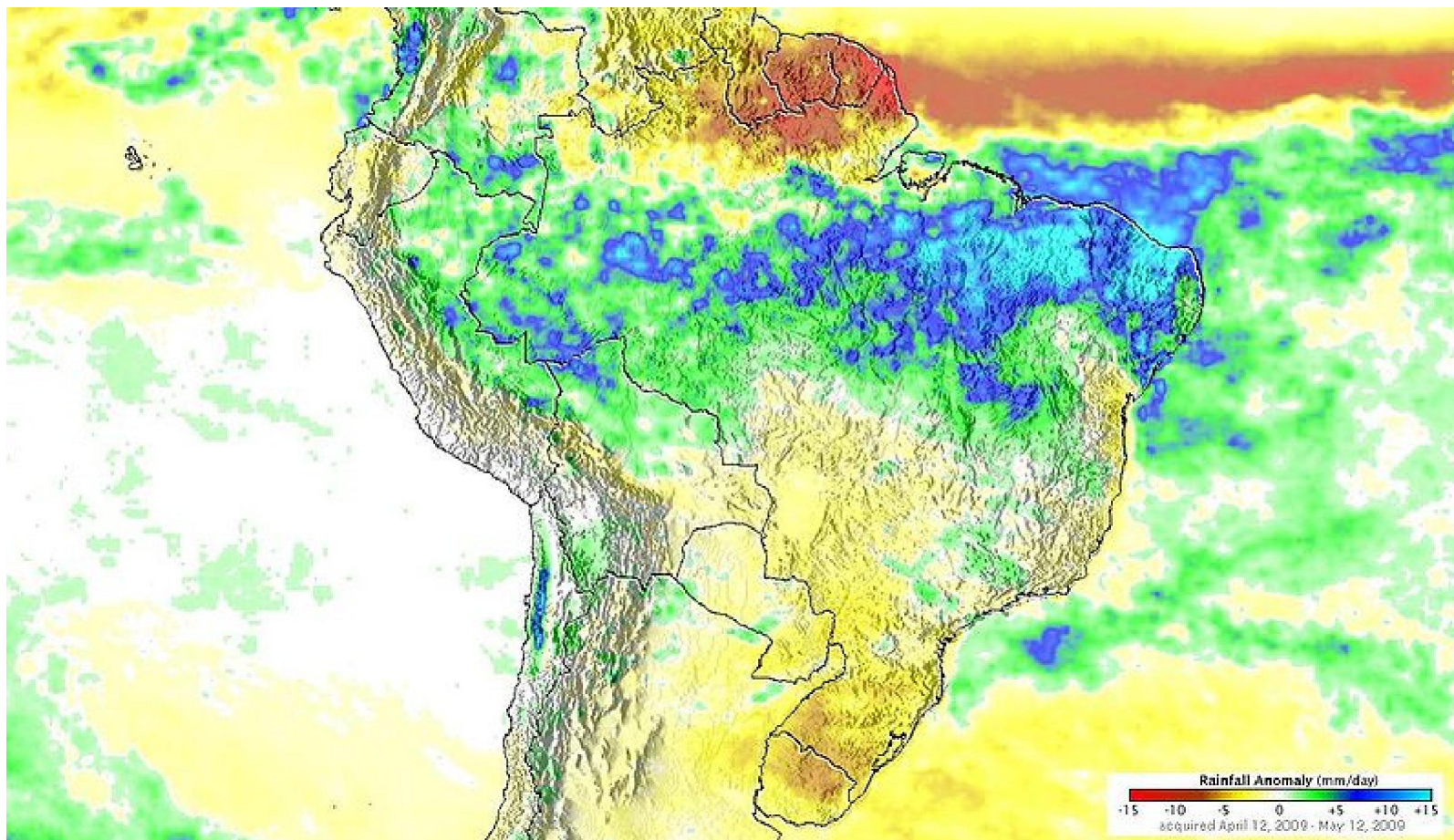


Dipolo do Atlântico em 2009

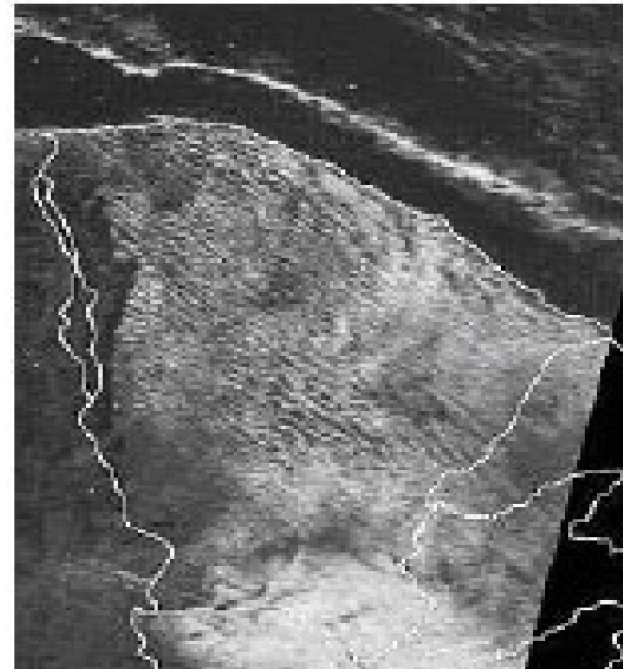
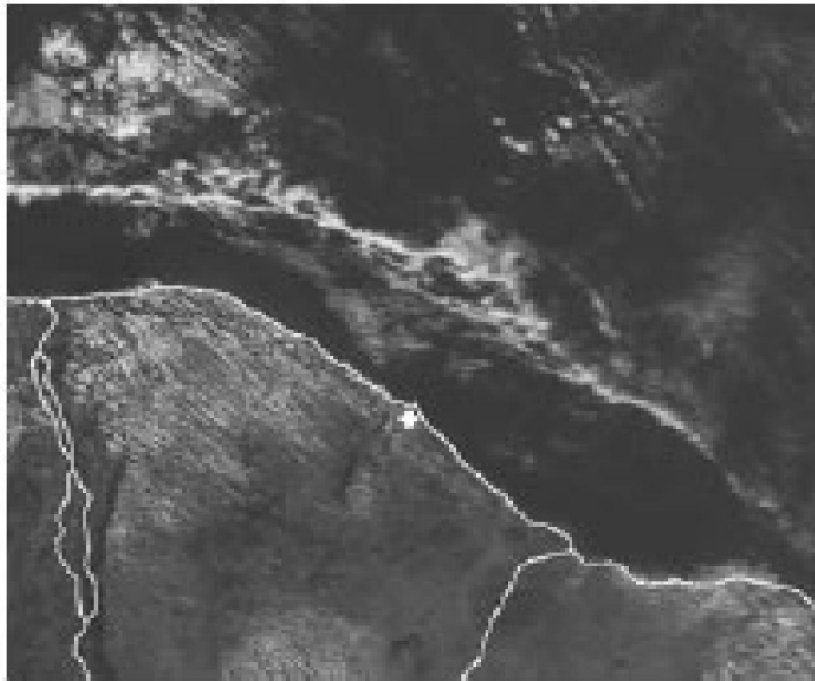


26 Apr 2009 – 2 May 2009

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

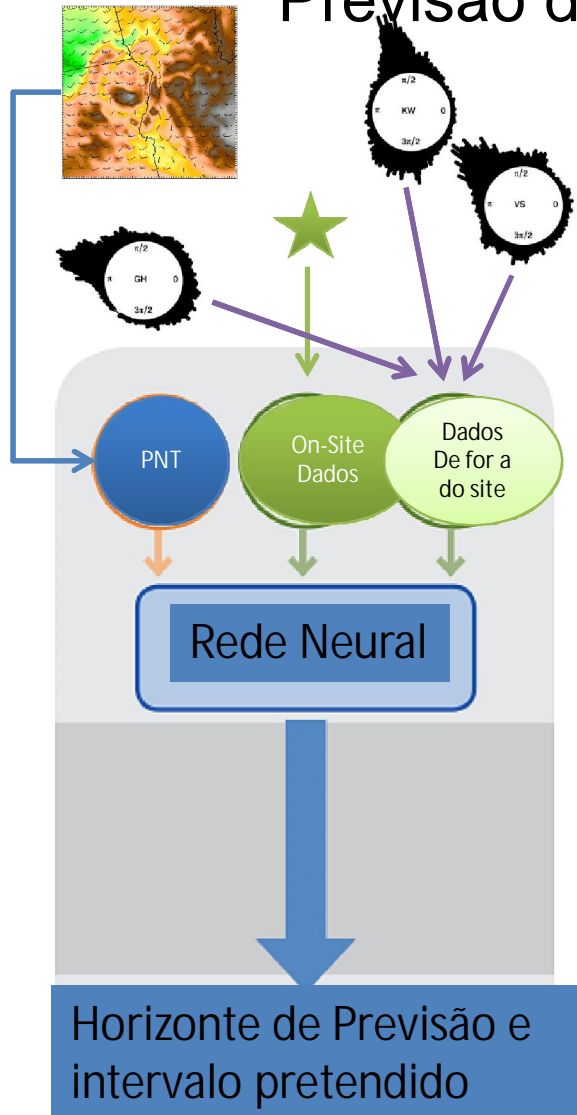


Brisa –Cloud Streets



· 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

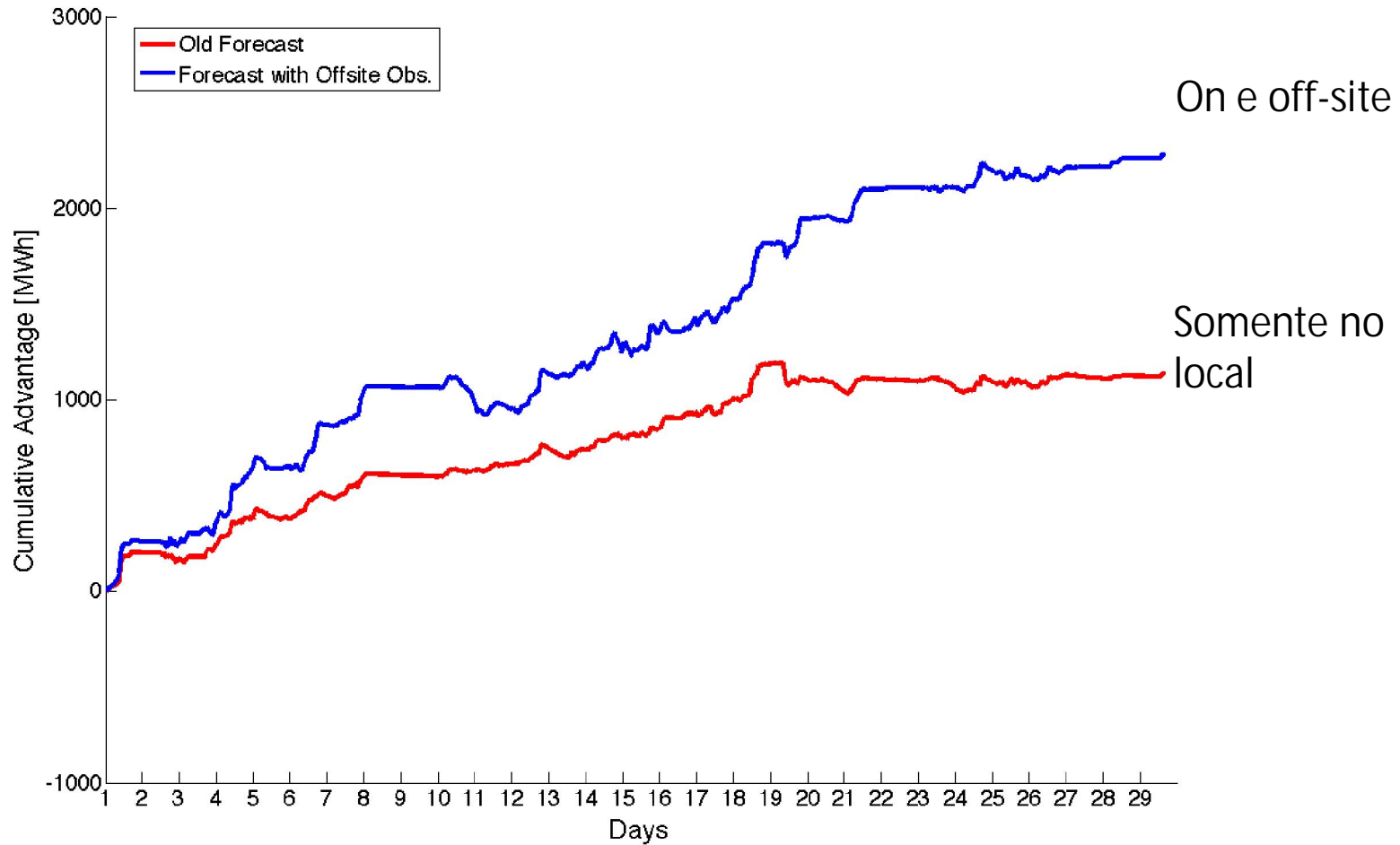
Previsão de Curto-prazo de Geração Eólica



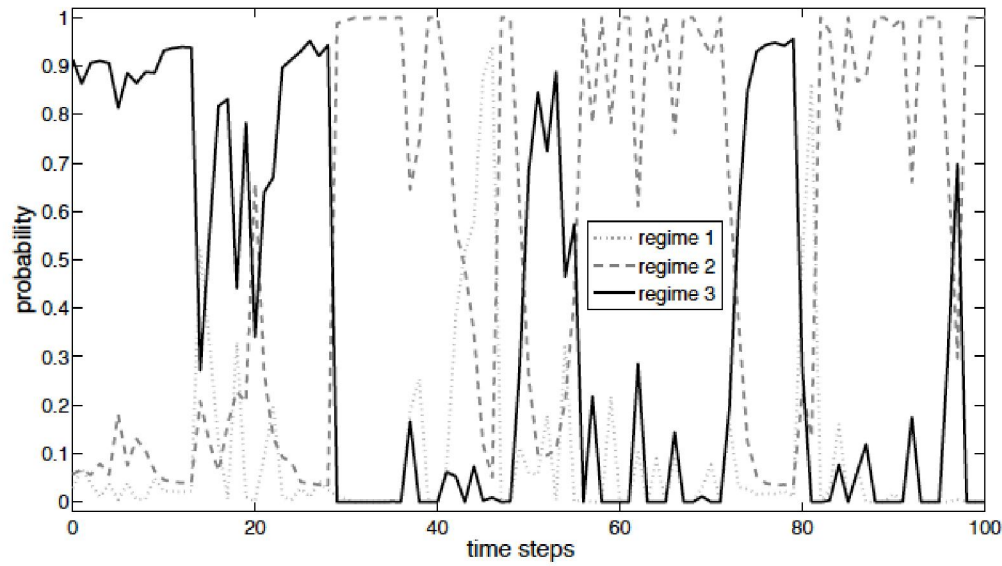
Técnicas comuns na indústria

- 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



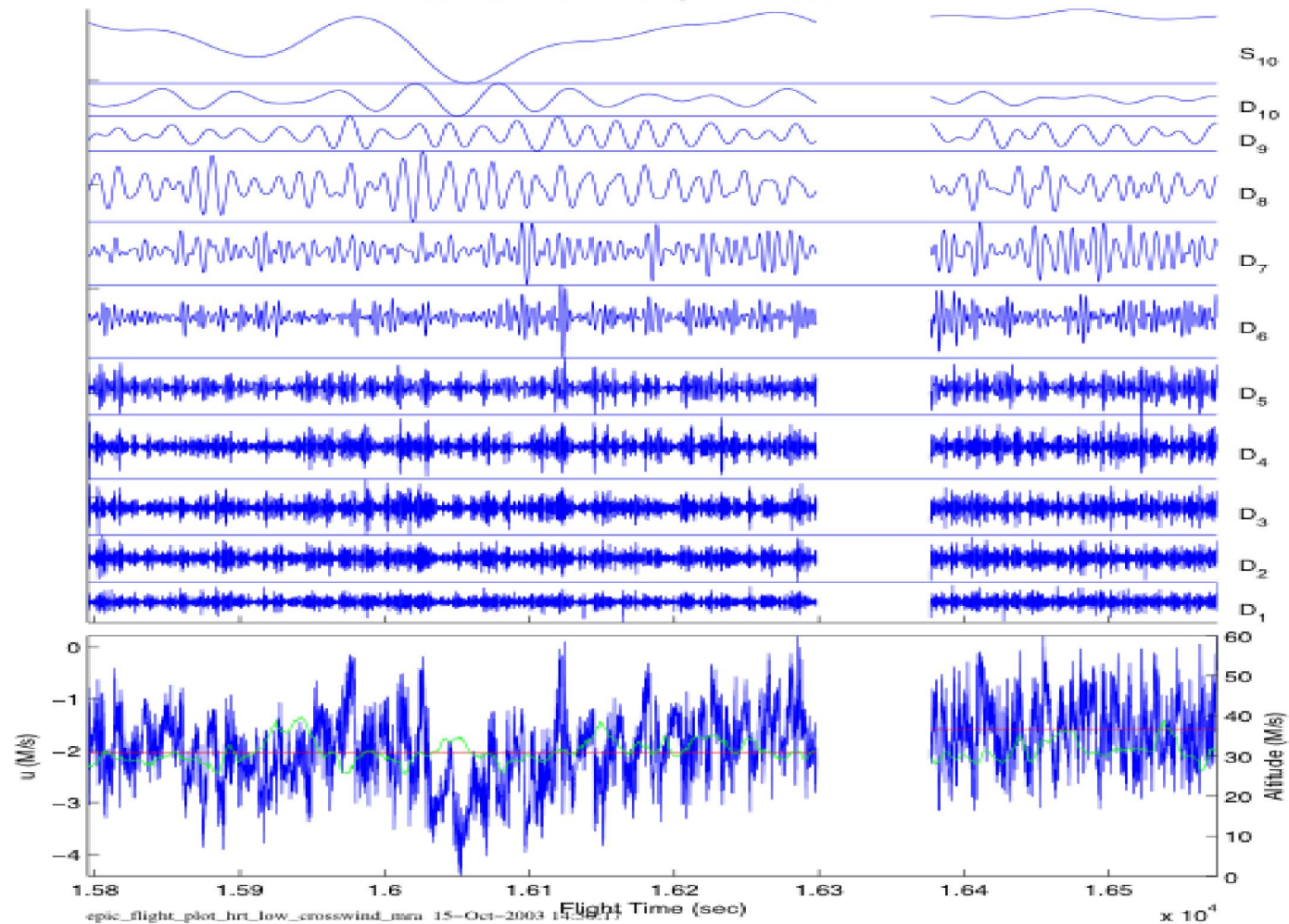
Uso de Cadeia de Markov para separar Regimes de ventos



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:

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

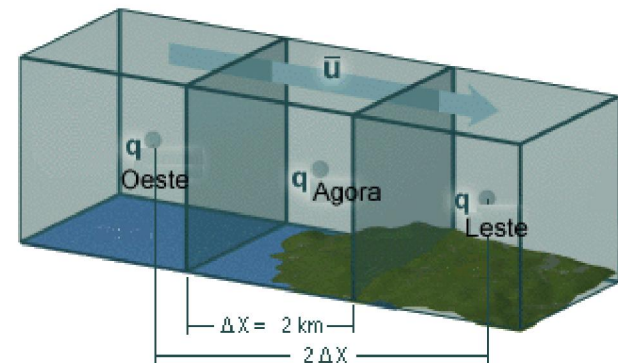
onde q é a umidade, U é a velocidade média do vento, t é o tempo e x é o espaço.

Em diferenças finitas a equação do transporte de umidade fica:

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

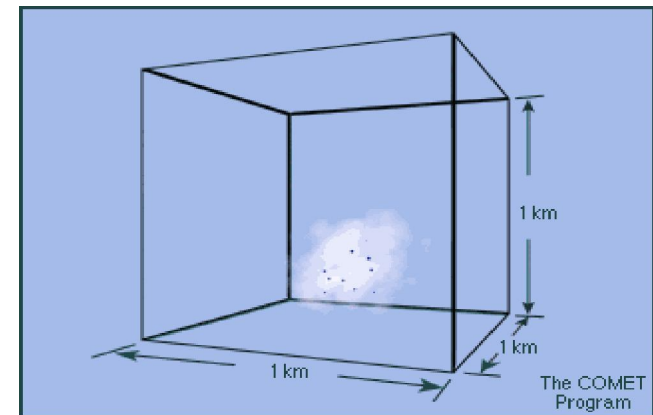
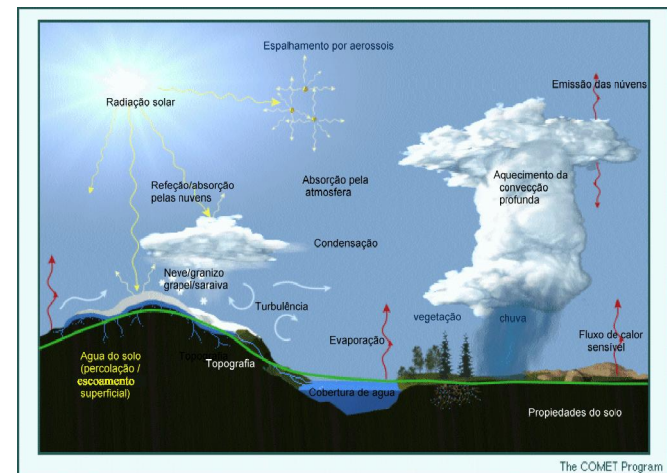
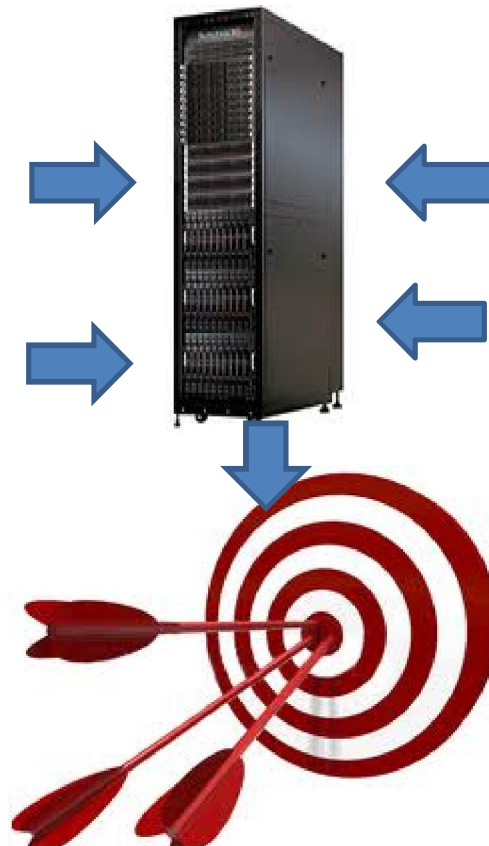
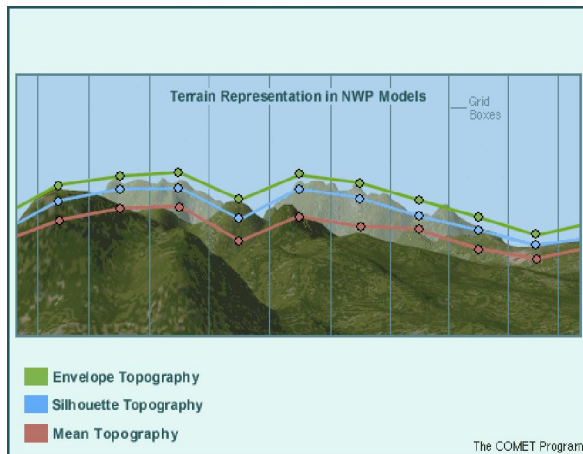
Ou, mas de uma forma mais simples:

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

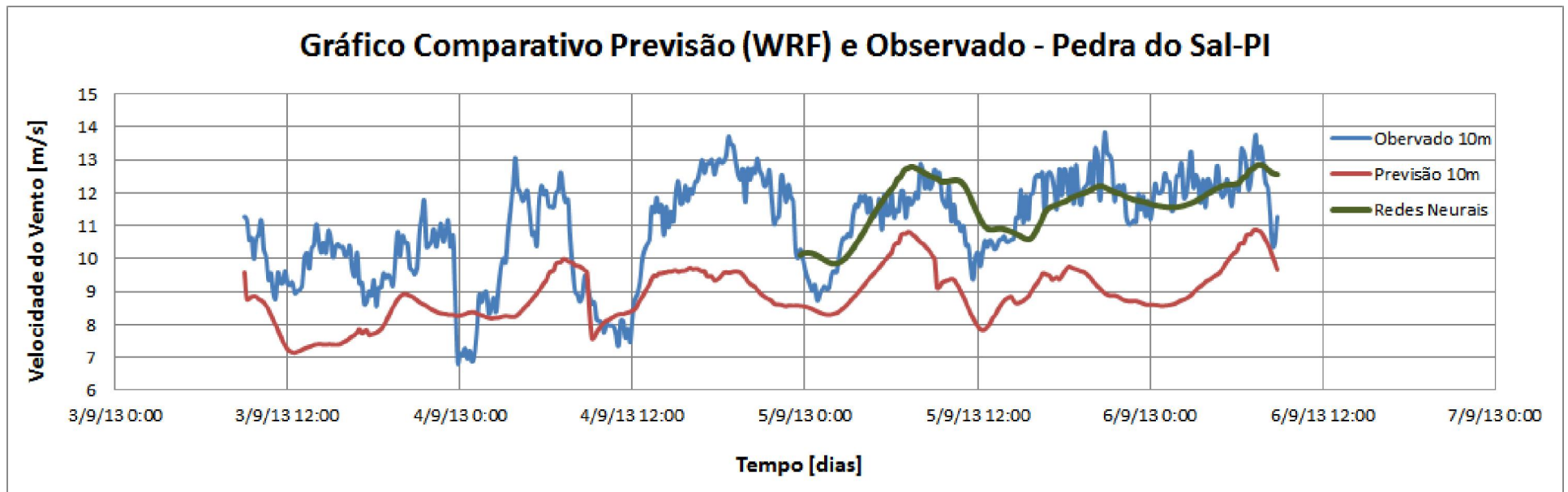


O que é o Modelo PNT

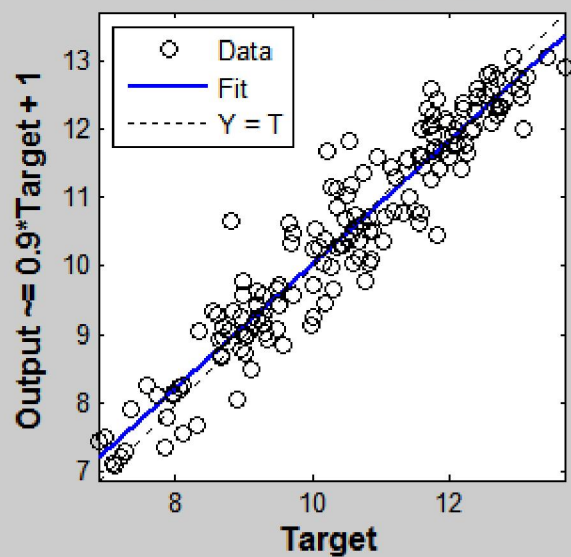
- Modelo de PNT regional desenvolvido na Universidade de Oklahoma para fazer previsão com alta resolução espacial e capaz de prever qualquer fenômenos existente na atmosfera.



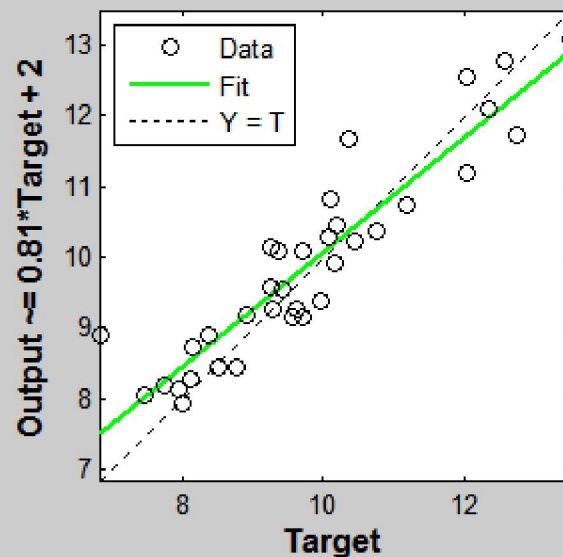
PNT + Redes Neurais



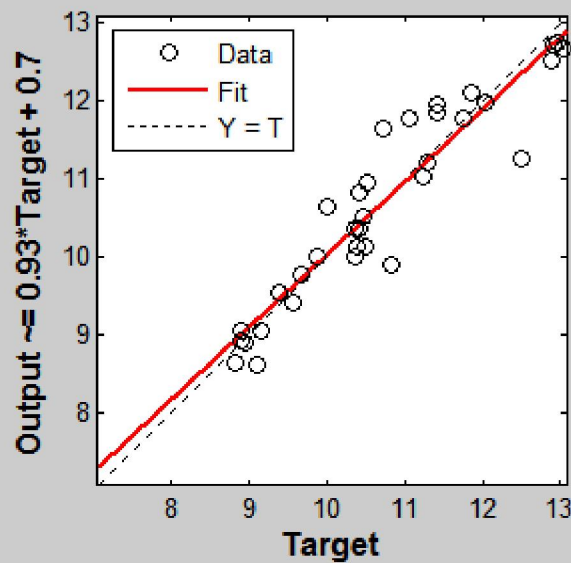
Training: R=0.95203



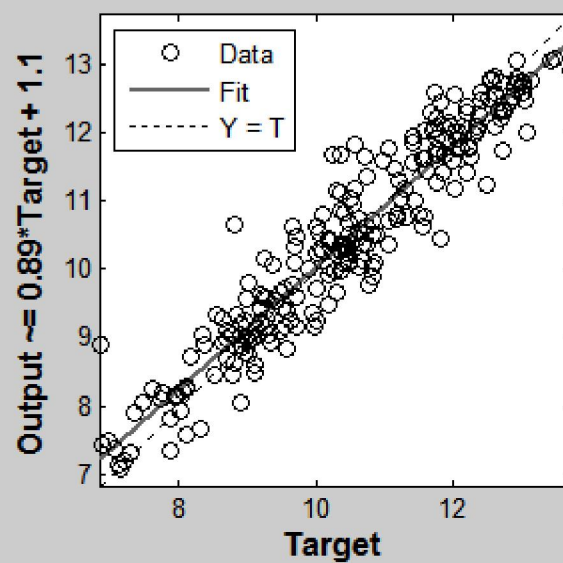
Validation: R=0.92588



Test: R=0.95129

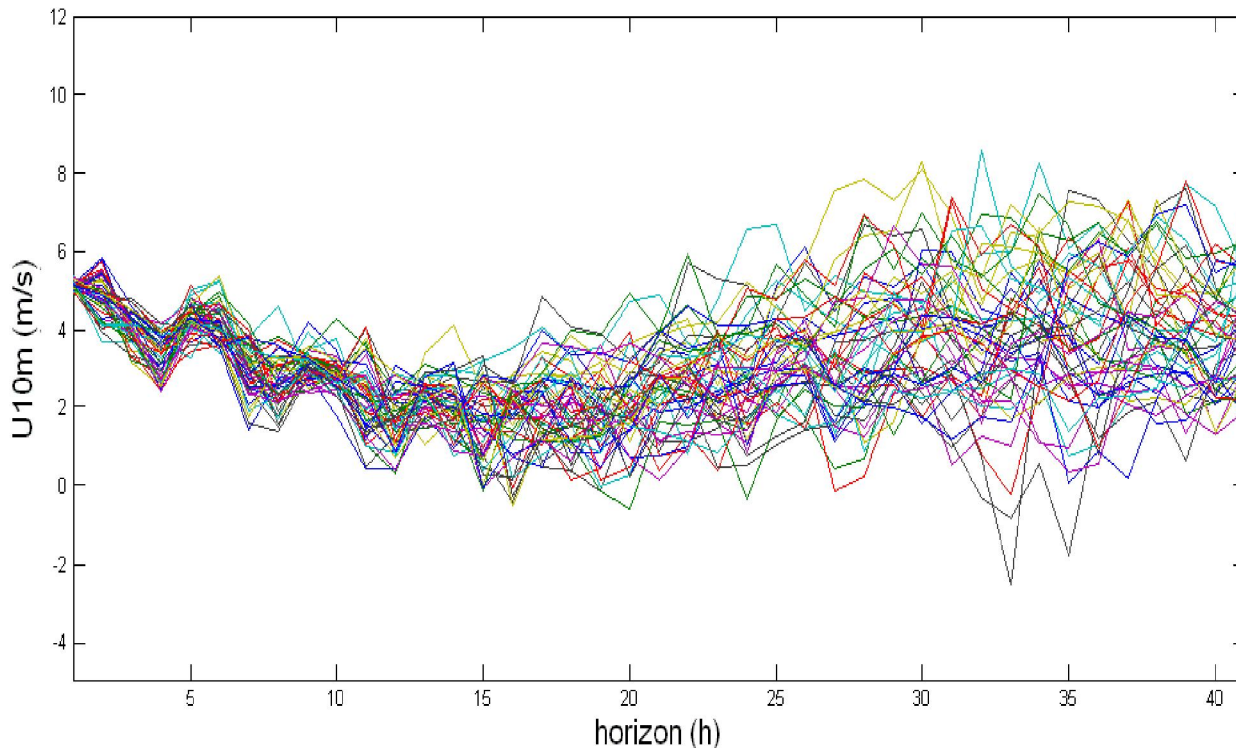


All: R=0.94882



Correção do Modelo de Previsão

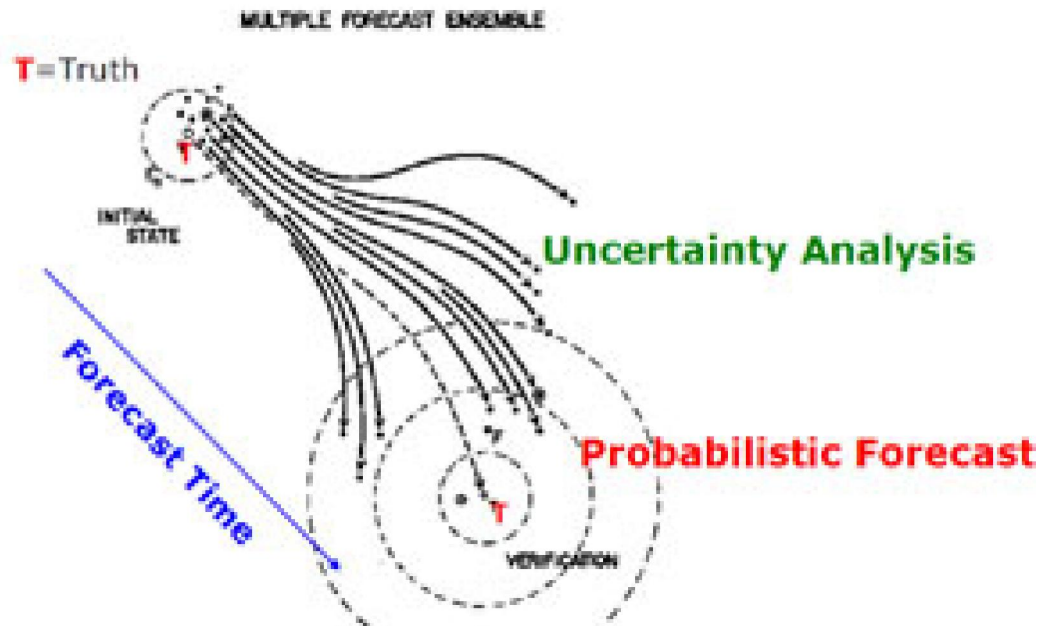
- Utilização de **diferentes modelos físicos** em conjunto com técnicas de ensemble para modelagem do vento;
 - Implementação do Ensemble de Filtro de Kalman (EnskF) na modelagem.



Variação das condições de contorno em diferentes "membros"

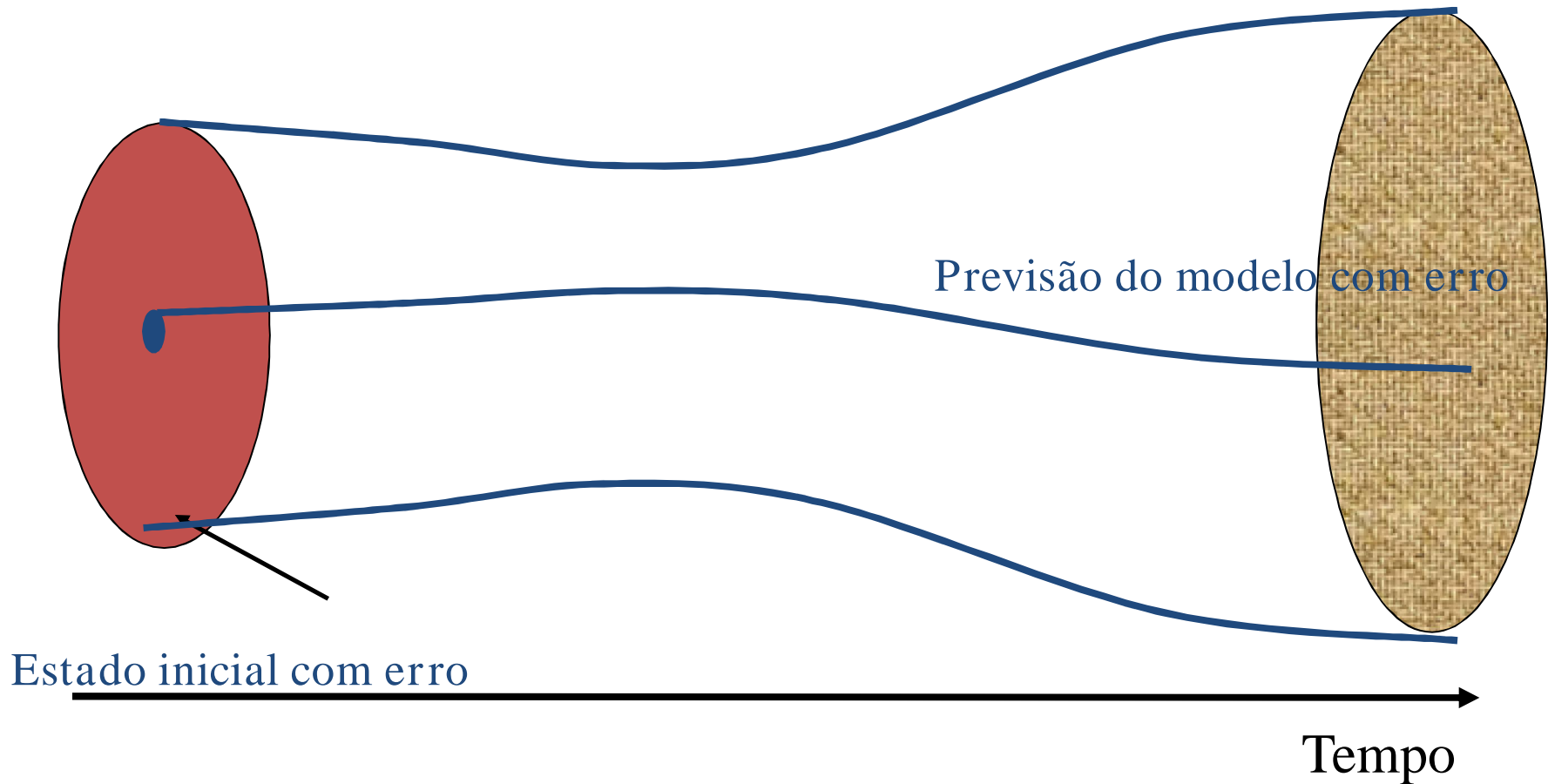
Redução do Erro Quadrático Médio Normalizado (NRMSE)

Ensamble de Filtro de Kalman no ARPS

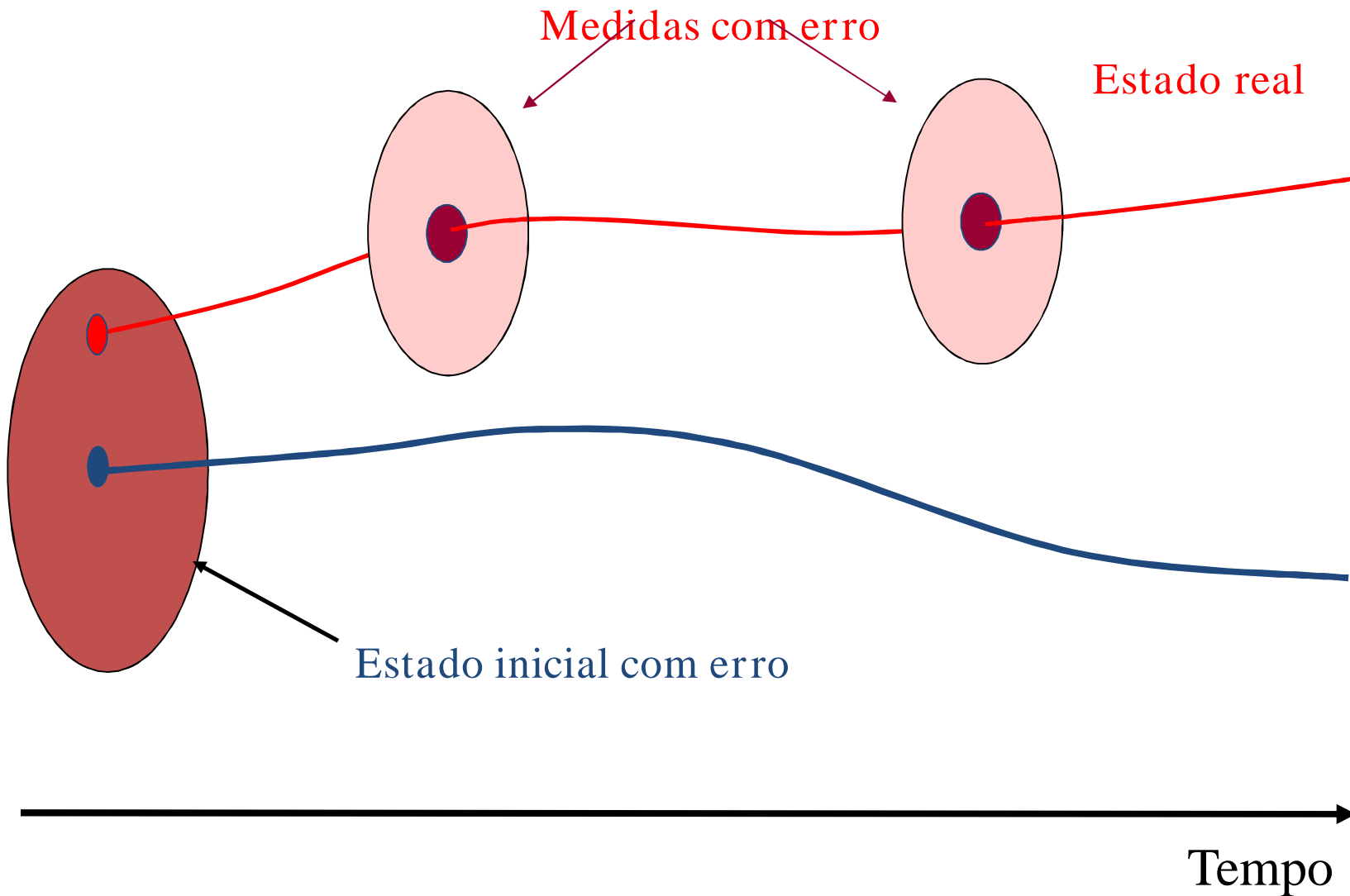


Previsão por Ensemble ou por conjuntos são usadas anali

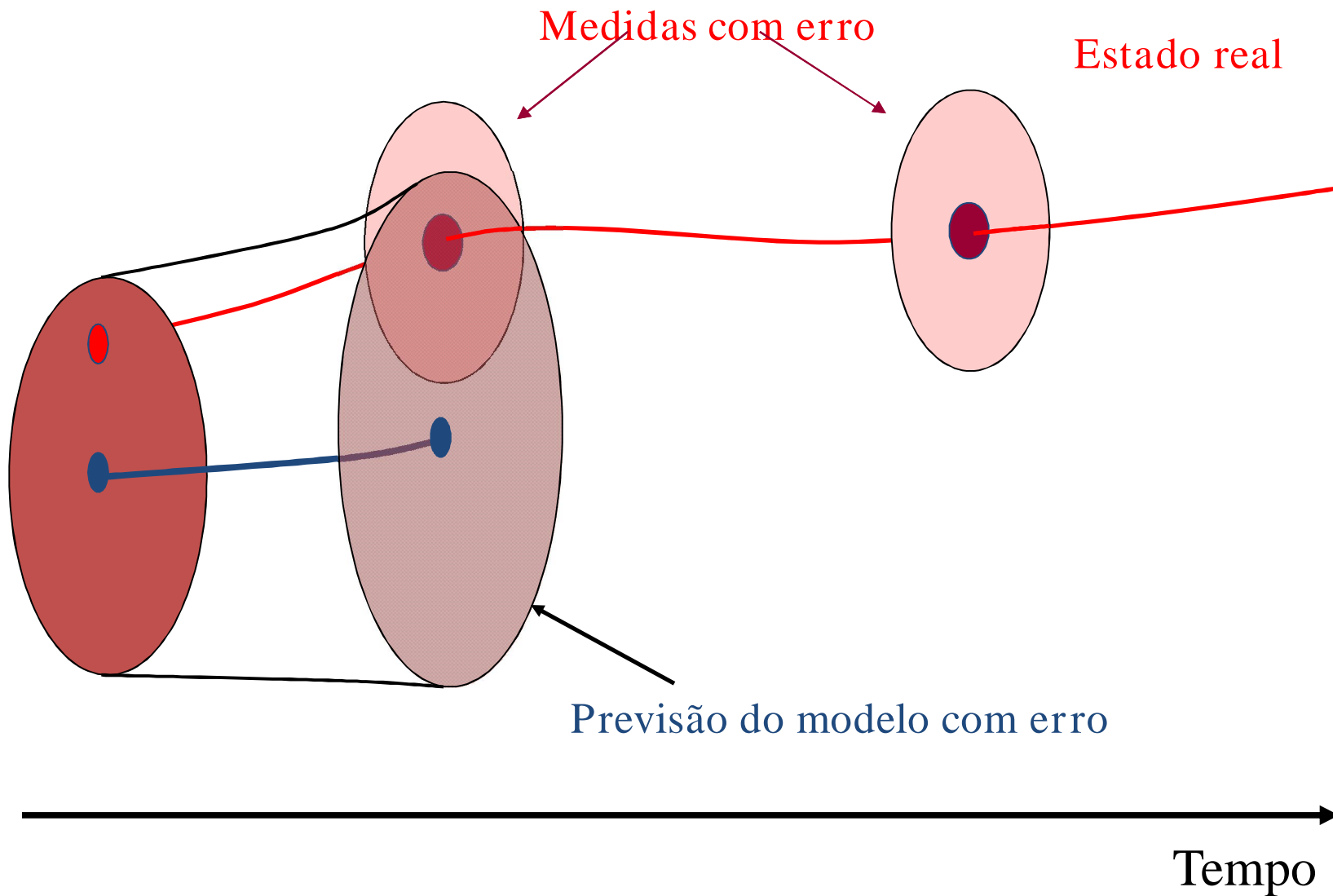
Esquema do Ensemble de Filtro de Kalman



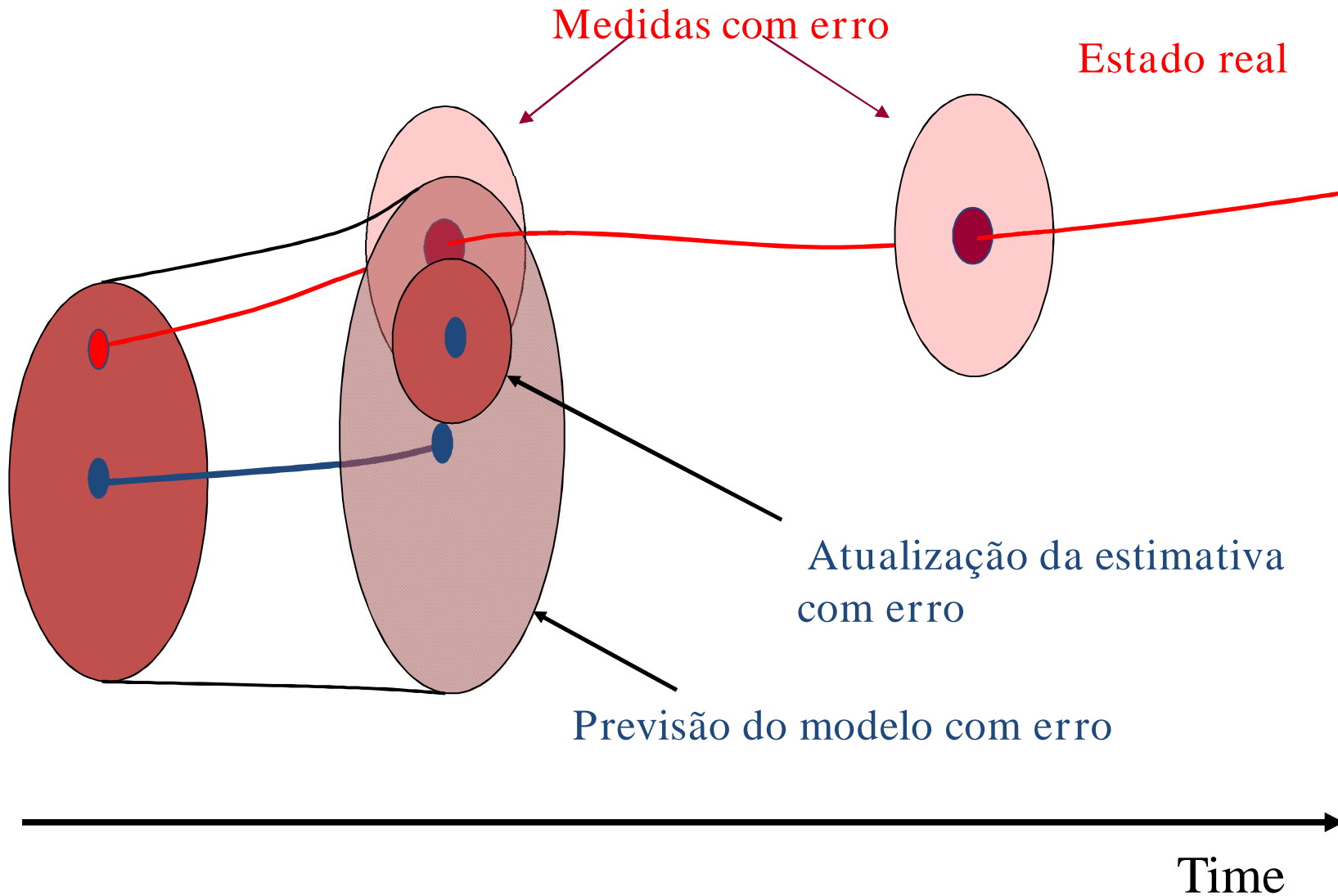
Esquema do Ensemble de Filtro de Kalman



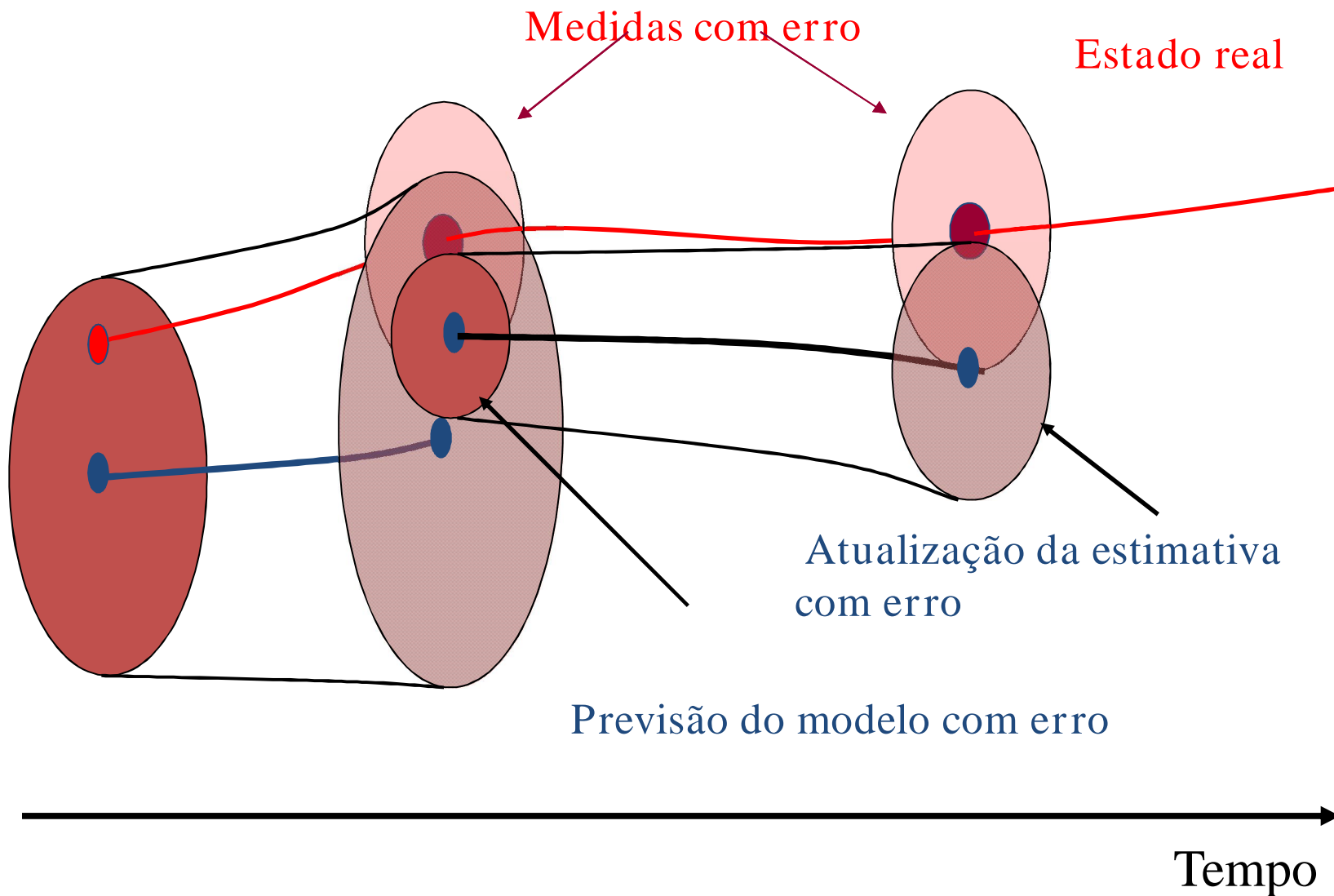
Esquema do Ensemble de Filtro de Kalman

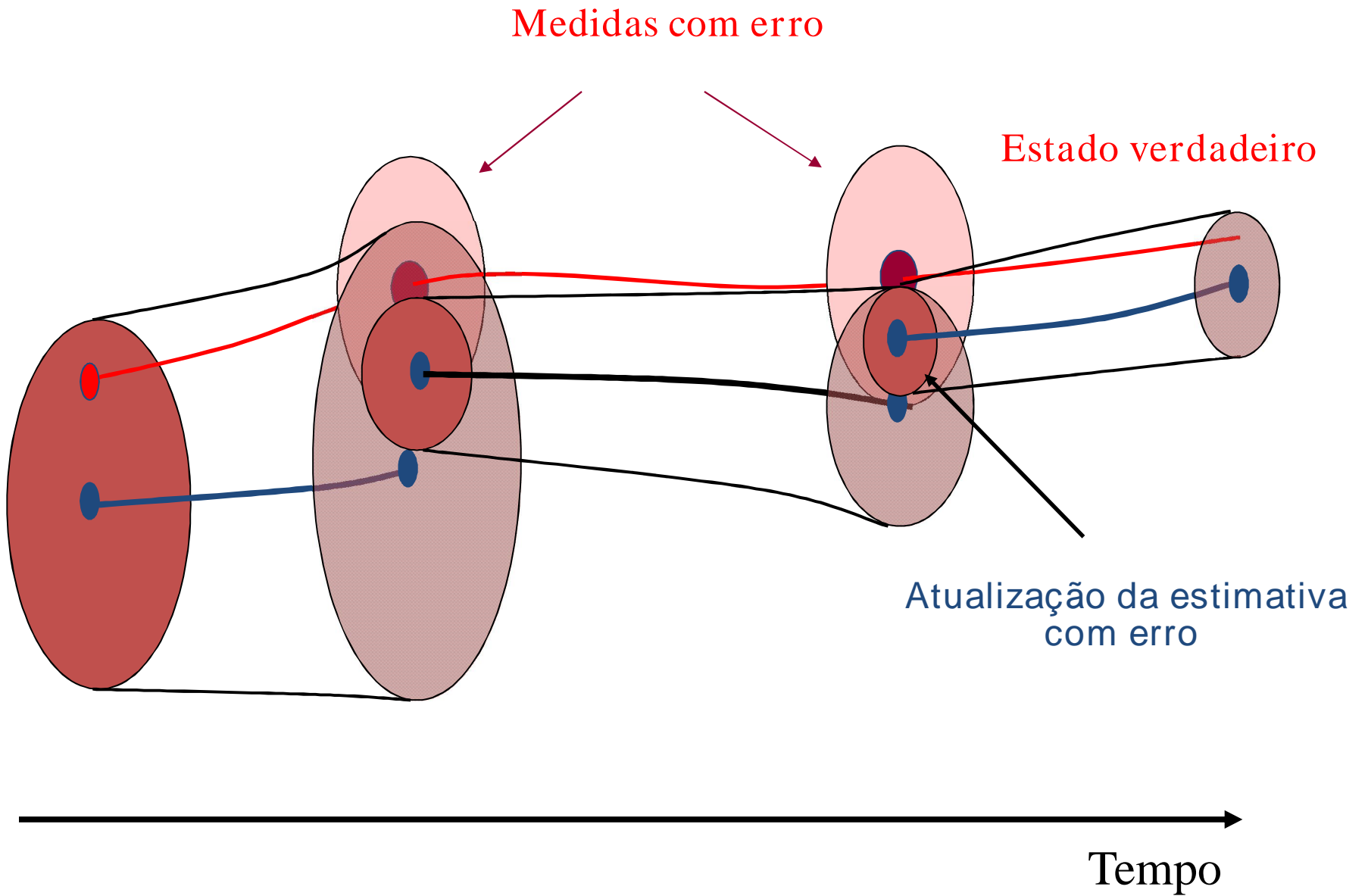


Esquema do Ensemble de Filtro de Kalman



Esquema do Ensemble de Filtro de Kalman





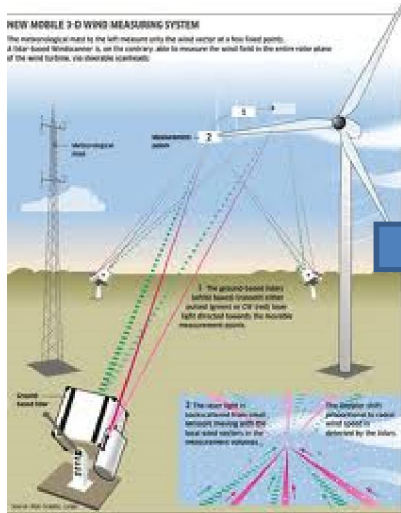
Ensamble

3 ensemble members advancing in time

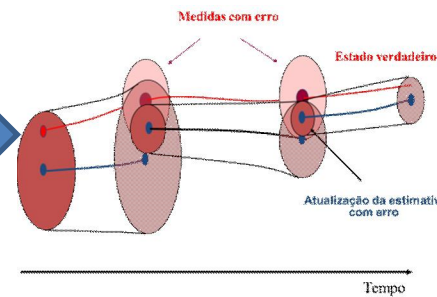


Esamble de Filtro de Kalman

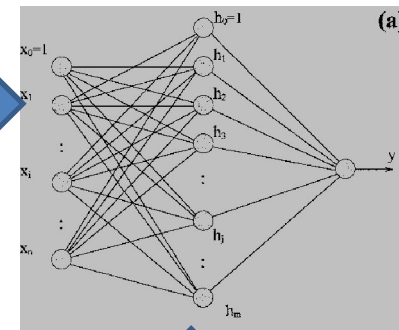
Medidas



Modelagem ARPS/EnSKF



Rede Neural



Previsão de Geração de Energia Elétrica

Produção de Energia Elétrica

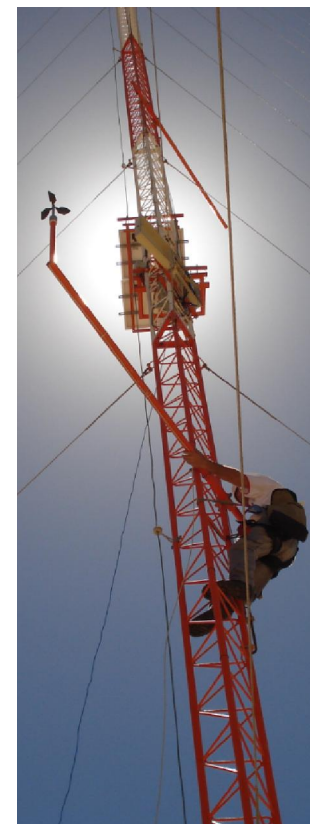


LEPTEN

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



PROJETO P&D EÓLICA UFSC



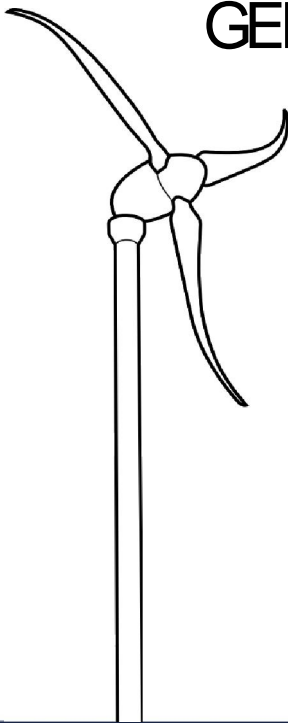
LEPTEN

Laboratórios de Engenharia de Processos
de Conversão e Tecnologia de Energia

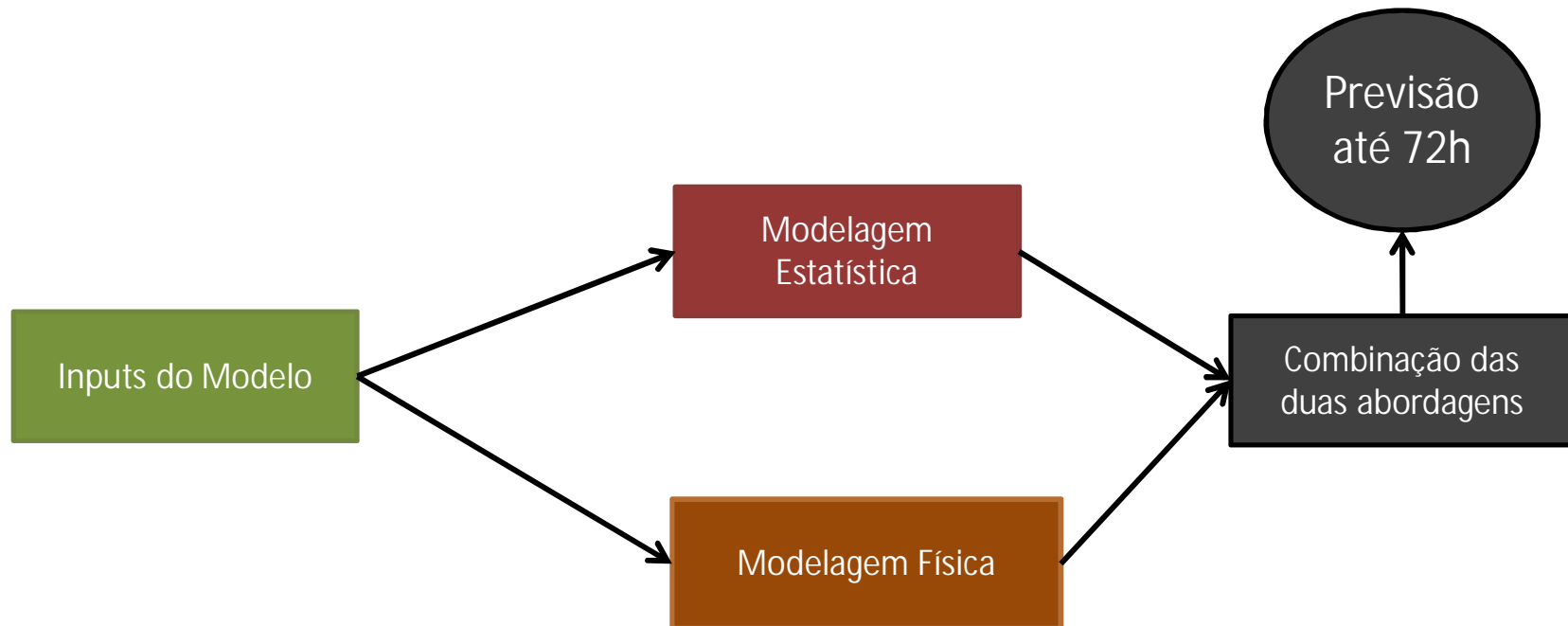
Projeto P&D Eólica UFSC

Projeto P&D ANEEL 0403-0020/2011

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

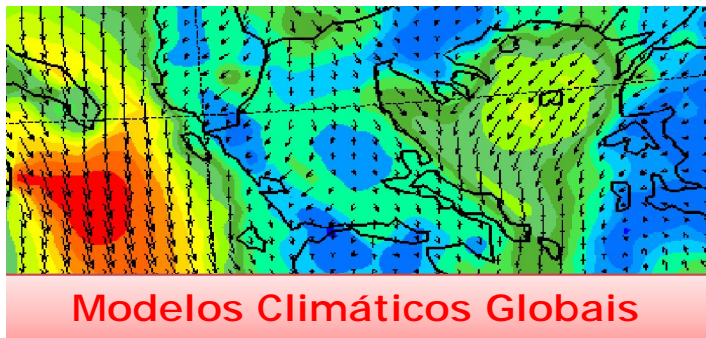


Ø Esquema do Software:

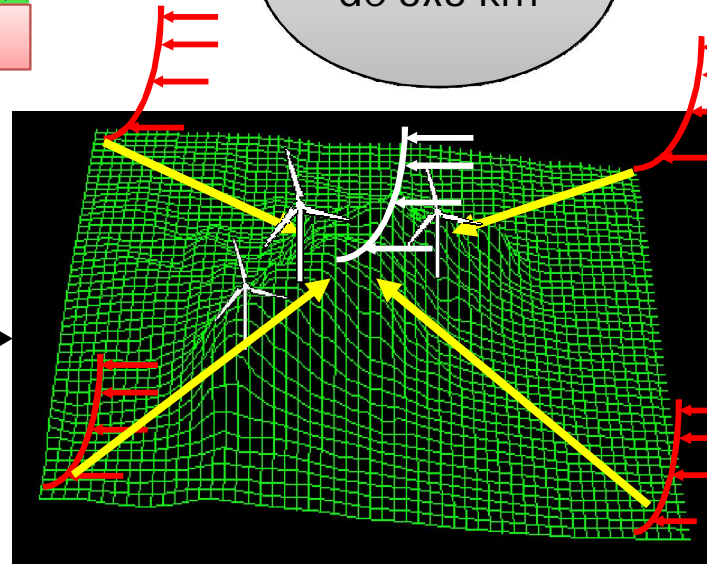
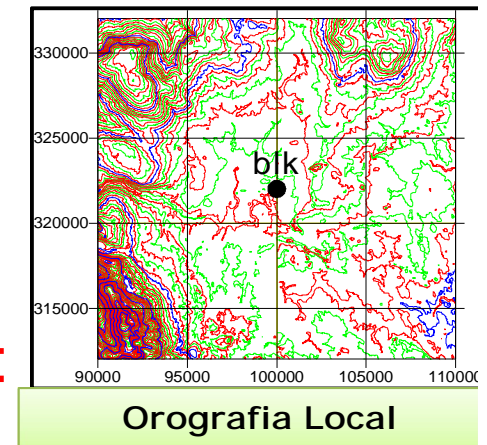


Projeto P&D Eólica UFSC

- Modelos Físicos: ARPS e WRF;

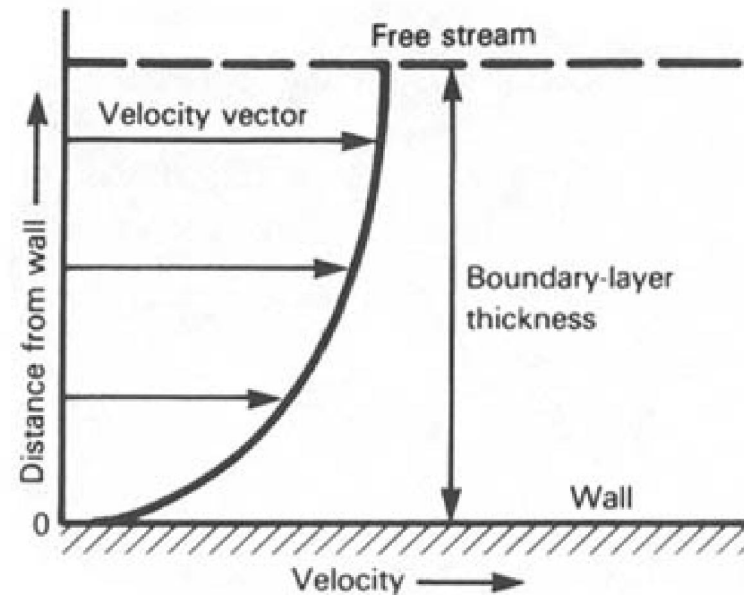
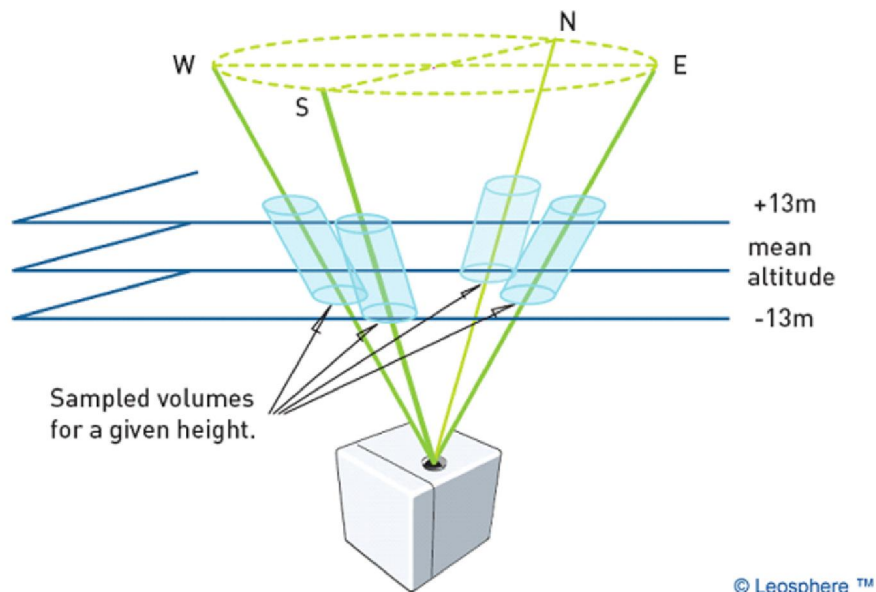


Resolução
de 3x3 km



Projeto P&D Eólica UFSC

- 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

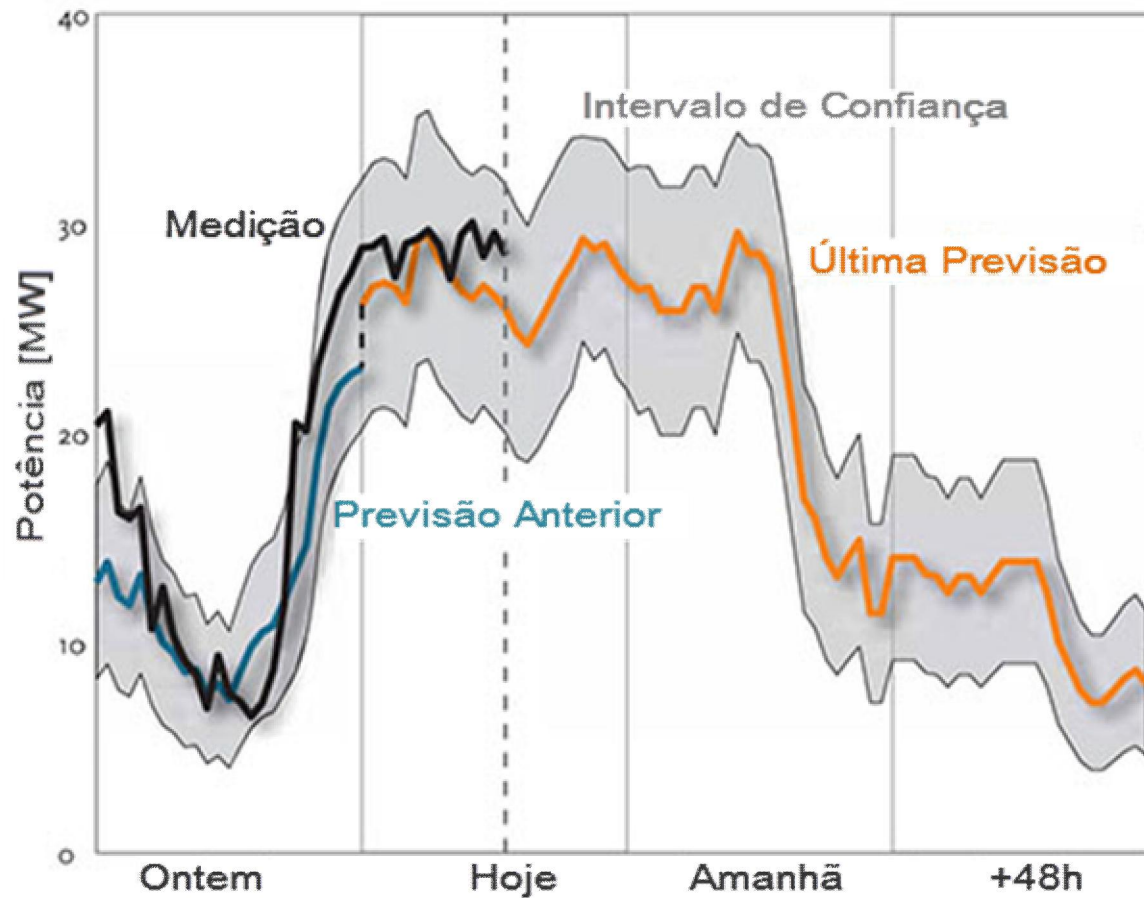
Projeto P&D Eólica UFSC

- 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

Pedro Alvim de Azevedo Santos

Engenheiro Mecânico
Pesquisador LEPTEN/UFSC
pedroasantos@lepten.ufsc.br



LEPTEN

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



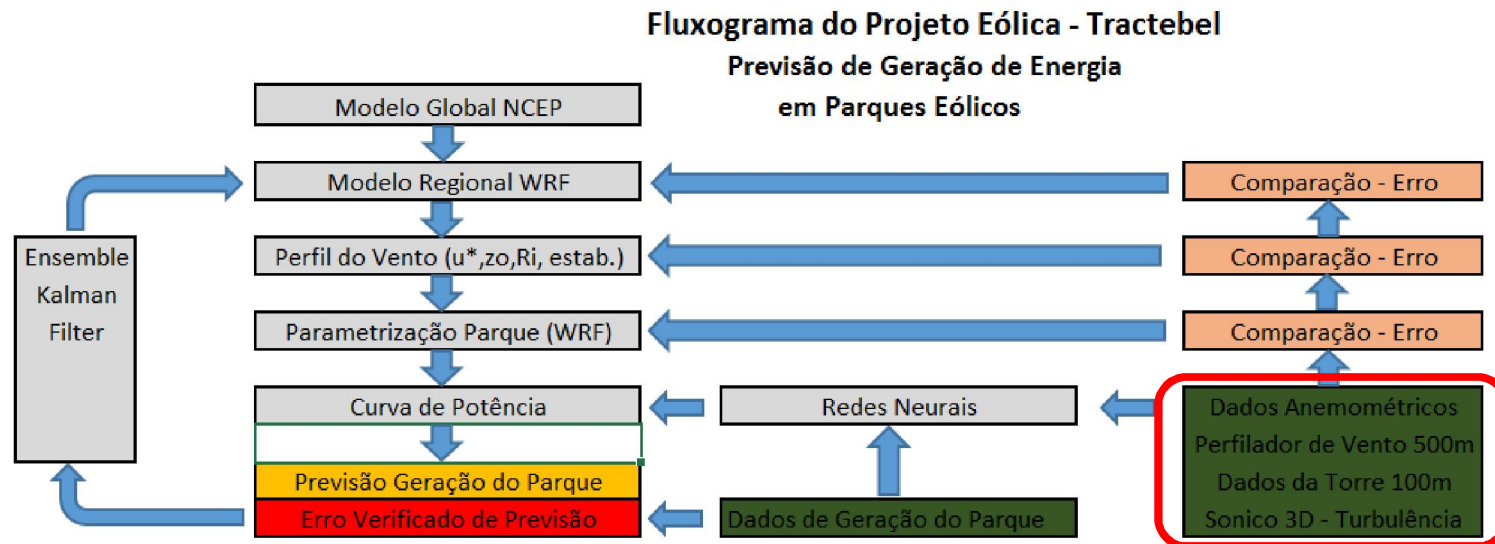
UNIVERSIDADE FEDERAL
DE SANTA CATARINA

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)

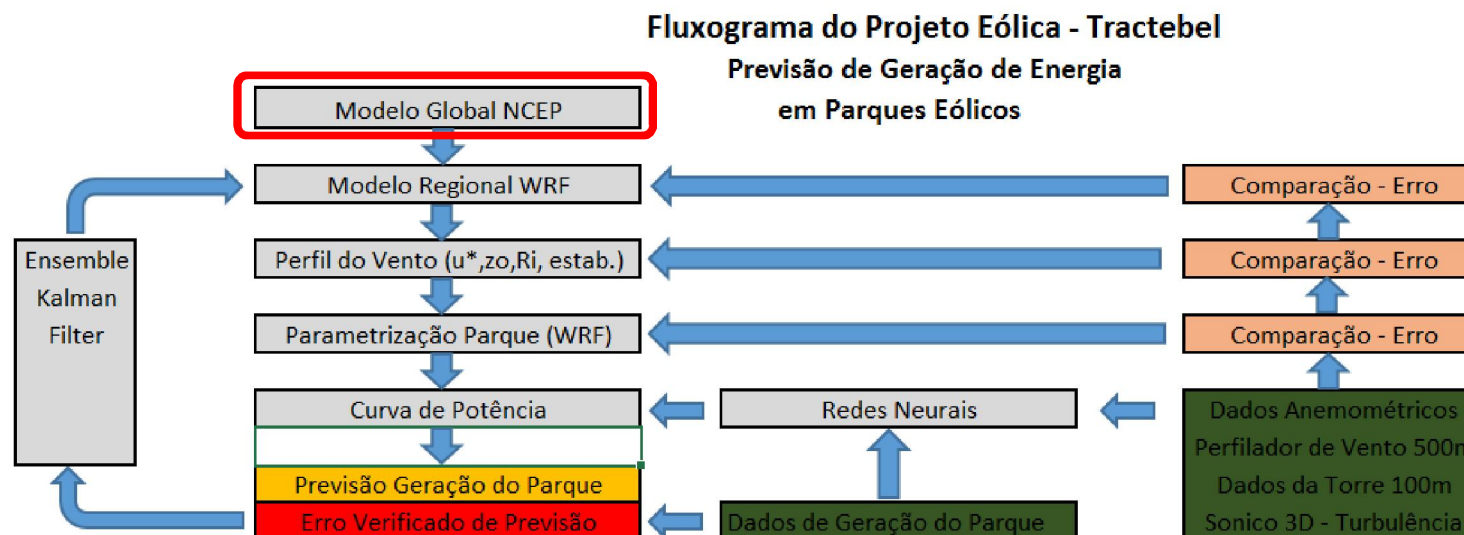
Flag 1 (Suspect) –
Variabilidade a Curto
Prazo

Flag 2 (Warning) –
Climatologia

Flag 3 (Failure) –
Limites Físicos

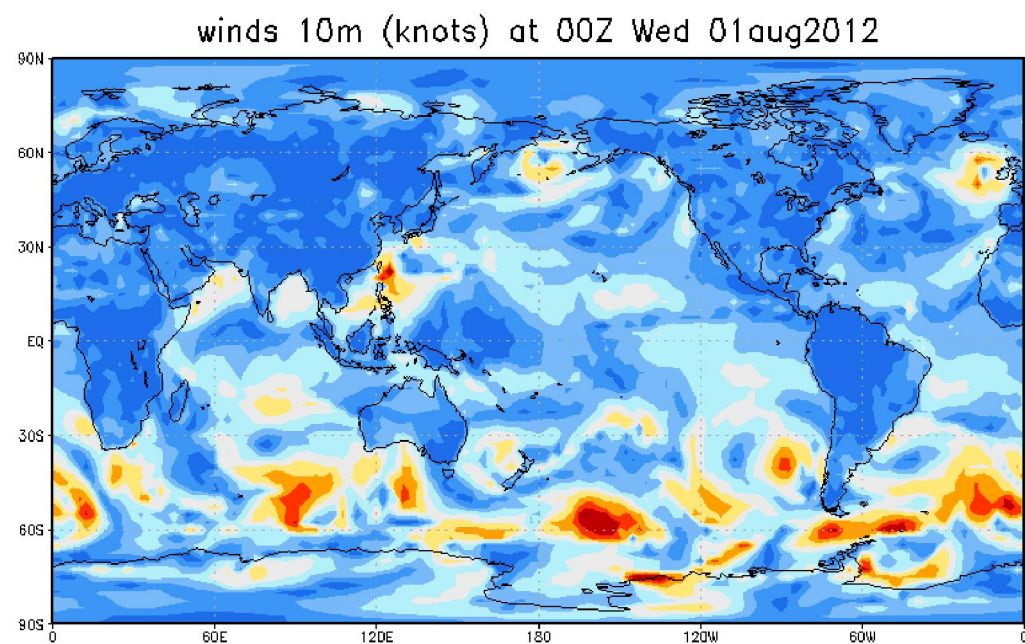
Flag 0 (Good) –
Passou por todos os
testes

Visão Geral – Previsão de Geração de Energia em Parques Eólicos



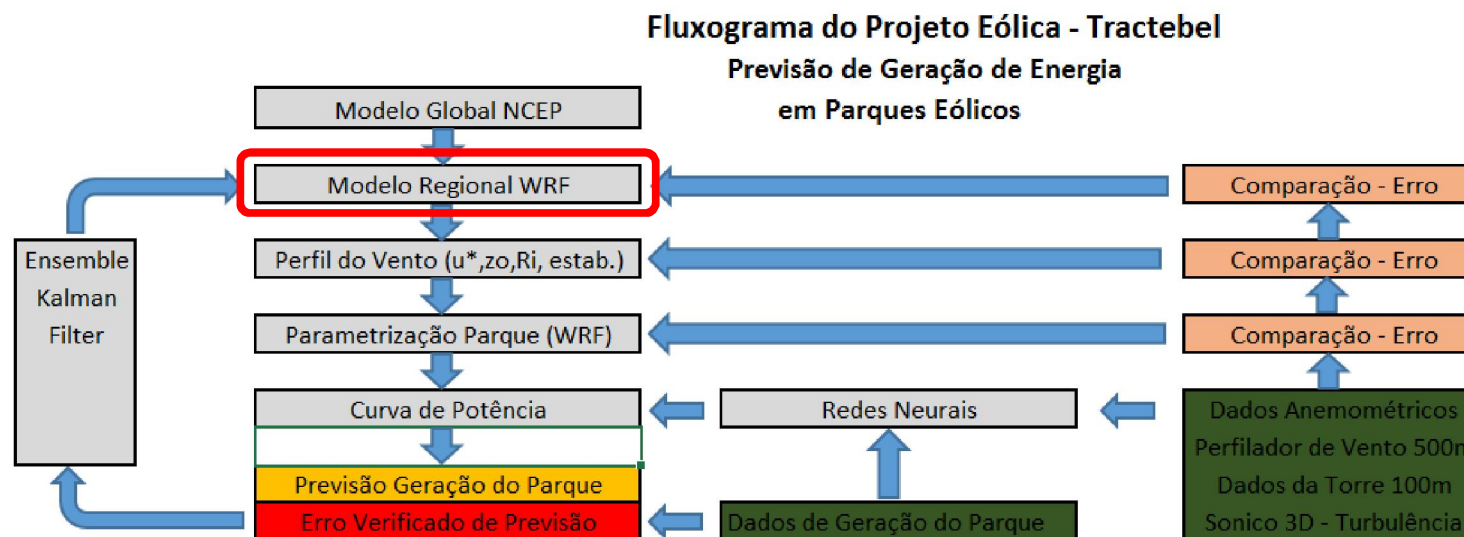
Modelo Global – GFS (Global Forecast System)

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



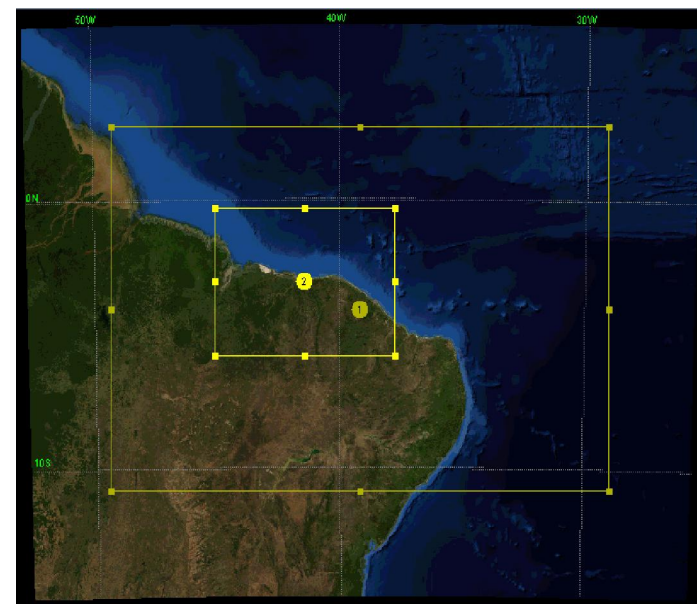
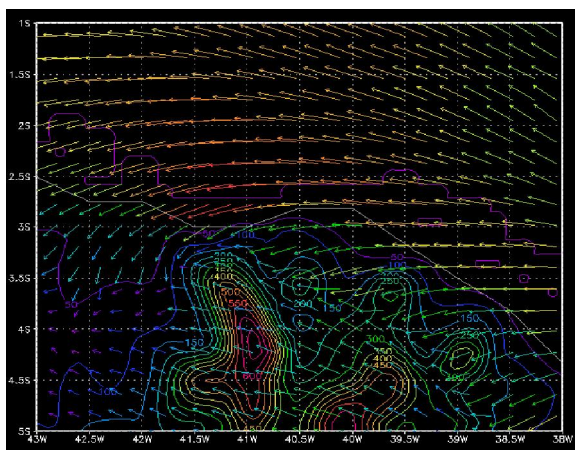
Fonte: NCEP (<http://www.nco.ncep.noaa.gov/pmb/products/gfs/>)

Visão Geral – Previsão de Geração de Energia em Parques Eólicos



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

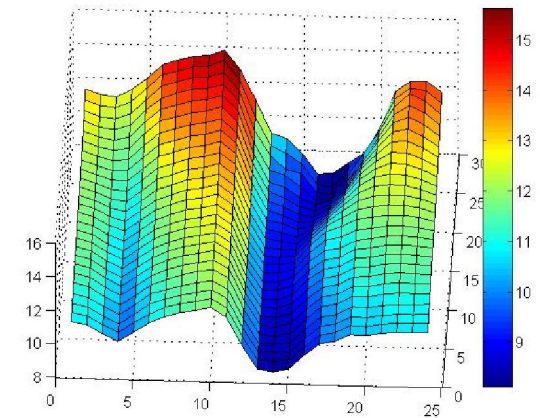
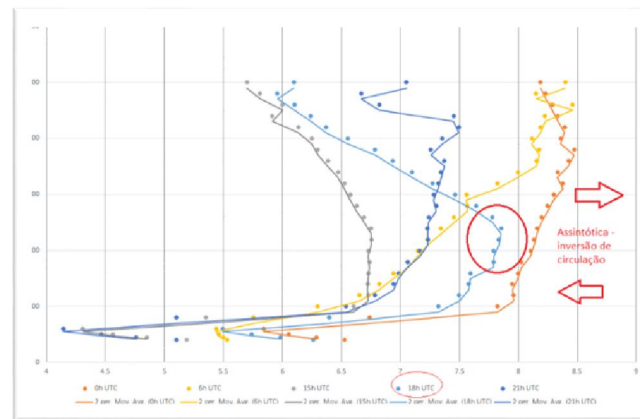
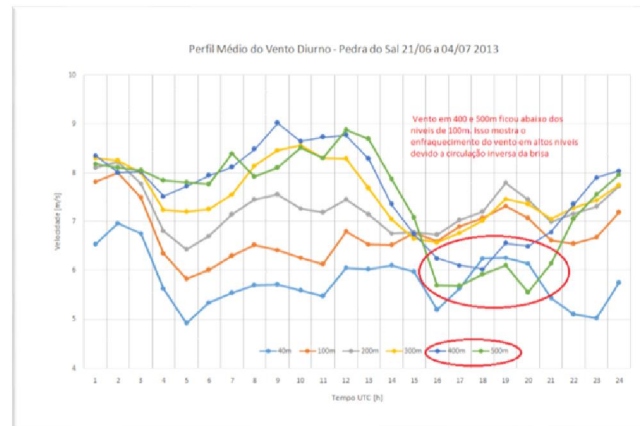
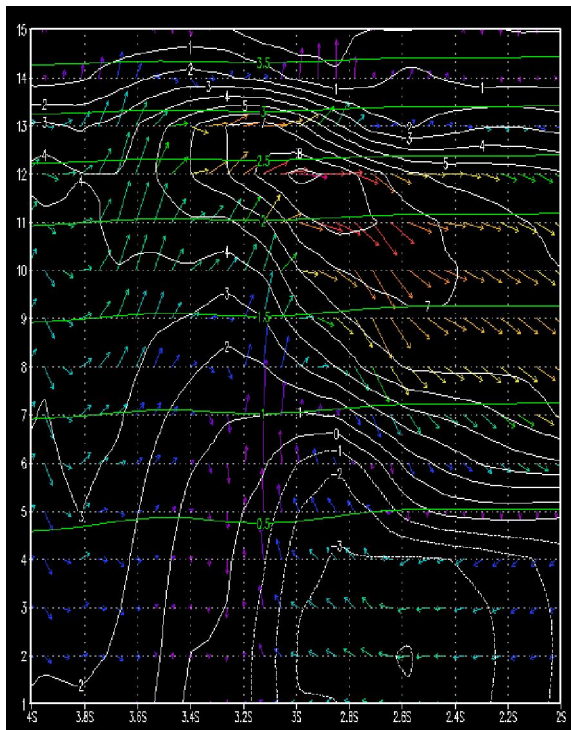
- Regionalização: 2 nesting
- Resolução temporal: 10min
- Resolução espacial: 3km
- Circulações Locais (brisa marítima)
- Influência da Topografia (meso escala)



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

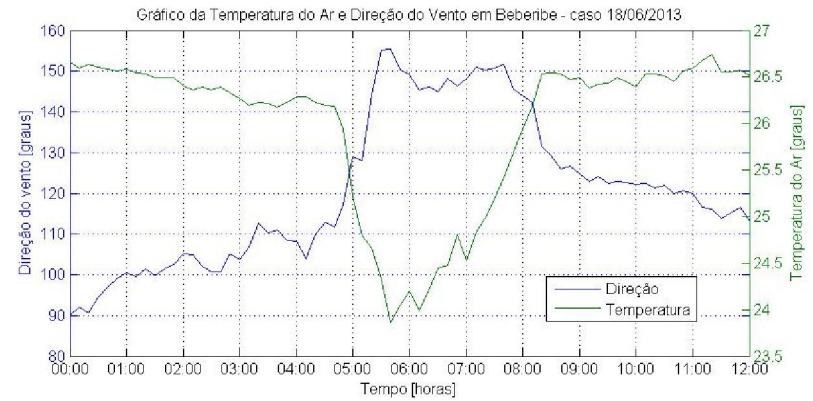
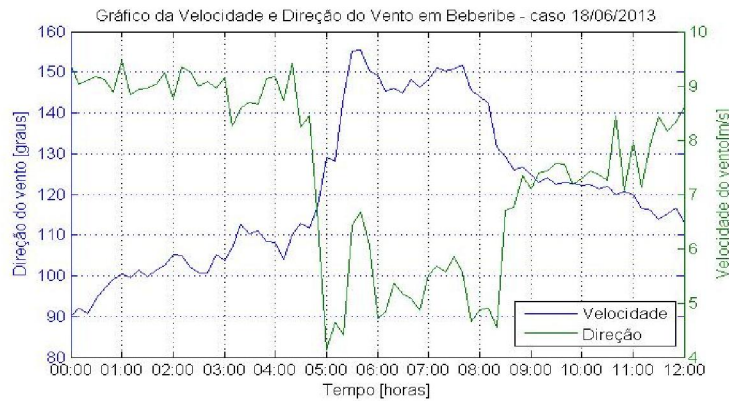
Modelo Regional – WRF vs. Lidar

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



Modelo Regional – WRF Limitações

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



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

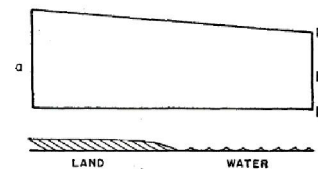
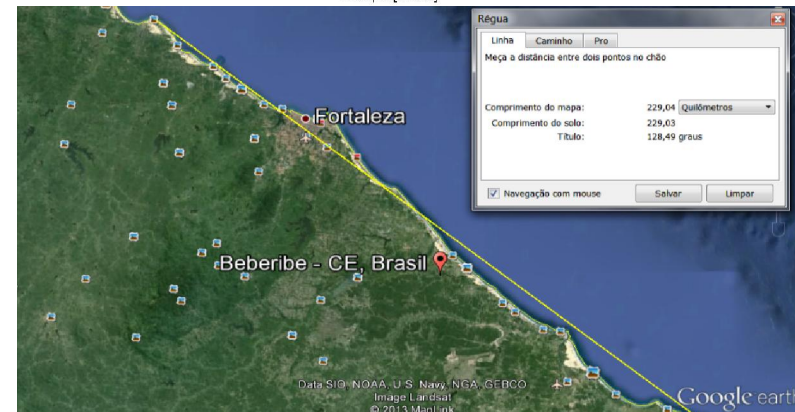
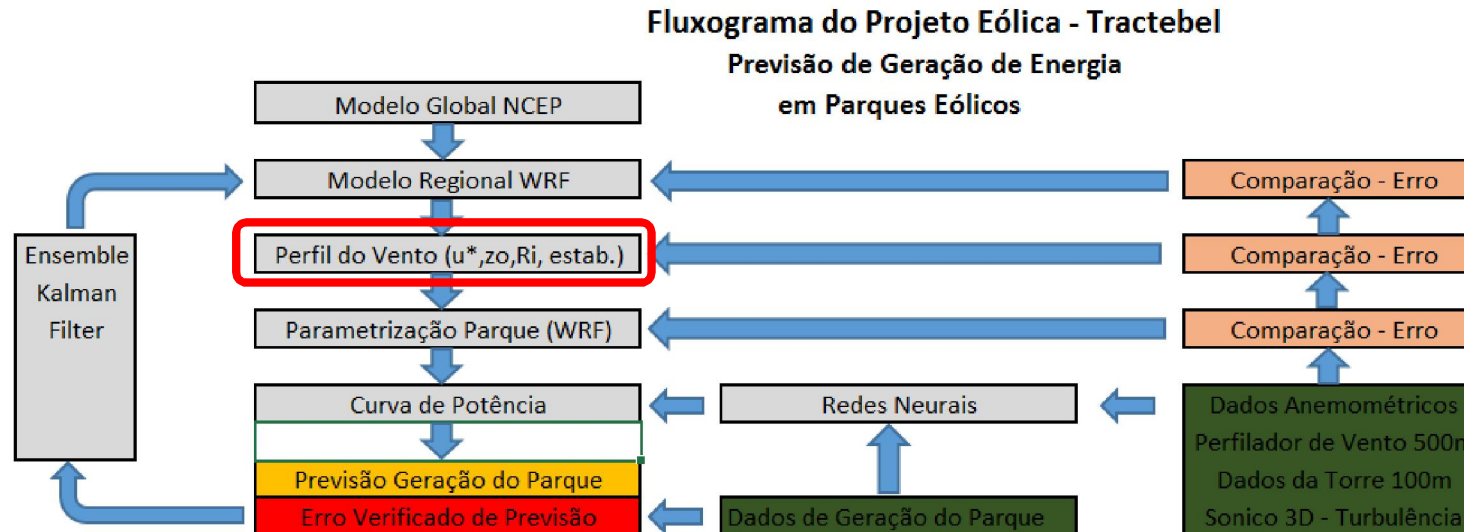


FIG. 1. Circulation integral for the sea-breeze circulation.

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

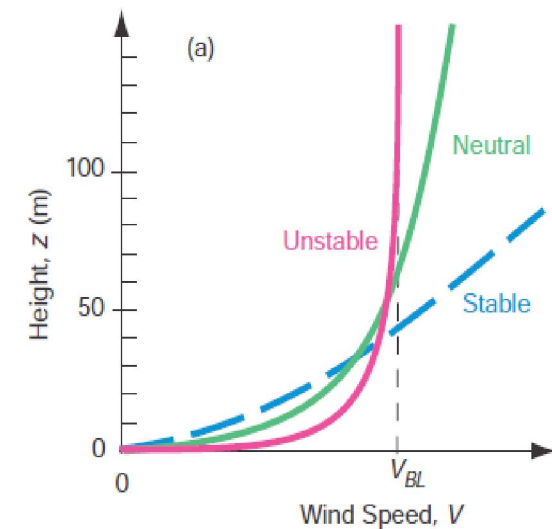
$$U(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right)$$

Fonte: Arya(2001)

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

friction velocity

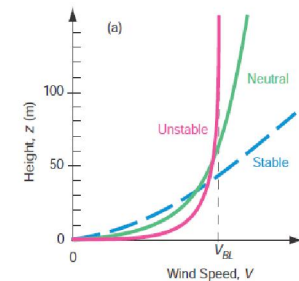
constant z_0 is called roughness length



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

Estabilidade – Diferentes Técnicas

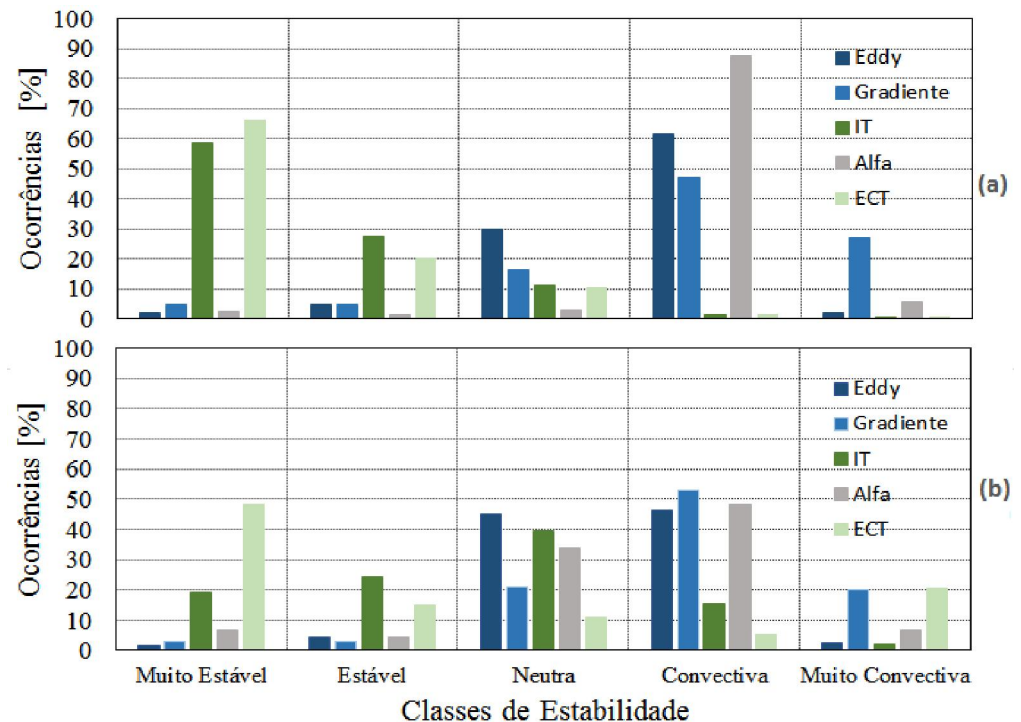
- Eddy covariance, Gradiente, Intensidade Turbulenta, Coeficiente de Cisalhamento e Energia Cinética Turbulenta.

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	$-15 < L < 0$	$ECT > 1,4$	$IT > 30\%$	$\alpha < 0,0$

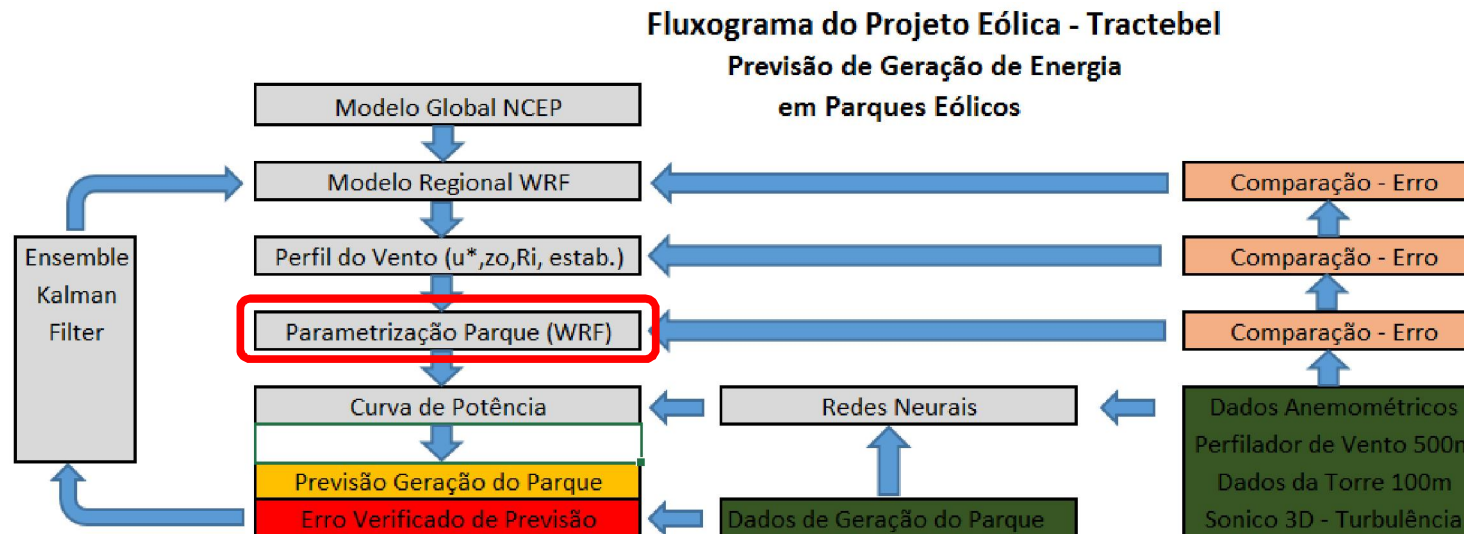
$$ECT = \frac{1}{2} (\overline{u'u'} + \overline{v'v'} + \overline{w'w'})$$

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

- Trabalho aceito no VIII Workshop de Micrometeorologia 2013.



Visão Geral – Previsão de Geração de Energia em Parques Eólicos

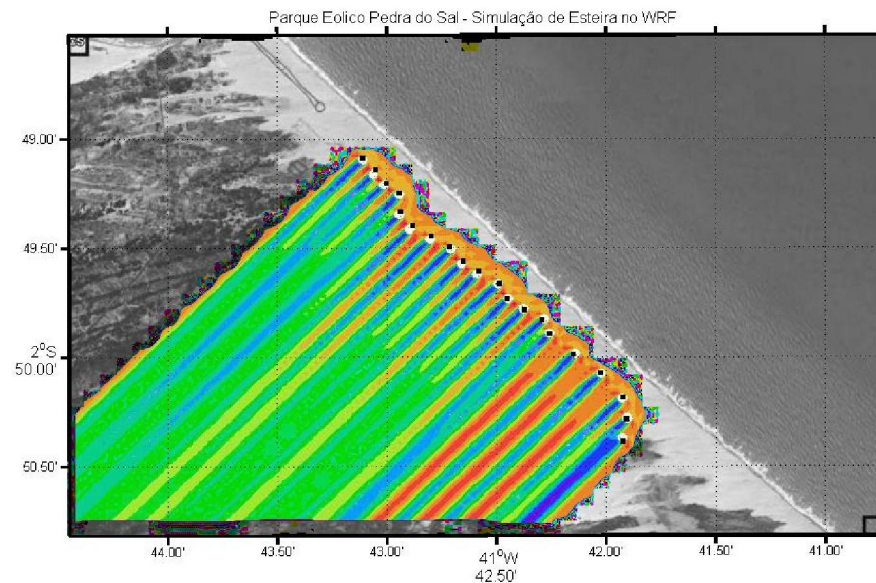
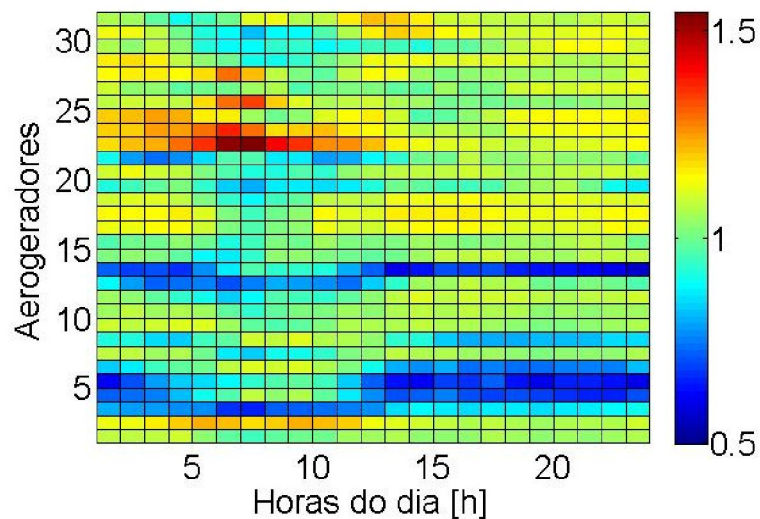


Modelo do Parque – WRF Windfarm

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

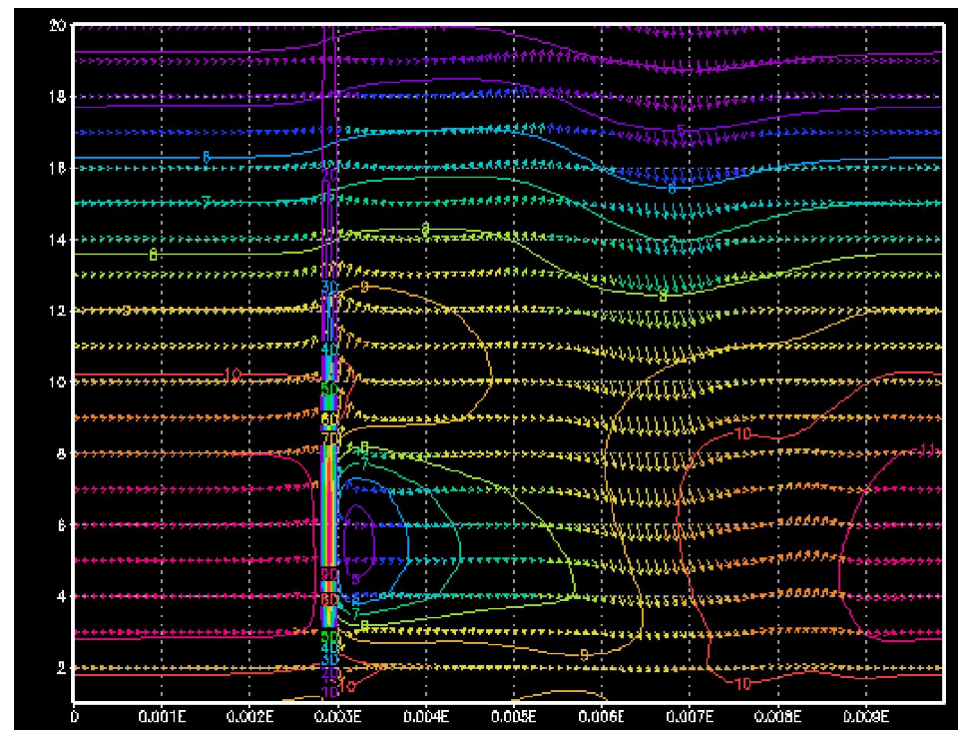
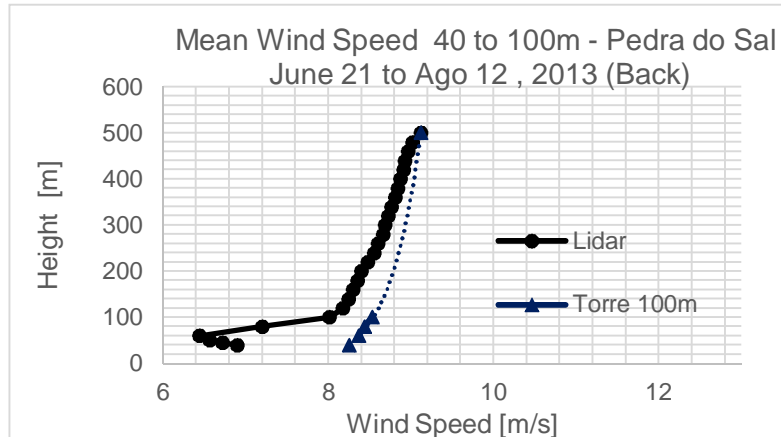
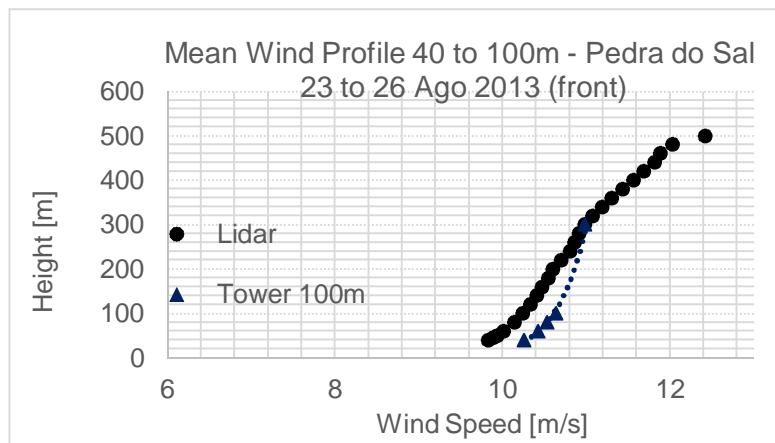
$$\frac{\partial KE_{\text{drag}}}{\partial t} = -\frac{1}{2}C_T(|\mathbf{V}|)\rho|\mathbf{V}|^3A.$$

Fonte: Fitch (2012)



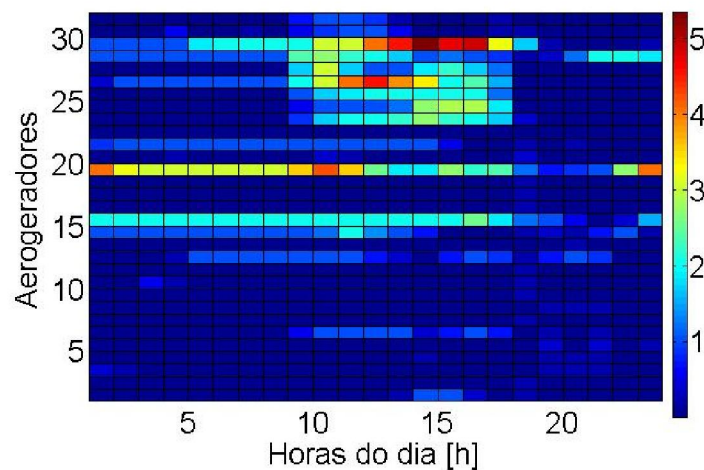
Modelo do Parque – WRF Windfarm

- Perfil Velocidade na esteira

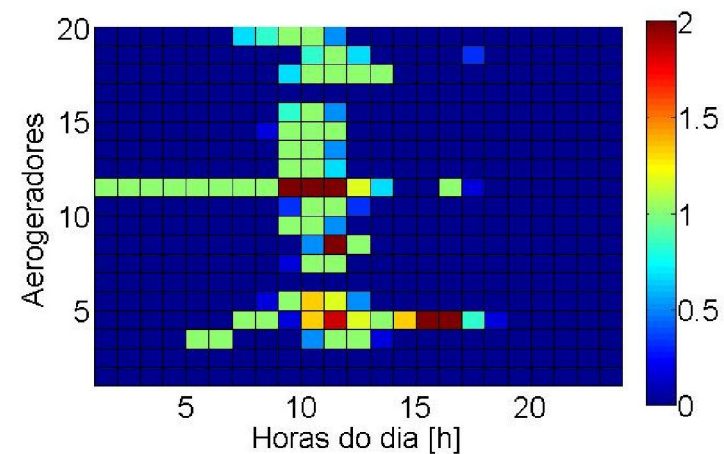


Modelo do Parque – Manutenção

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

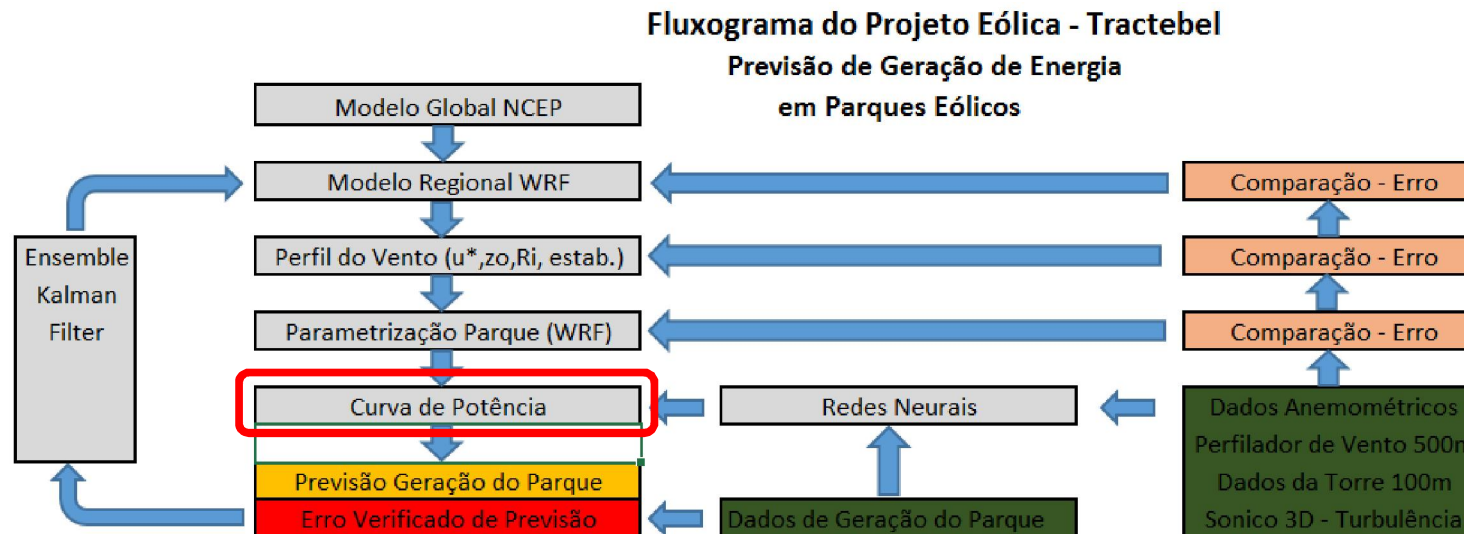


Beberibe-CE



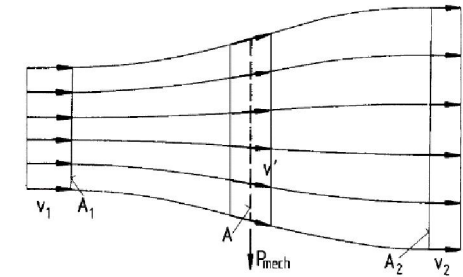
Pedra do Sal-PI

Visão Geral – Previsão de Geração de Energia em Parques Eólicos

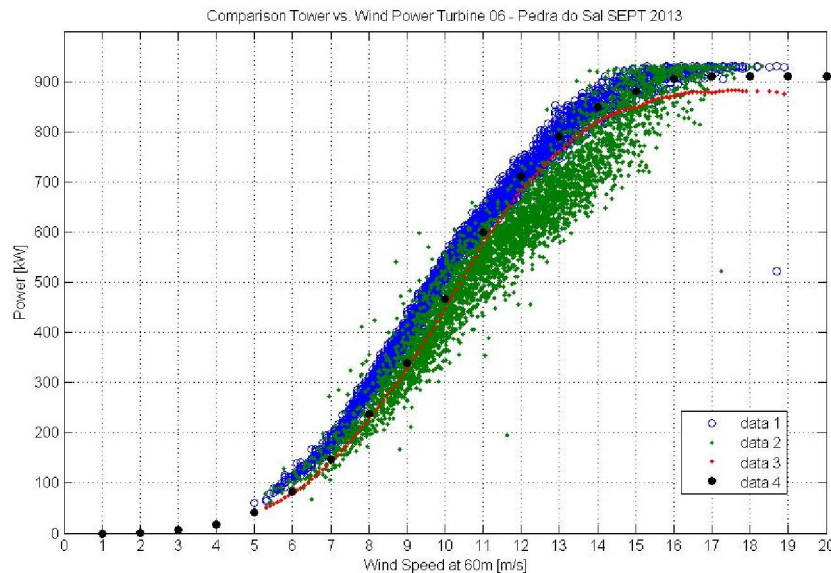


Curva de Potência

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



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

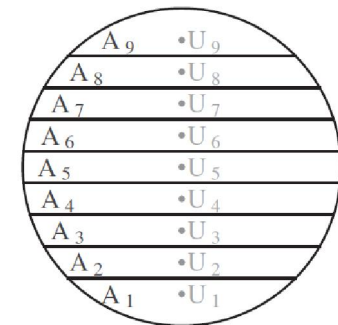


$$P = \frac{1}{2}\rho v^3 A \quad (W)$$

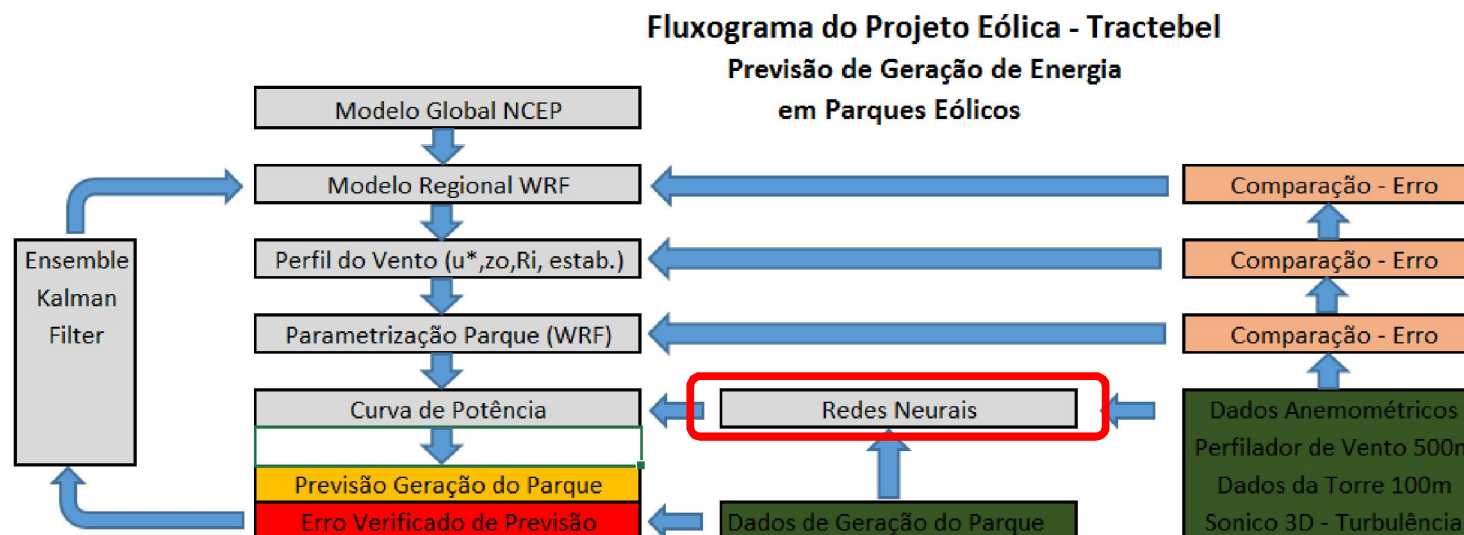
[Hau \(2006\)](#)

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

[Wagner \(2011\)](#)

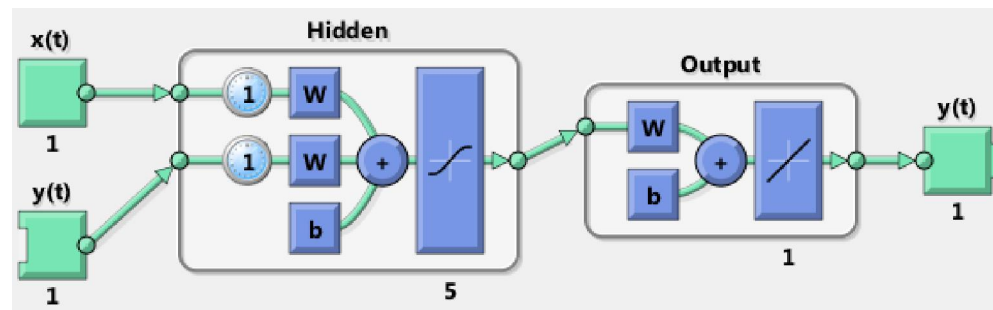


Visão Geral – Previsão de Geração de Energia em Parques Eólicos



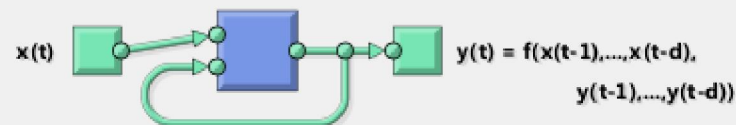
Redes Neurais

- 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



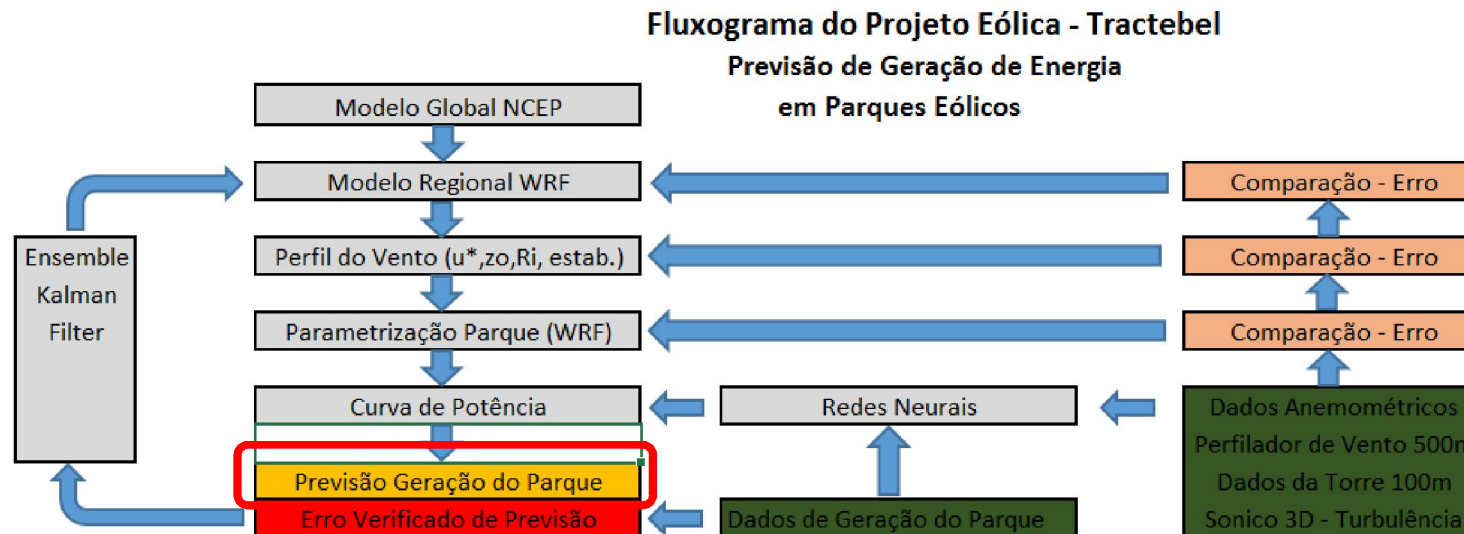
○ Nonlinear Autoregressive with External (Exogenous) Input (NARX)

Predict series $y(t)$ given d past values of $y(t)$ and another series $x(t)$.



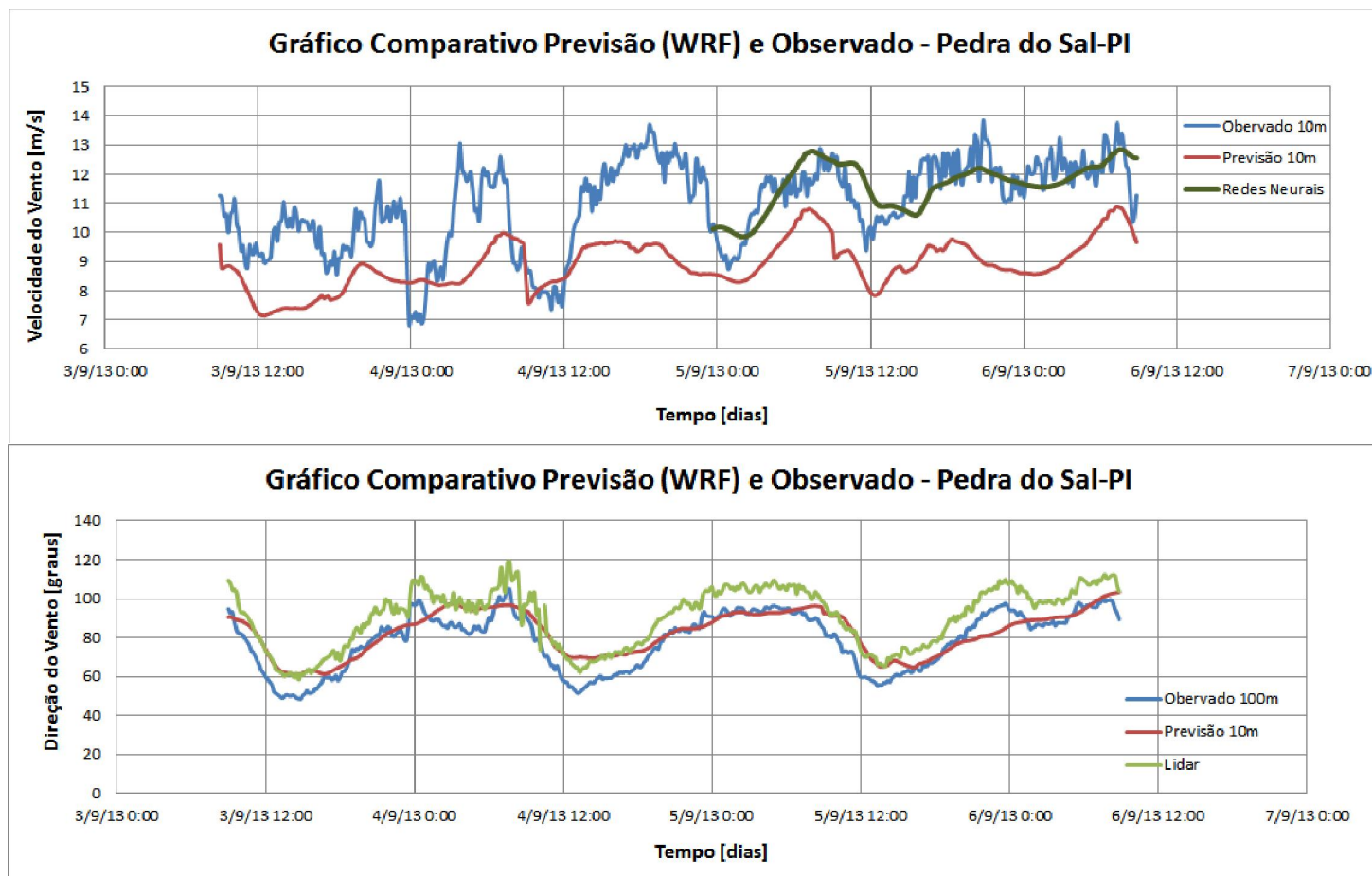
Fonte: Matlab

Visão Geral – Previsão de Geração de Energia em Parques Eólicos

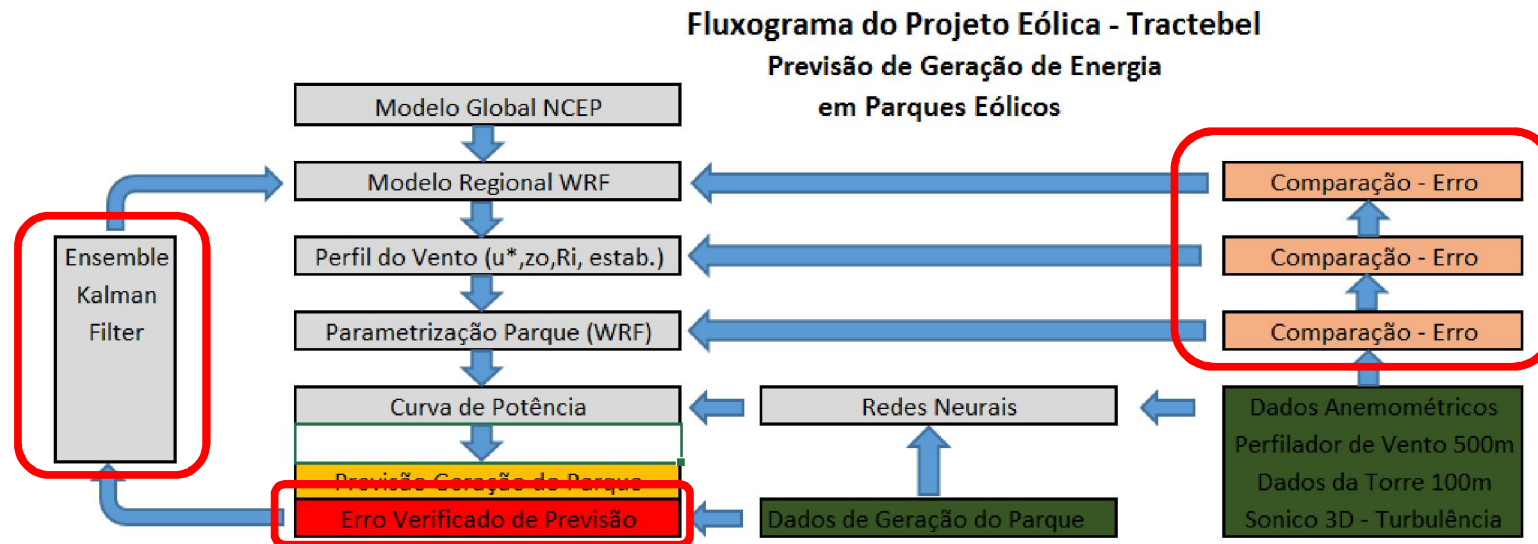


Previsão de Vento

- Em 10m (por enquanto)



Visão Geral – Previsão de Geração de Energia em Parques Eólicos



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

