

# **Modelos estocásticos para avaliação de contratos de energia renovável**

***Colóquio Interinstitucional  
Modelos estocásticos e aplicações  
CBPF  
8/5/2013***

***Álvaro Veiga***

***Prof. Associado, DEE, PUC-Rio, [alvf@ele.puc-rio](mailto:alvf@ele.puc-rio).***

***Instituto de Atuária e Gestão de Risco: IAPUC***

***Departamento de Engenharia Elétrica - DEE***

***Laboratório de Métodos Quantitativos de Apoio à Decisão LAB-MAD***

# Agenda

- O LAB-MAD
- Introdução
  - ✓ O modelo de comercialização de energia: ACL e ACR e o PLD
  - ✓ O risco de preço e quantidade para contratos de energia no ACL
  - ✓ Hedge com PCH's
  - ✓ Otimização risco/retorno dos contratos no ACL
- Elementos da solução
  - ✓ Descrição probabilística da receita dos contratos
    - Modelo financeiro
    - Fatores de risco
    - Variáveis de decisão
  - ✓ Medida de risco: CVAR
  - ✓ Otimização estocástica → árvore de cenário
- O modelo de vento e vazão
- Ferramenta de contratação ótima

# **LAB-MAD**

## **Laboratório de Métodos Quantitativos de Apoio à Decisão**

- Coordenação
  - ✓ Álvaro Veiga, Cristiano Fernandes, Alexandre Street, Delberis Lima.
- Áreas de atuação
  - ✓ Energia
  - ✓ Seguros e Previdência
  - ✓ Mercado Financeiro
- Pesquisa básica
  - ✓ Programação estocástica com restrições de risco;
  - ✓ Otimização de grande porte;
  - ✓ Modelos estatísticos não lineares e/ou não gaussianos;
  - ✓ Modelos estatísticos multivariados; e
  - ✓ Métodos quantitativos para análise de risco e retorno.

# **LAB-MAD**

## **Laboratório de Métodos Quantitativos de Apoio à Decisão**

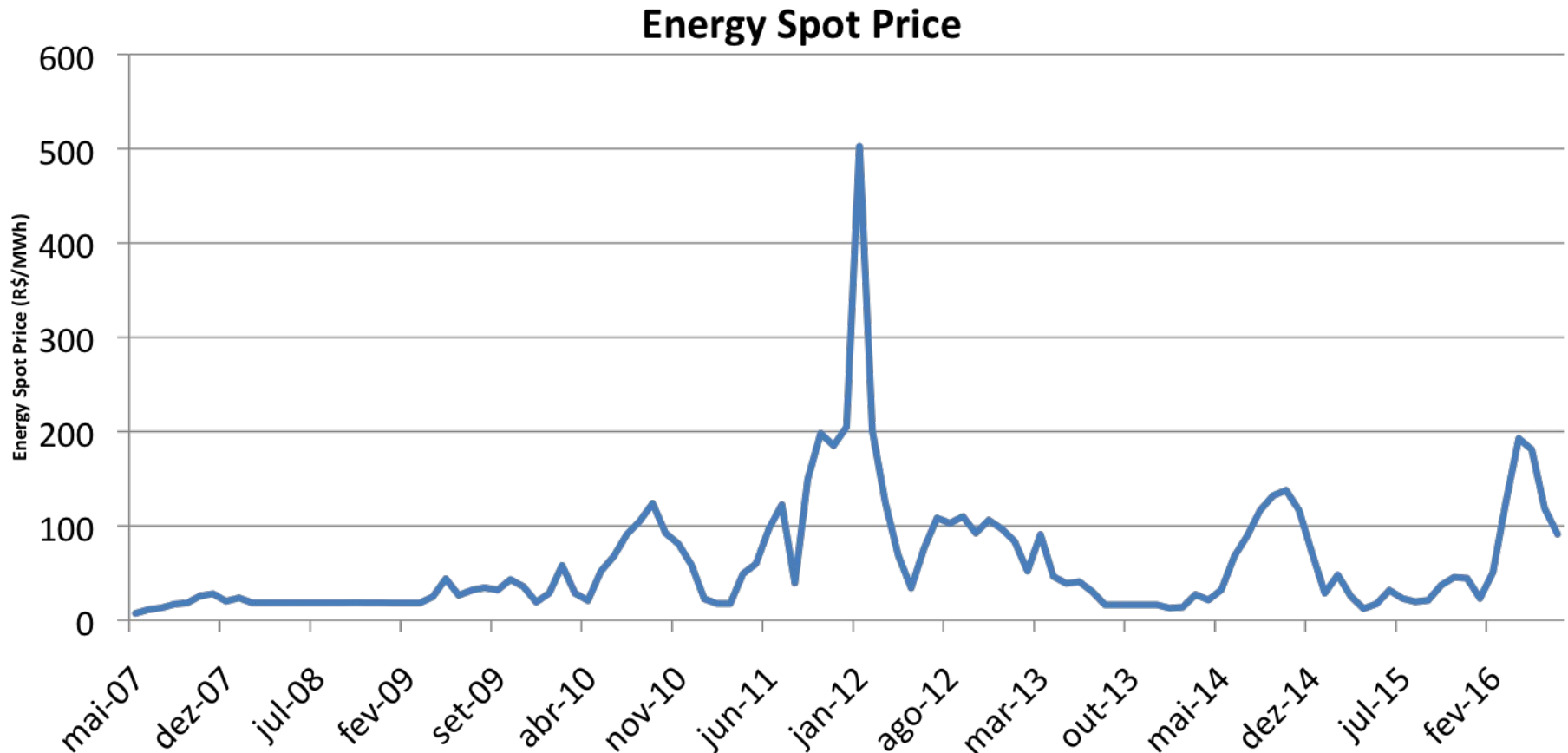
- Projetos recentes
  - ✓ Contratação ótima de energia hídrica e eólica (UTE - Norte Fluminense, 2011-2012);
  - ✓ Gestão de ativos e passivos para o setor de petróleo (Petrobras, 2009-2011);
  - ✓ Cálculo de reserva IBNR para o seguro obrigatório de veículos (Seguradora Lider, 2012);
  - ✓ Análise de persistência para produtos de Previdência Privada (LIMRA/Bradesco, 2012);
  - ✓ Análise de risco e retornos para projetos na área de petróleo (Petrobras, 2008-2009);
  - ✓ Indicadores de qualidade de geração (IPEA, 2011-2012);
  - ✓ Modelo de otimização estocástica para ALM para previdência pública (Governo de Angola/DGM, 2008-2009); e
  - ✓ Modelo interno para constituição de reservas (Mongeral, 2007-2008).

# Comercialização de energia

- ACR *Ambiente de comercialização REGULADO*
  - ✓ Compra: Consumidor cativo, Distribuidoras
  - ✓ Venda: Geradores
  - ✓ Contratos: disponibilidade → total sobre um período longo
- ACL *Ambiente de comercialização LIVRE*
  - ✓ Compra: Consumidor livre, comercializadoras
  - ✓ Venda: Gerador, comercializadoras
  - ✓ Contratos: total sobre um período curto (ex: mês a mês)
  - ✓ A diferença é resolvida no MAE, pelo PLD
- MAE: Mercado Atacadista de Energia
  - ✓ O preço spot: PLD (*Preço de Liquidação das Diferenças* )
  - ✓ Formação do PLD
    - Operação centralizada pelo ONS
    - Programação dual estocástica → NEWAVE
      - a variável dual é o custo marginal de operação
      - valor da água ↔ preço da térmica mais cara
  - ✓ O PLD é extremamente volátil → RISCO

# Introduction – Energy Spot Price

- Its main characteristic is the high volatility pattern
  - ✓ May be very slow for several years and then increase sharply for a few months before going back to the “normal” levels.

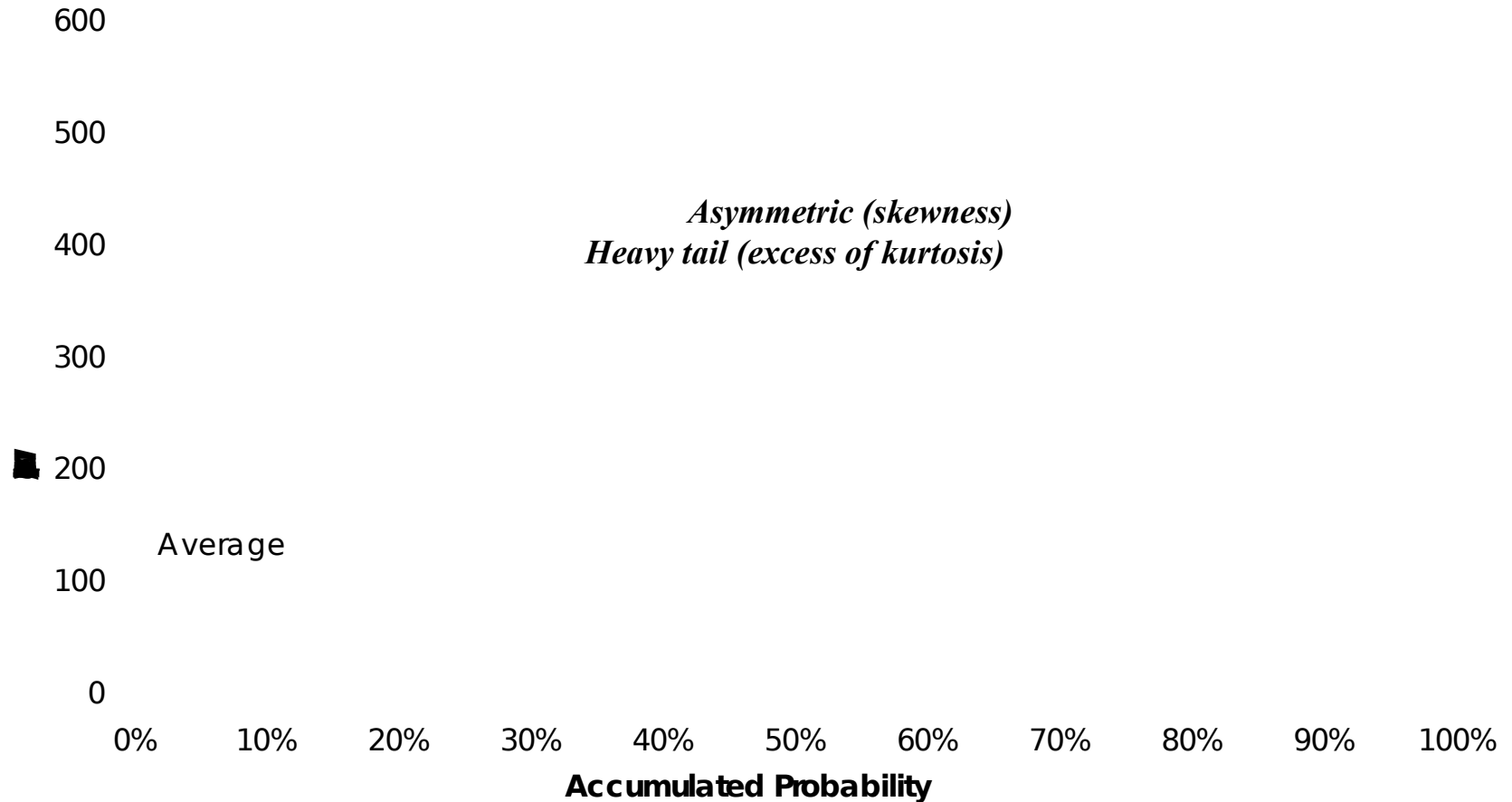


# **Preço spot contra energia armazenada**

# Brazilian System Overview: risk in the contract market

## Brazilian System Spot Prices - Quantile Function

SE zone - Simulated data (average prices during 2011)

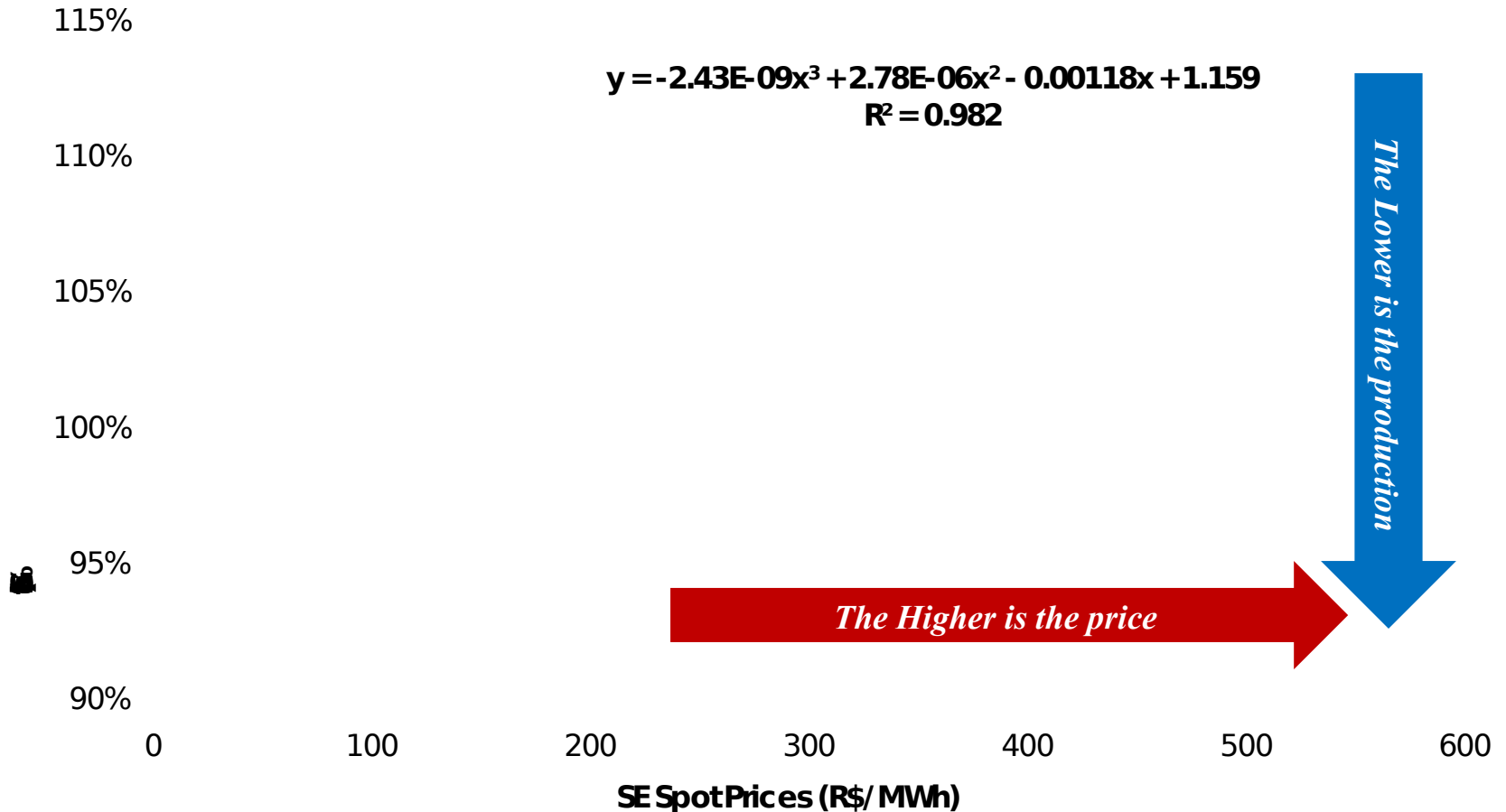




# Brazilian System Overview: risk in the contract market

## Hydroelectric Generation vs Spot Prices

SE zone - Simulated data for 2011



# NEWAVE

- Definição do PLD
  - ✓ Cadeia de modelos de otimização da operação do sistema gerador de energia elétrica
  - ✓ NEWAVE(mês, 5 anos) : simplificação: 4 subsistemas hídricos, classe de térmica.
  - ✓ DECOMP(semana, 2 a 4 meses): geradores tratados individualmente.
  - ✓ DESSEM (30min, 1 semana): determinístico.
- NEWAVE
  - ✓ Simplificação:
    - 4 reservatórios equivalentes (total: 110 com reservatório + 78 PCH's)
    - Armazenamento: água → energia equivalente
    - Afluência: Energia Natural Equivalente (ENA)
    - Classes de térmicas: requisita pela ordem de preço.
  - ✓ Insumos:
    - Modelo estocástico de simulação de ENAs → cenários → Operação ótima
    - Modelo Par(p).
  - ✓ Saída:
    - Operação do mês corrente
    - 2000 cenários de ENAs e PLDs para o horizonte de até 5 anos

# **Esquema dos reservatórios brasileiros**

# Brazilian System Overview: risk in the contract market

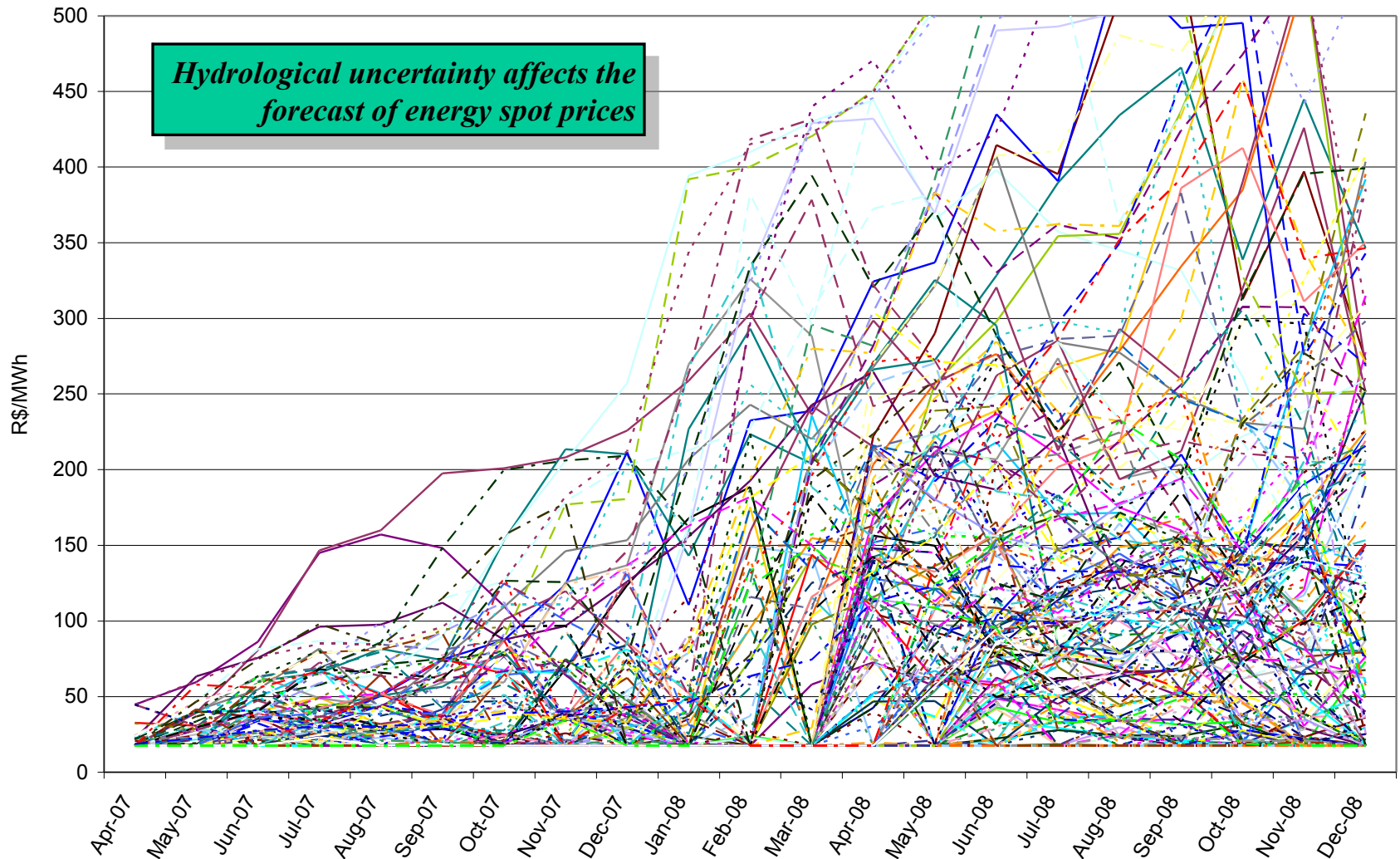


Figure Powered by PSR Consulting

preparado por Alvaro Veiga, PUC-Rio, [alvf@ele.puc-rio.br](mailto:alvf@ele.puc-rio.br)

# Receita oriunda de um contrato de quantidade

Supondo que um gerador de energia renovável tem um contrato de venda de quantidade de energia, seu retorno pode ser calculado em função da geração e do PLD pela seguinte expressão:

$$R(G_t; PLD_t) = P^V h_t Q + (G_t - Q) PLD_t h_t$$

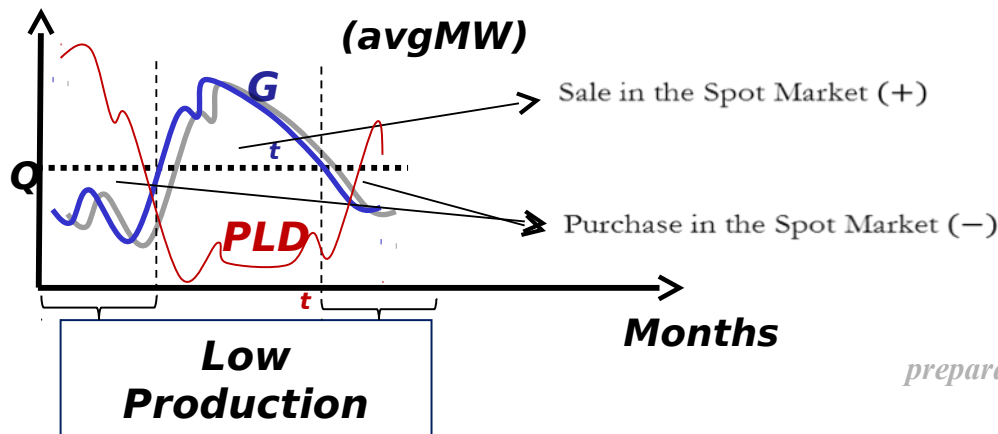
Equação 1 - Função Retorno

*Valores futuros desconhecidos*  
**RISCO**

Onde:  $P^V$  - Valor (R\$/MWh) acordado em contrato pelo gerador;  
 $h_t$  - Número de horas (h) de uma semana;  
 $Q$  - Quantidade de energia (MW) que o gerador acordou vender por semana;  
 $G_t$  - Quantidade de energia (MW) que foi efetivamente gerada na semana t;  
 $PLD_t$  - Valor do PLD (R\$) na semana t.

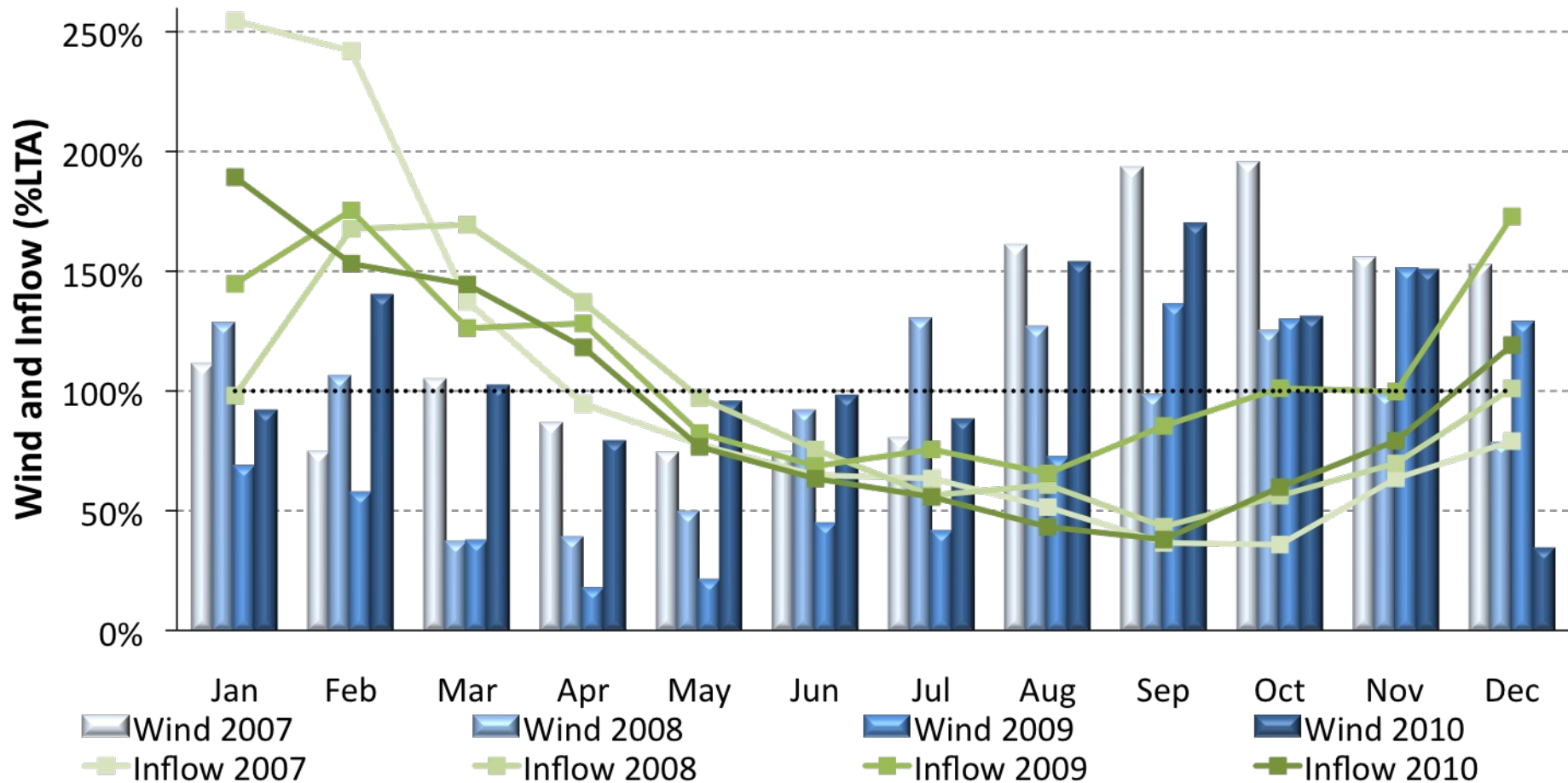
# O risco de preço e quantidade em contratos de energia

- Energias renováveis
  - ✓ Intermitente
  - ✓ Alto risco no ACL → Total de energia em para períodos curtos
  - ✓ Em geral preferem o ACR → Contratos de total de energia no longo prazo
- Energia Eólica:
  - ✓ Geração intermitente
    - Altíssimo risco em contratos de quantidade
  - ✓ PCH: Pequena central Elétrica:
    - Menor risco mas alto assim mesmo
- Neste trabalho
  - ✓ Carteira PCH + Eólica
  - ✓ Hedge Natural → Complementariedade Vento – Vazão
  - ✓ Nosso modelo vai mostrar ainda que há ainda uma correlação negativa



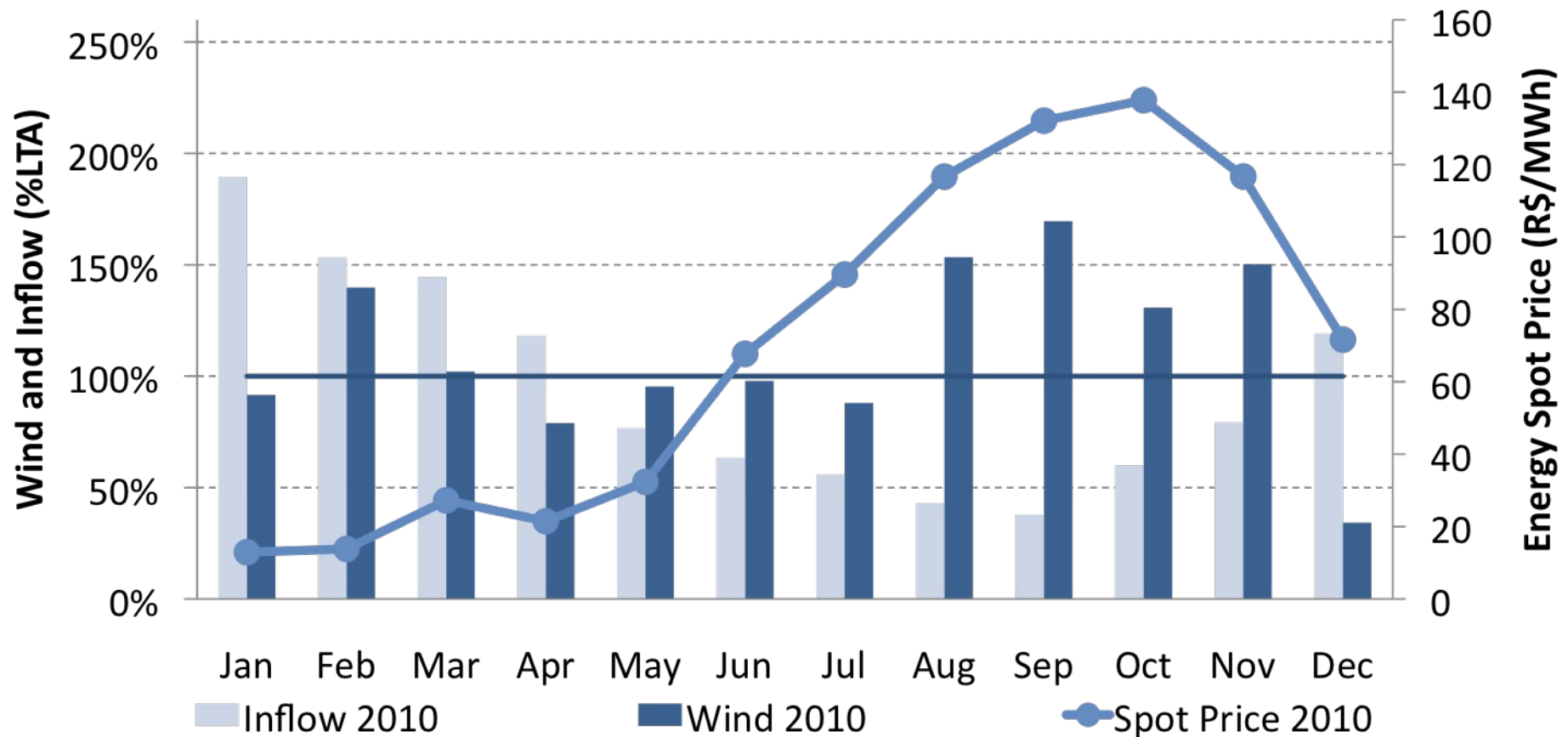
# Hedge com PCHs → Complementariedade

- PCH : Pequena central hidrelétrica
  - ✓ Não tem reservatório → Geração proporcional à VAZÃO do rio



# Hedge com PCHs → Complementariedade

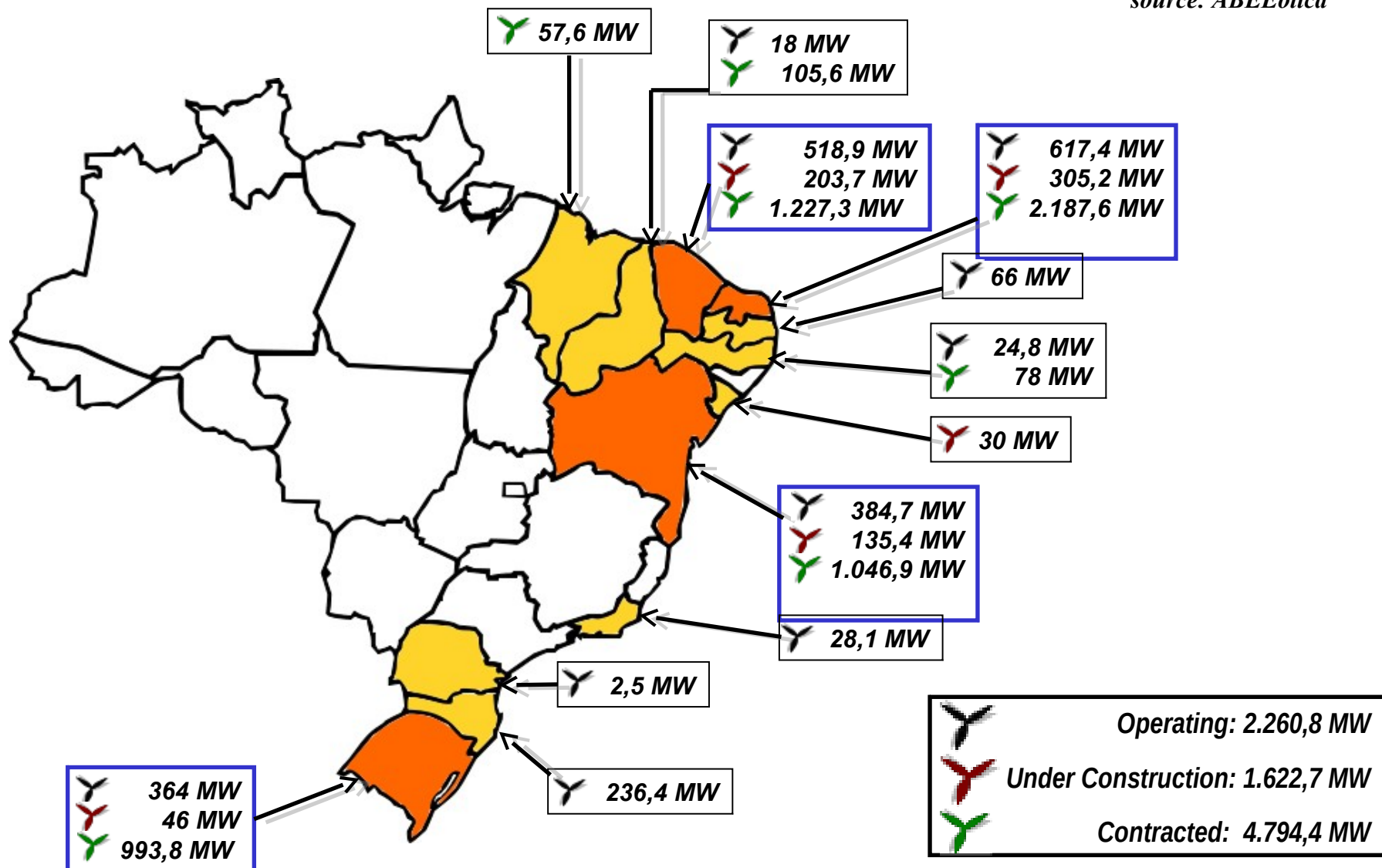
- PCH : Pequena central hidrelétrica
  - ✓ Não tem reservatório → Geração proporcional à VAZÃO do rio



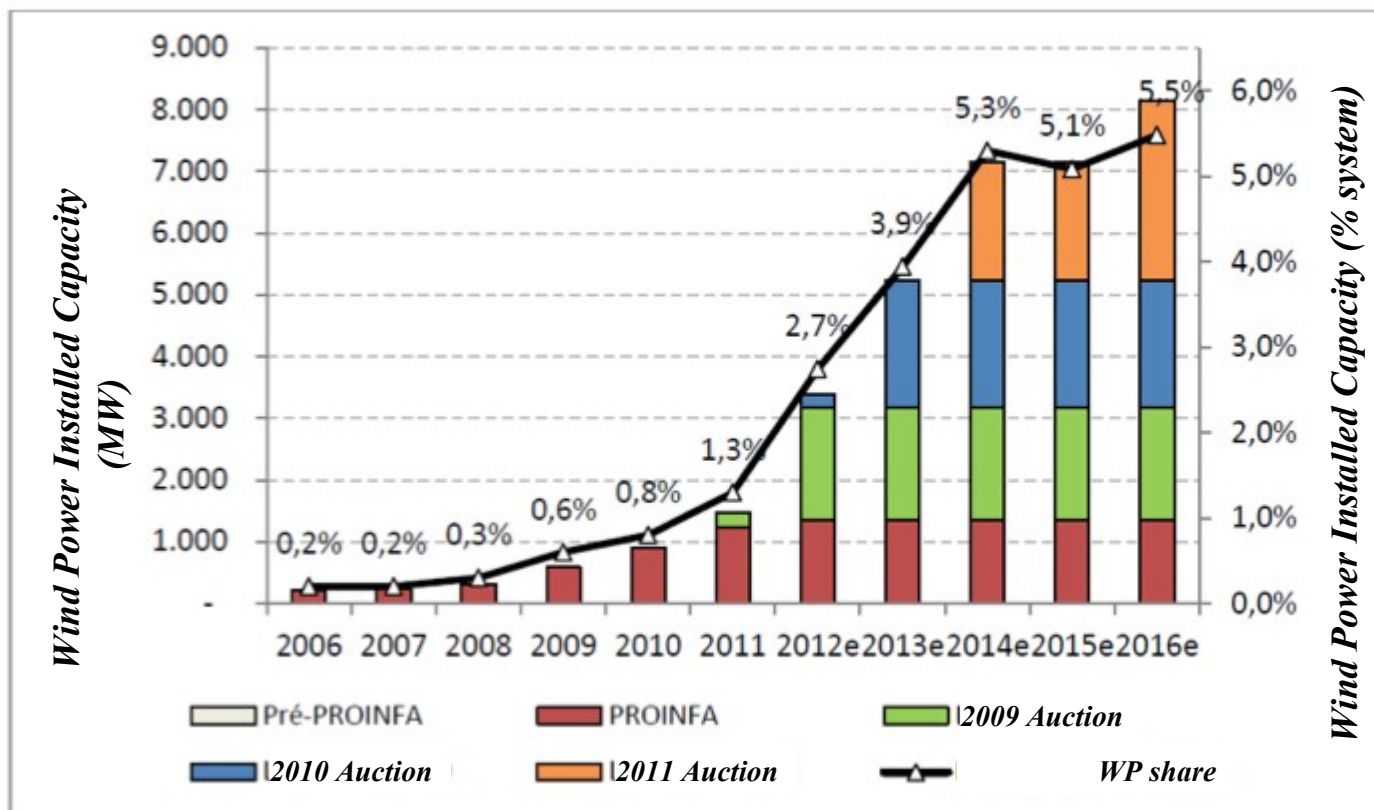


# Wind Power Location

source: ABEEólica

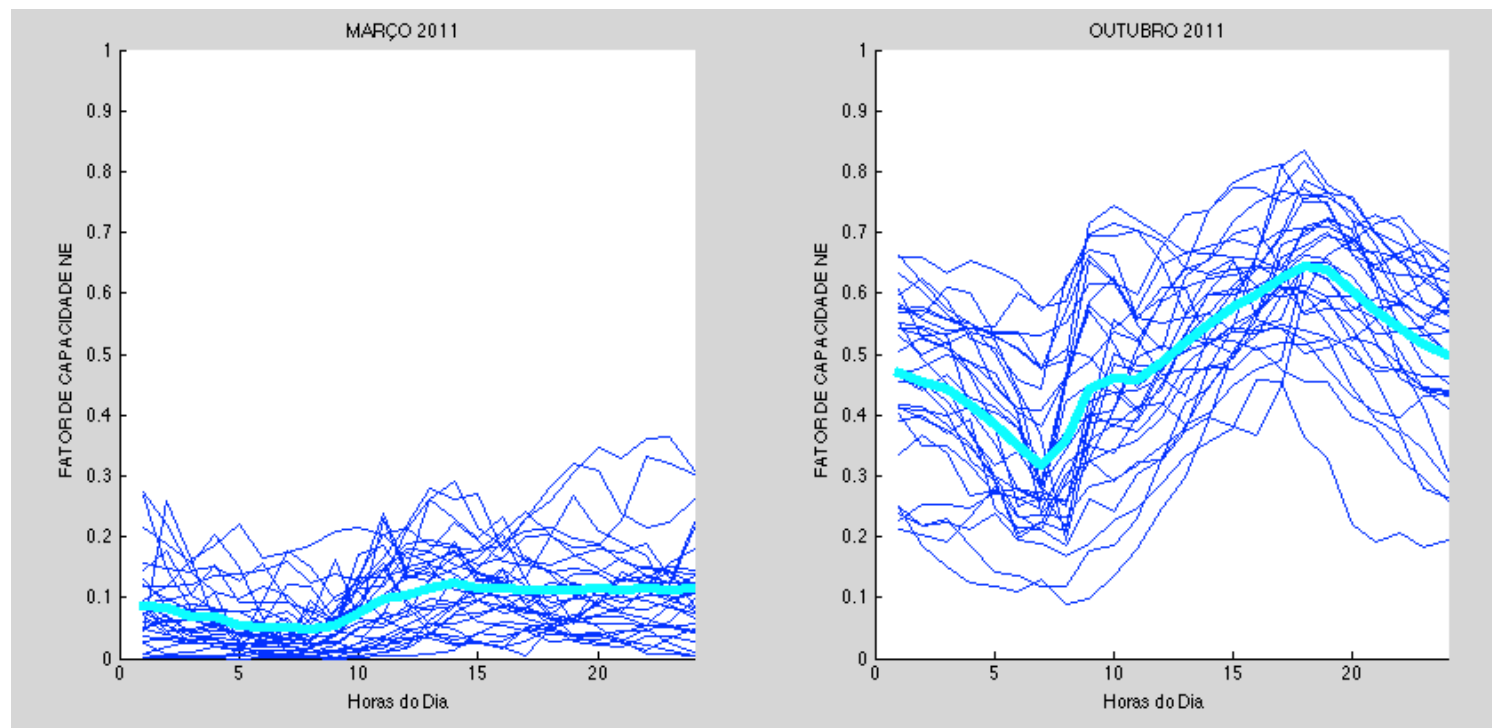
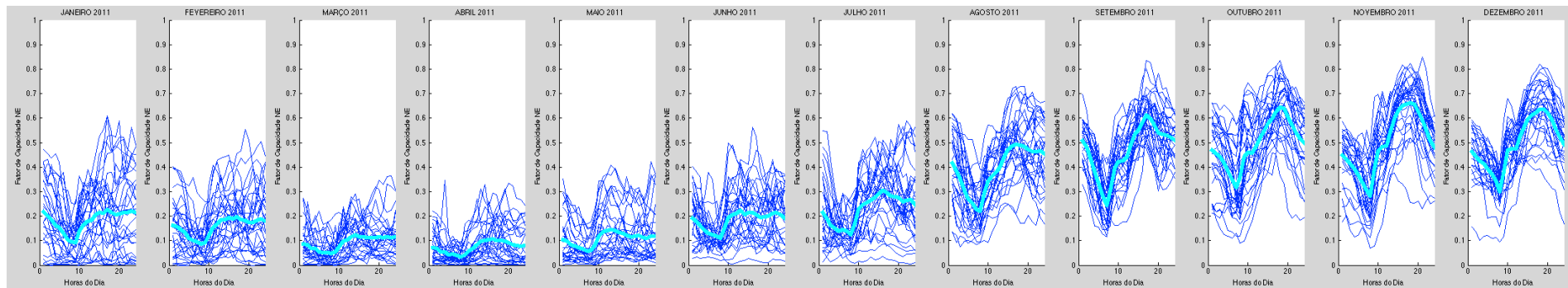


# Wind Power Expansion: Installed Capacity



Source: ABEEólica/ANEEL/CCEE

# Northeastern Wind Power Generation Profile



# Otimização risco/retorno dos carteiras de contratos no ACL com pool de produtores eólicos e hídricos

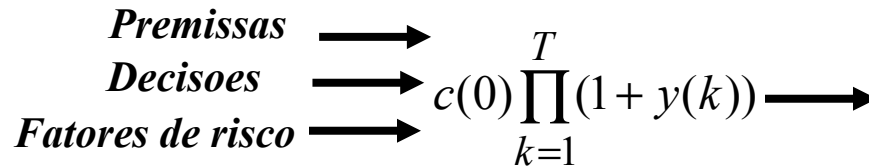
- Objetivo
  - ✓ Maximizar receita do contrato impondo um limite de risco
    - $\text{Max } \{ \text{Valor esperado da receita} - \alpha \text{ CVAR}(\text{receita}) \}$
- Variáveis de Decisão
  - ✓ Quantidade
  - ✓ Proporção eólica / PCH
- Insumos
  - ✓ Modelo financeiro para cada tipo de contrato como uma função de
    - Fatores de risco: Gerações hídricas e eólicas e o PLD
    - Premissas: preços e prazos
  - ✓ Modelo probabilístico CONJUNTO para geração de cenários
    - produções hídricas e eólicas e o PLD
      - Programa NEWAVE gera ENAs e PLDs
      - VAR para as gerações hídricas e eólicas em função das ENAs

# Análise de Risco

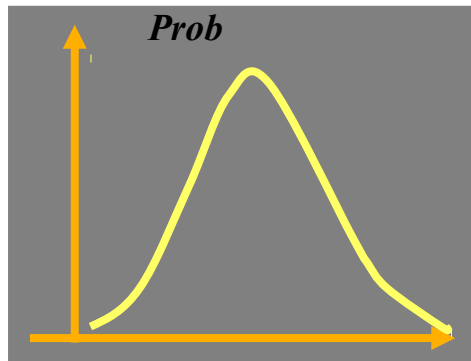
- Risco se refere à ocorrência de algum evento adverso
  - ✓ Em geral → Probabilidade/frequência -- Severidade
  - ✓ Risco Financeiro → volatilidade do fator de risco – exposição
- Em análise de investimento ou gestão de risco
  - ✓ Variável de interesse
    - Valor de uma carteira de ativos
    - Resultado = ativo – passivo
      - risco de falência
    - Valor carteira de ativos de liquidez imediata
      - risco de default (títulos, apólices, anualidades), fornecedores, retardar investimentos.
  - ✓ Mapeamento da variável de interesse
    - Função matemática que calcula a variável de interesse em função de
      - Fatores de risco: fontes do risco, variáveis de evolução incerta
      - Variáveis de decisão: variáveis sob o controle do gestor
      - Premissas: variáveis cujo valor é fixo por razões de simulação ou decisão.
  - ✓ Medida de risco → Enfoques Probabilístico e Determini
    - Associada a uma meta, um objetivo
    - Associada a uma probabilidade → enfoque probabilístico → variabilidade = aleatoriedade
    - Associada a uma sensibilidade → enfoque de finanças → variabilidade = sensibilidade
    - Associada a uma medida de variabilidade estatística
  - ✓ Gestão de risco → controlar a exposição aos fatores de risco (alocação, derivativos, seguros)

# Visão esquemática

## Modelo Financeiro

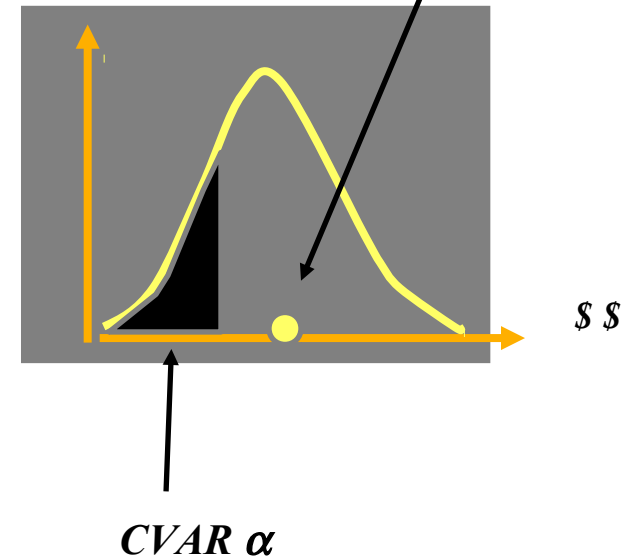


## Variabilidade



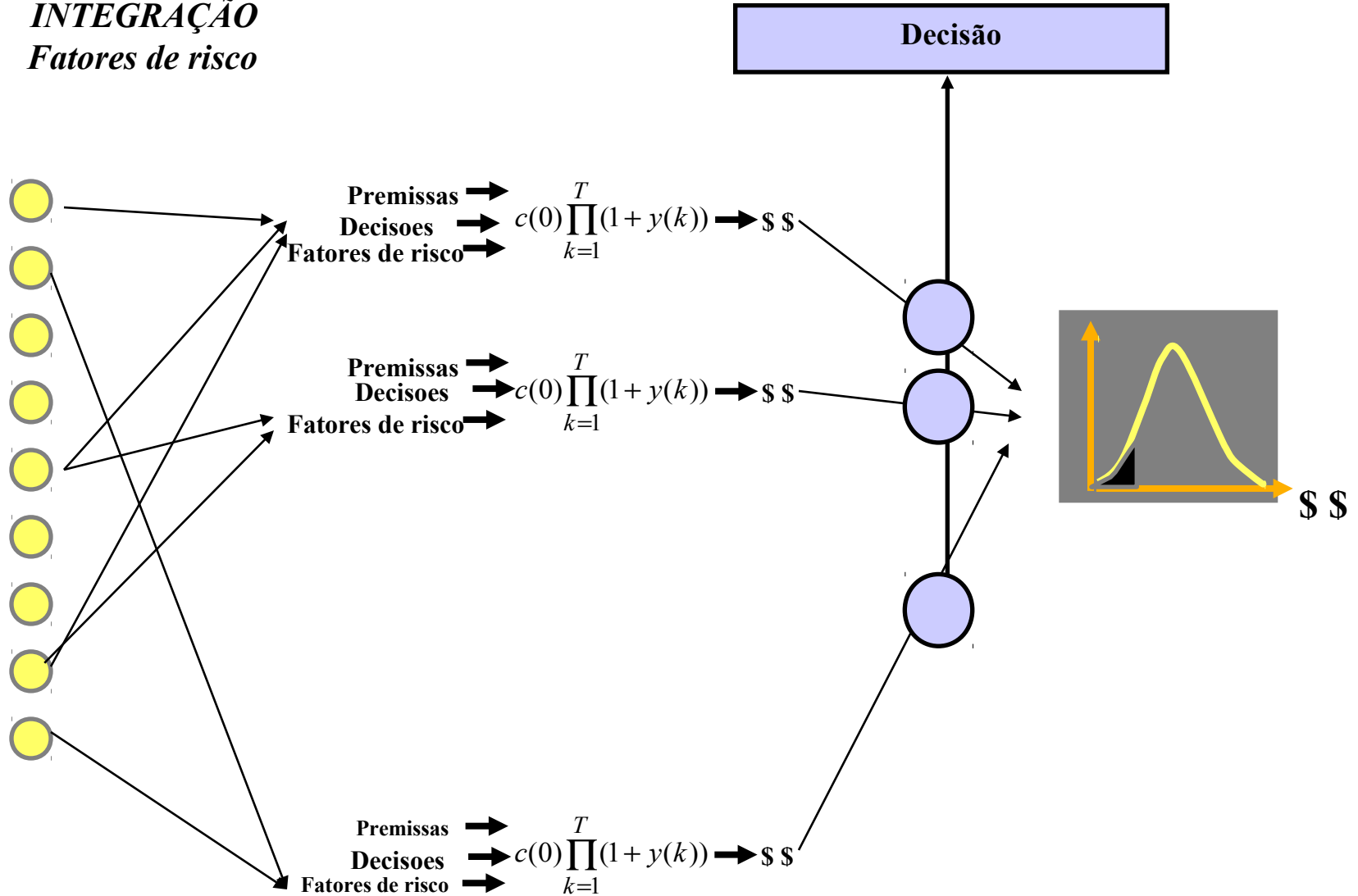
*Descrição Probabilística  
ou  
Cenários para os fatores*

$$\longrightarrow c(0) \prod_{k=1}^T (1 + y(k)) \longrightarrow$$



# Sistema Escalável

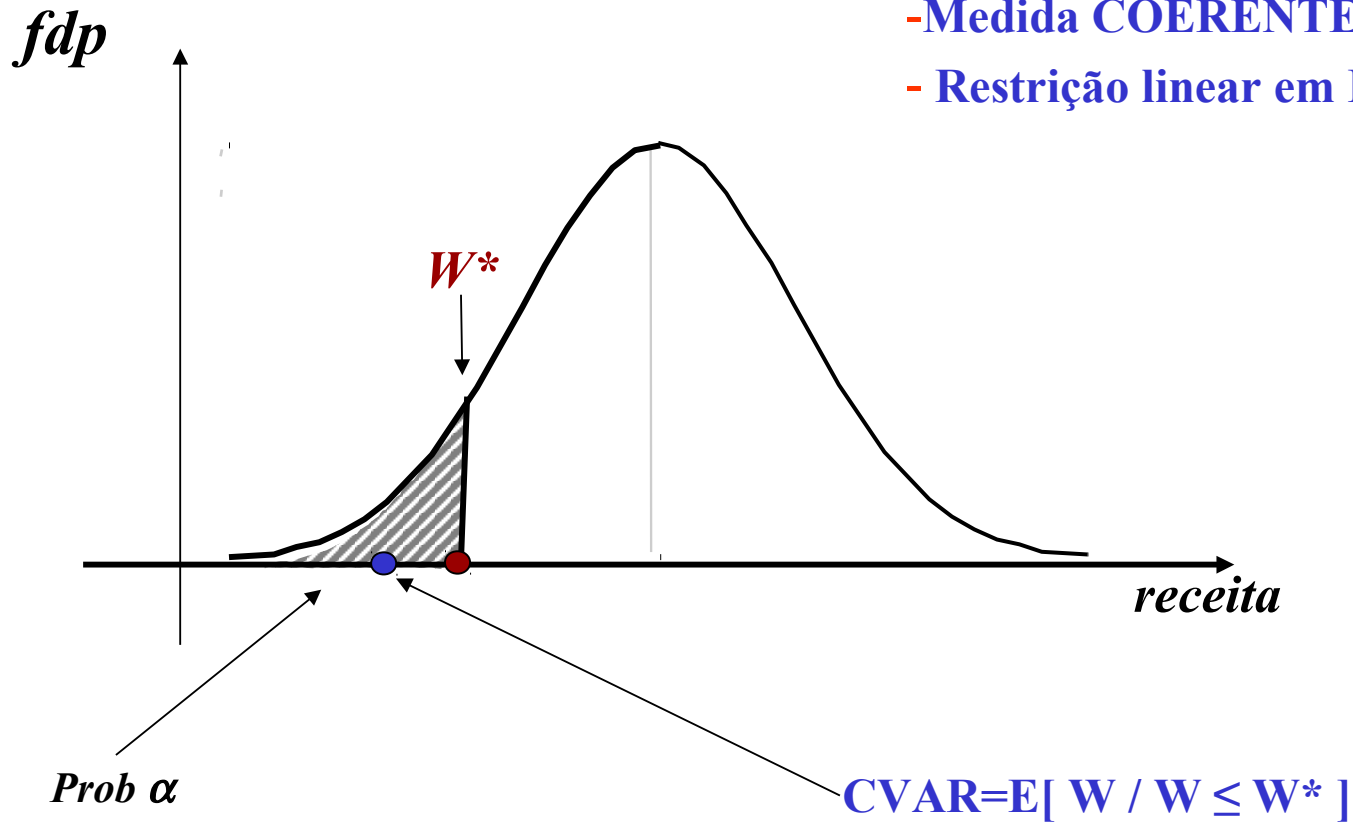
**INTEGRAÇÃO**  
*Fatores de risco*



# Medida de risco CVAR

## VANTAGENS:

- Medida COERENTE
- Restrição linear em PL

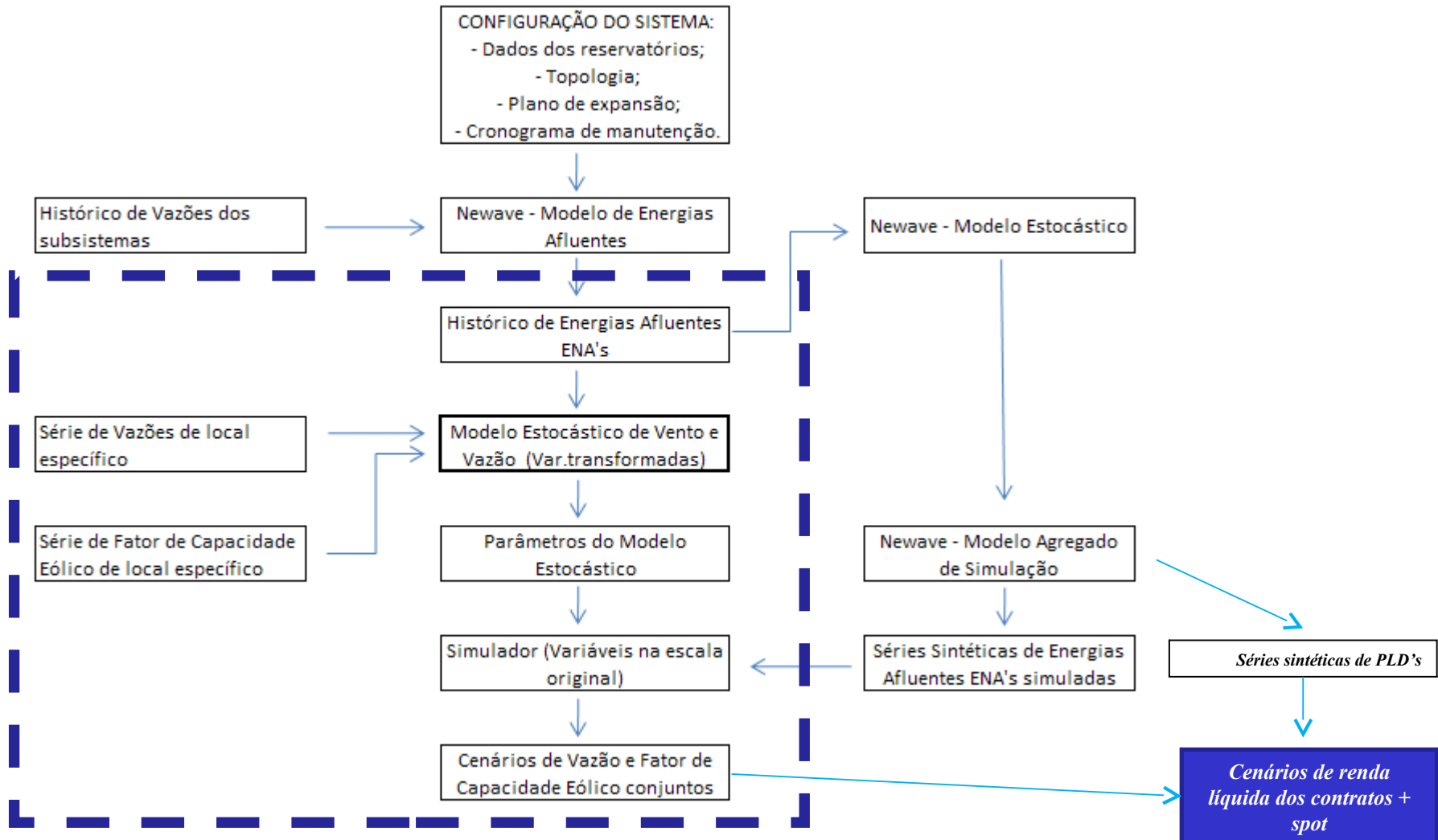




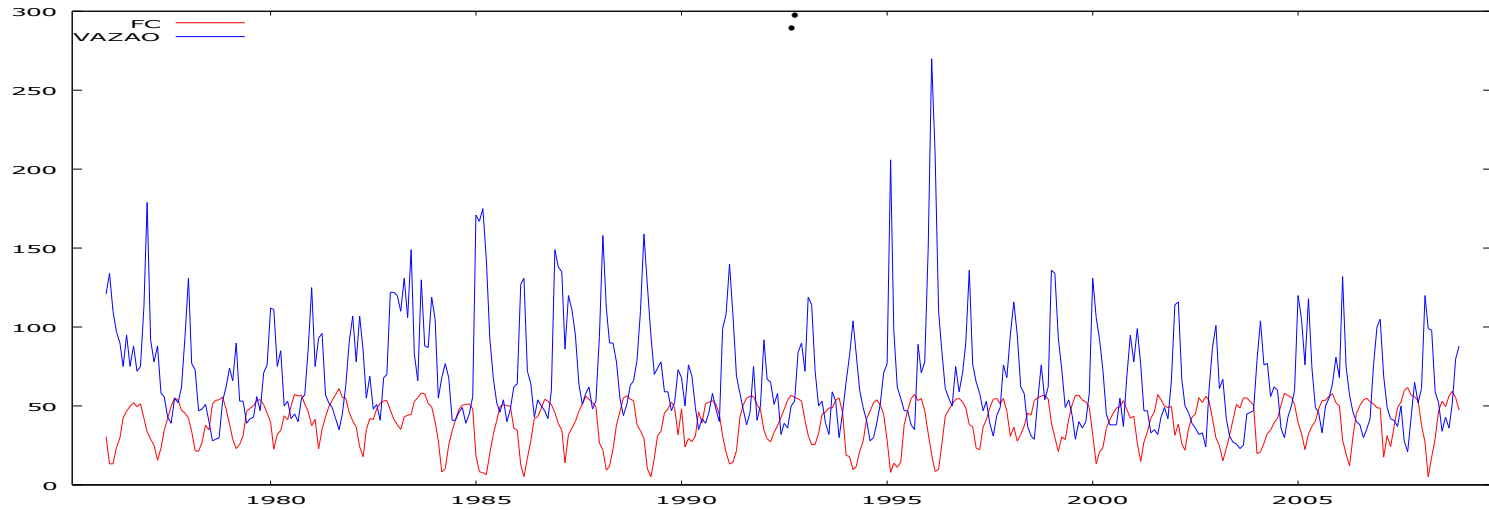
# Modelo de Simulação de Vento e Vazão

- Modelo VARX(12) de geração de cenários para Vento e Vazão
  - ✓ Coerentes com os cenários de ENA's e PLD's gerados pelo programa NEWAVE
  - ✓ Cenários FC, Vz e PLD → cenários para a renda oriunda de contratos de energia.
- Variáveis:
  - ✓ Vazão (Vz)
    - Energia gerada por uma PCH é proporcional à vazão
    - $V_z \geq 0$
  - ✓ Fator de Capacidade (FC)
    - Energia gerada = FC x Capacidade Nominal da Turbina
    - $0 \leq FC \leq 1$
- Ajuste do modelo desta apresentação:
  - ✓ Dados mensais: jan/1976 a jul/2009 (403 meses, 33/34 dados para cada mês)
  - ✓ ENA's de 4 subsistemas calculados pelo NEWAVE (configuração da data do estudo).
  - ✓ Histórico de FC e Vz
- **Uso de transformações para garantir cenários dentro do intervalo válido.**

# Visão geral do sistema e do simulador



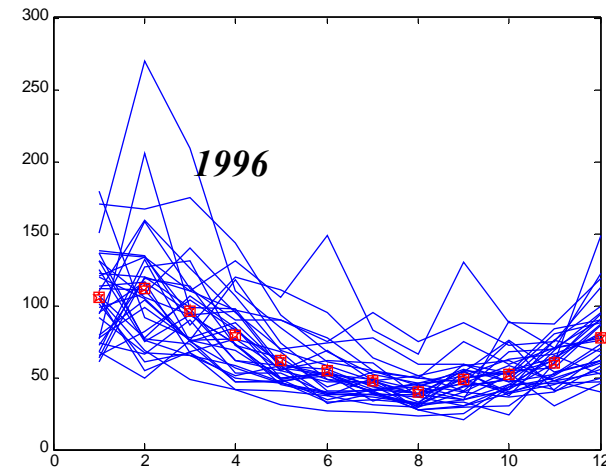
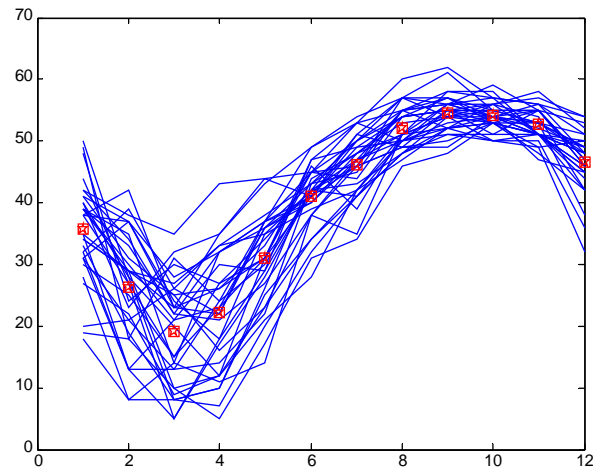
## *Complementariedade sazonal*



*FC*

*médias e variâncias são sazonais*

*Vz*



# Transformações das variáveis

- Logaritmo da Razão de Chance (LRC) adaptada ao problema;

✓ Variável  $X$   $\min \leq X \leq \max$  ;

$$Y = \ln \left( \frac{X - \text{Min}}{\text{Max} - X} \right)$$

- Transformação de FC

$$FC'_t = \ln \left( \frac{FC_t}{100 - FC_t} \right) ; \quad \forall t \in T$$

- Transformação de Vz

✓ Não há limite máximo para esta variável. Limite imposto ad-hoc.

$$Vz'_t = \ln \left( \frac{Vz_t}{300 - Vz_t} \right) ; \quad \forall t \in T$$

- Outras variáveis: ENA's

✓ Transformação logarítmica

$$SE'_t = \ln(SE_t) ; \quad S'_t = \ln(S_t) ; \quad NE'_t = \ln(NE_t) ; \quad N'_t = \ln(N_t) ; \quad \forall t \in T$$

# MODELO VARX(12)

- Variável dependente
  - ✓ Vetor com duas componentes:  $FC'$  e  $Vz'$  (transformação LRC).
- Variáveis independentes:
  - ✓ Valores de 12 defasagens de  $FC'$  e  $Vz'$ .
  - ✓ Valores contemporâneos e de uma defasagem das ENAS:  $SE'$ ,  $S'$ ,  $NE'$ ,  $N'$ .
- Sazonalidade anual:
  - ✓ Média: Captada pela ENAS e pelas defasagens (até 12) de  $FC$  e  $Vz$ .
  - ✓ Variância: Lei de variância: um valor para cada mês.
- Estrutura da componente aleatória
  - ✓ Ruído independente padronizado com dimensão 2.
  - ✓ Média nula, Matriz de covariâncias: identidade.
- Parâmetros a serem estimados por componente
  - ✓ Coeficientes de  $FC$  e  $Vz$ : 24
  - ✓ Coeficientes das ENA': 24
  - ✓ 12 variâncias

## Segue em outros arquivos.....

- Formulação matemática e exemplos
  - ✓ Relatorio-5\_P&D\_NorteFlu\_PUC-Rio\_FINAL\_COM-ALTERACOES.pdf
- Um exemplo de otimização
  - ✓ Wind Forum Brazil 2013 - Prof Alexandre Street - DEE PUC-Rio - 26-02-13.pptx

## Continuação

- Relatório 4
- Incluir apresentação Norte Fluminense