

Modelos para o Planejamento da Operação Energética de Longo e Médio Prazos do Sistema Elétrico Brasileiro



Professora Maria Elvira Maceira

Departamento de Estatística - IME

18 de março de 2025

14:30 – 16:00, sala RAV62, 6º andar, bloco F

https://homeprojextransicaoenergetica.netlify.app/_site/eventos

Projeto de Extensão

TRANSIÇÃO ENERGÉTICA: vantagens e desafios técnicos das energias renováveis para o equilíbrio entre custos, segurança e mudanças climáticas



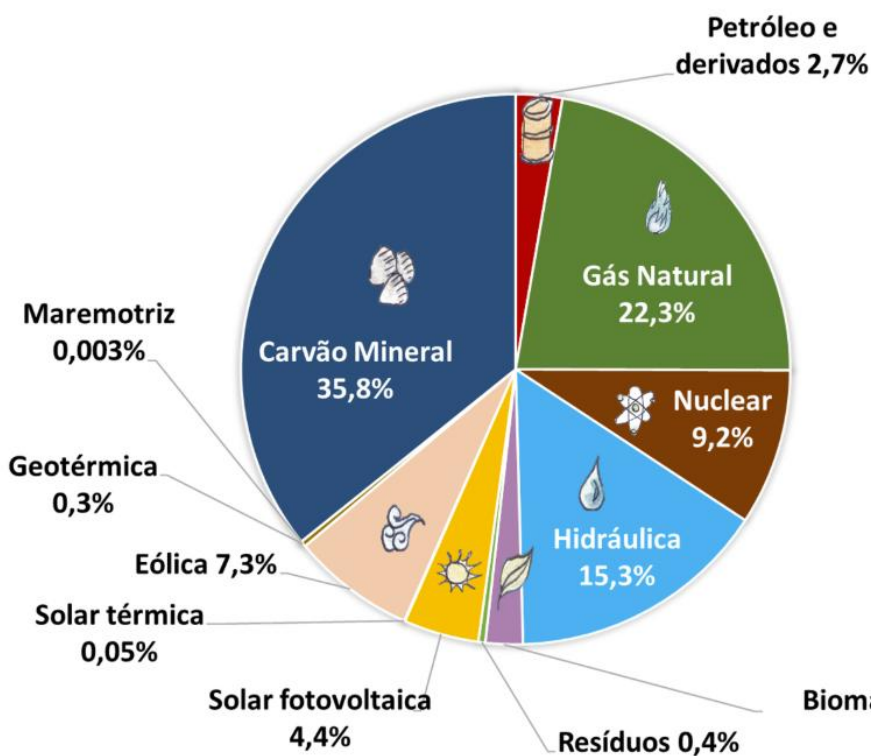
**Departamento de
Estatística**



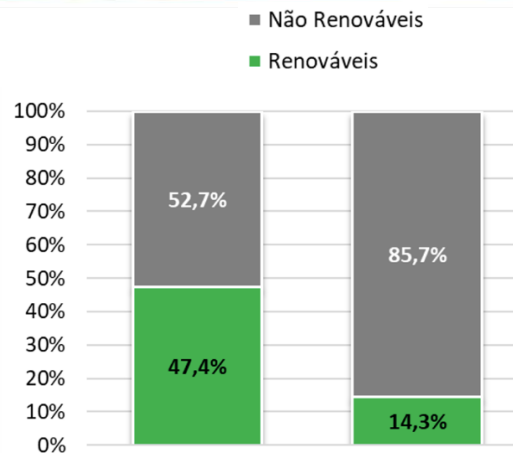
ELE
Depto. de Eng. Elétrica



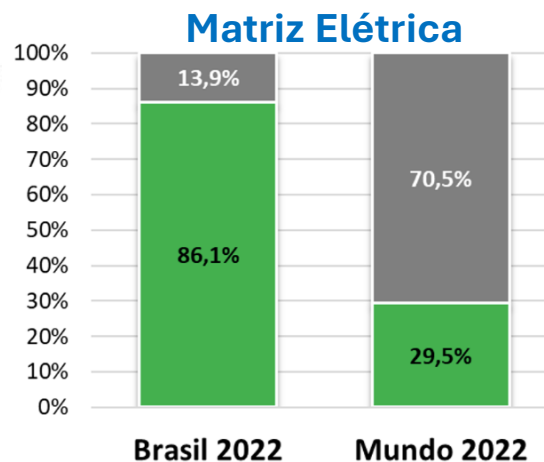
Características do Sistema Elétrico Brasileiro



(IEA, 2023; total em 2022: 29,3 milhões de GWh - *gigawatt-hora*)

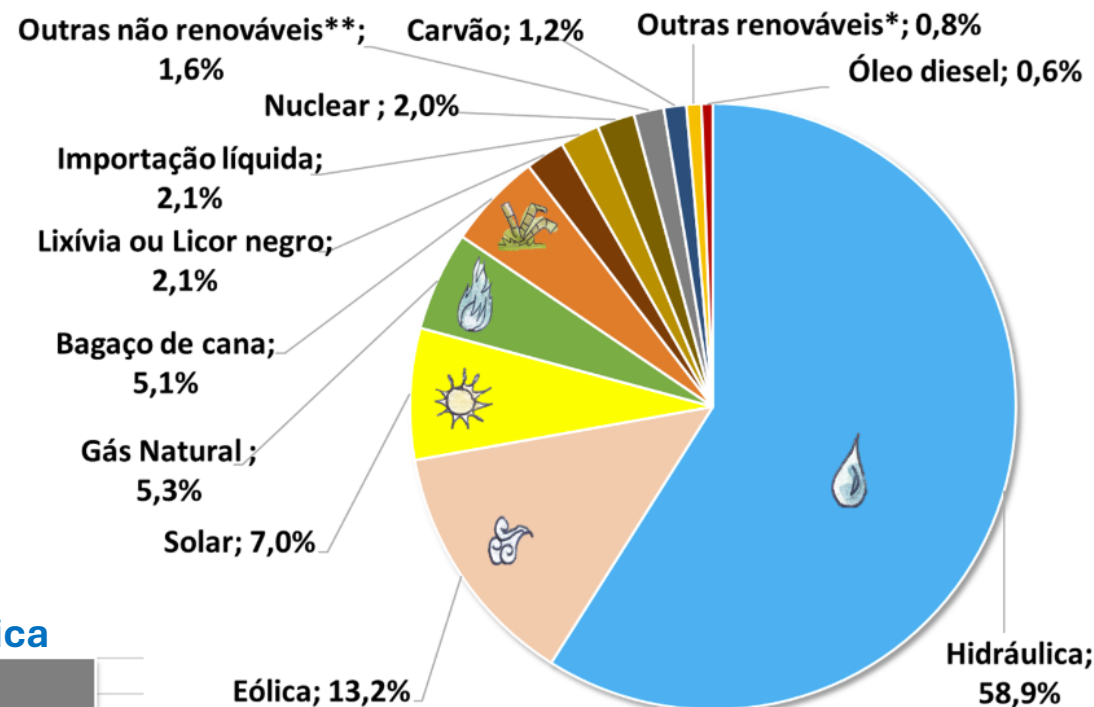


Matriz Energética



Brasil 2022

Mundo 2022

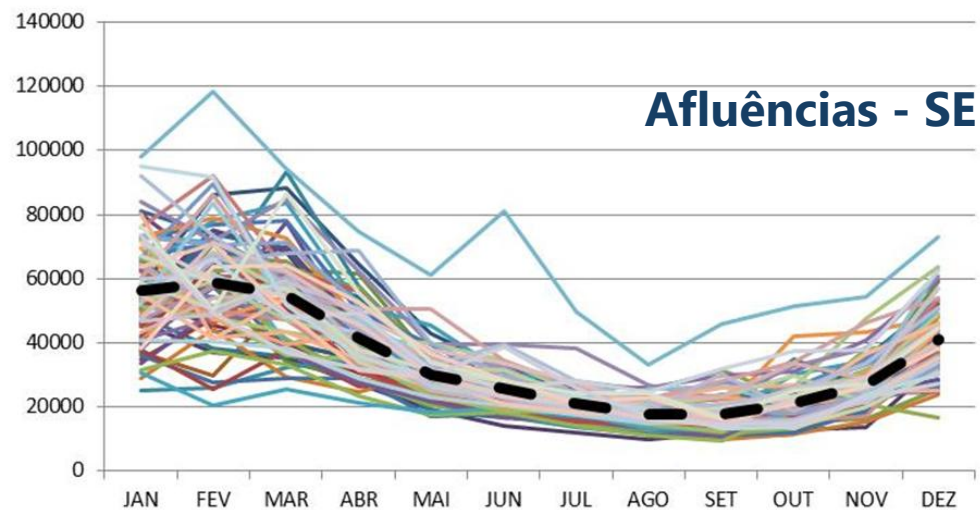


Matriz Elétrica Brasileira 2023

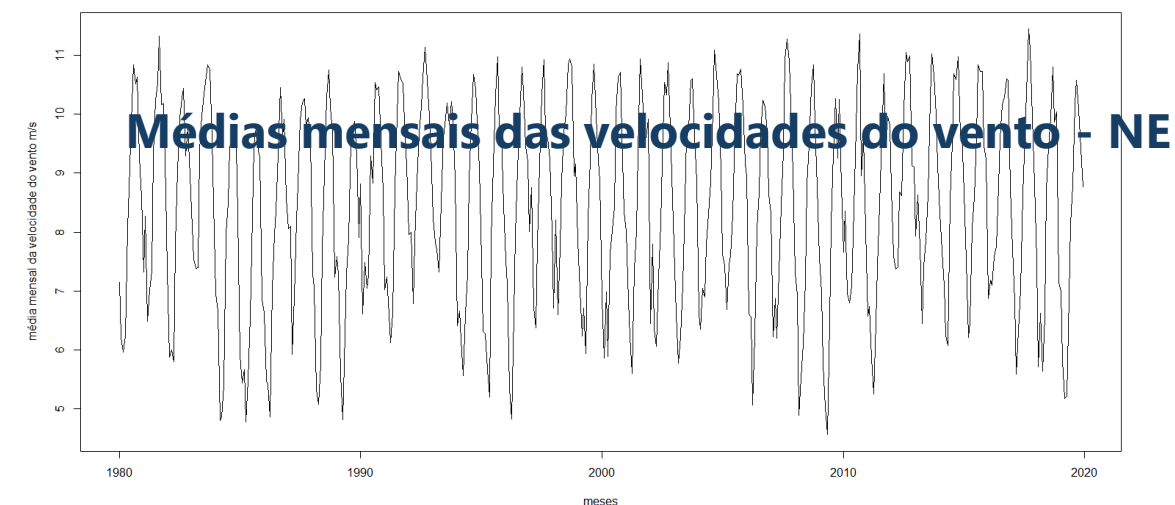
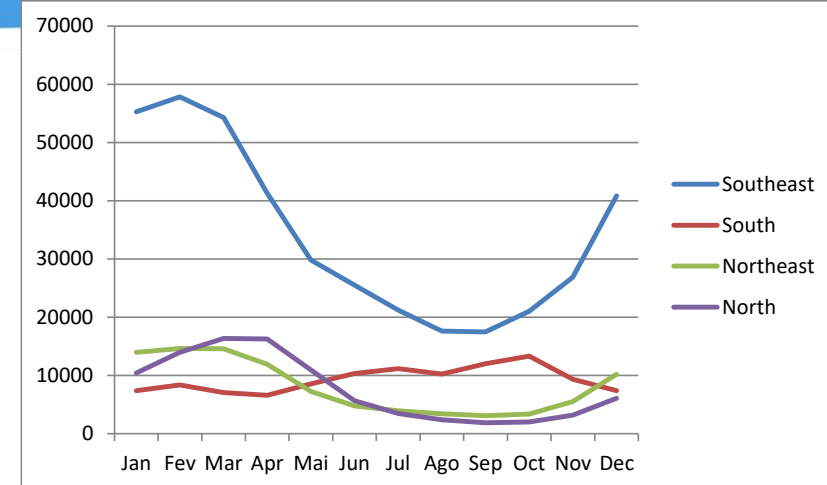
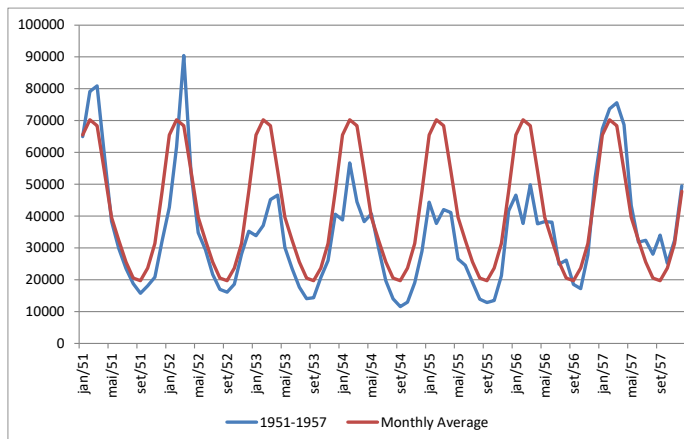
(BEN, 2024; total em 2023: 708 TWh - *terawatt-hora*)

Transição Energética

Características do Sistema Elétrico Brasileiro



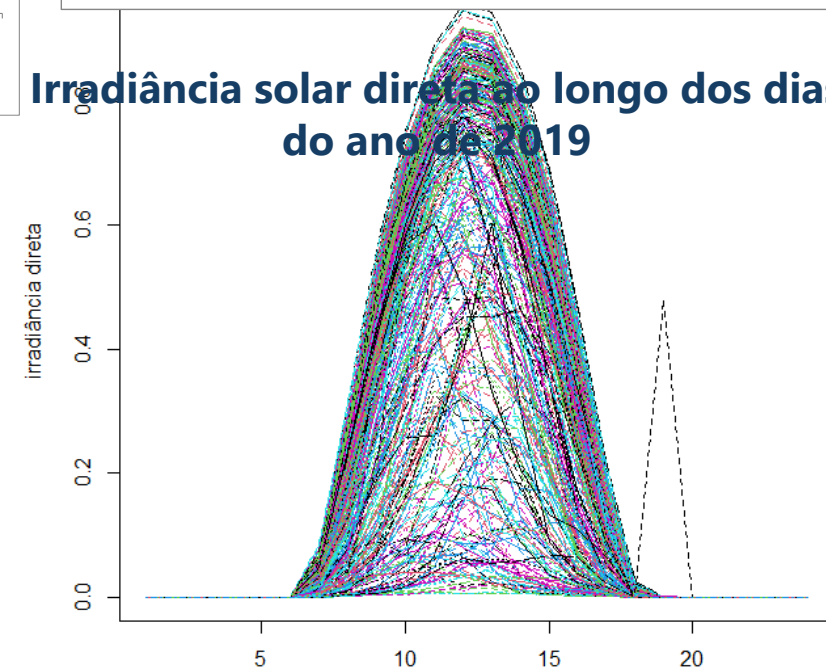
Fontes Renováveis



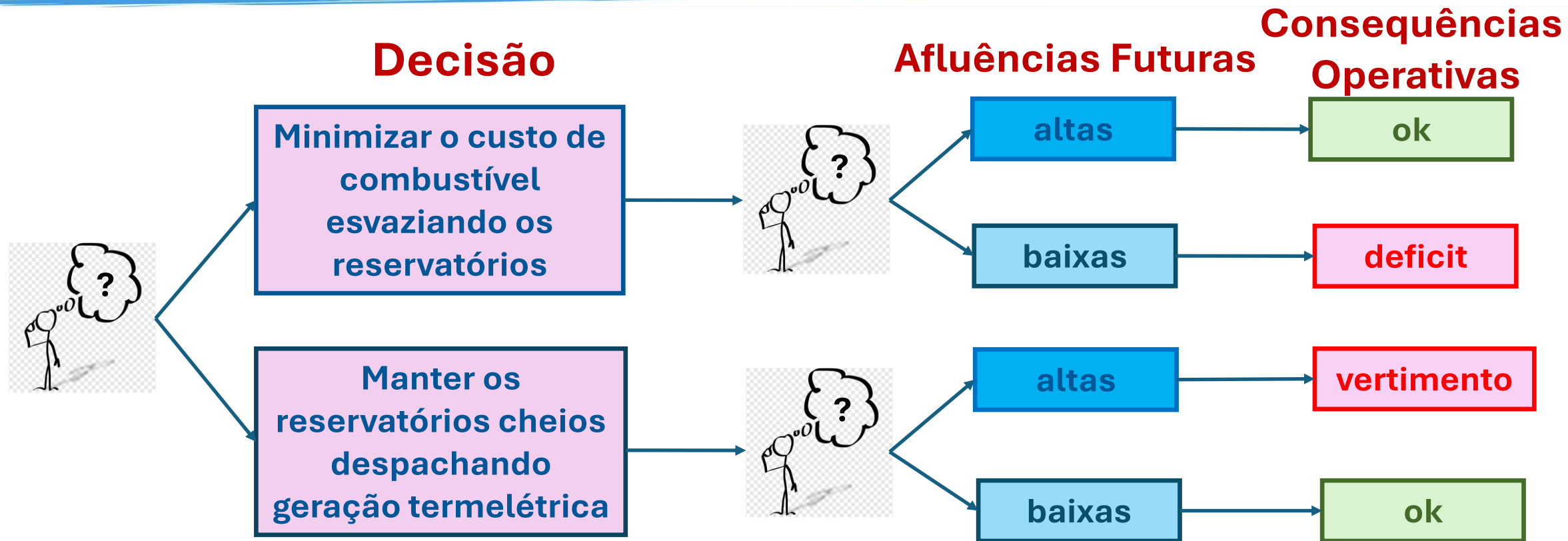
Modelagem de Incertezas

Mudanças Climáticas

Irradiância solar direta ao longo dos dias do ano de 2019

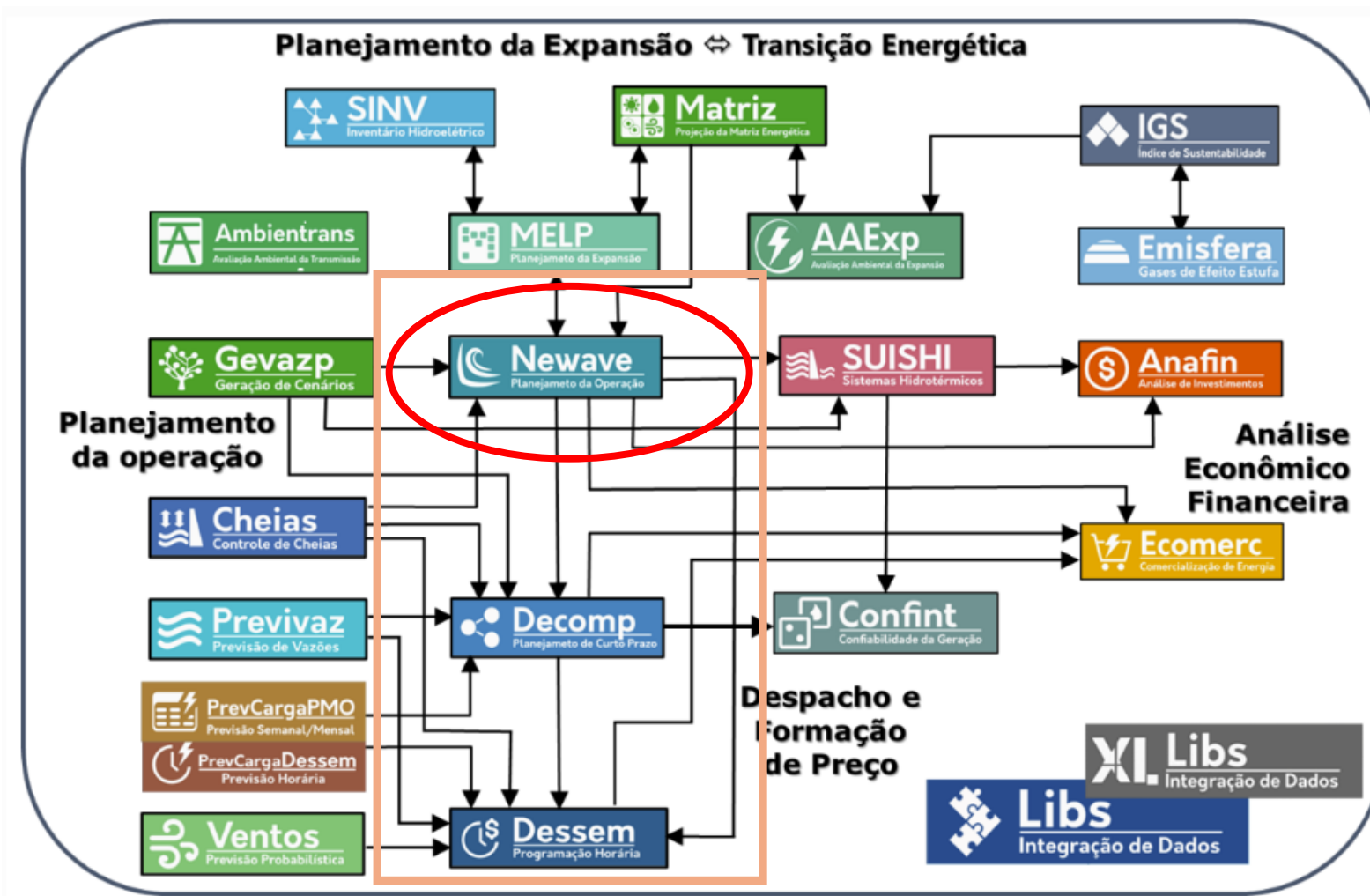


Planejamento da Operação de Longo e Médio Prazos



Calcular uma estratégia de operação!

- **Definição e cálculo da Garantia Física e da Energia Assegurada de Empreendimentos de Geração**
- **Elaboração de diretrizes para os Leilões de Energia**
- **Avaliação das condições de suprimento / risco de racionamento**
- **Definição de estratégias corporativas de empresas e agentes**



Modelo NEWAVE

Planejamento da Operação de Sistemas Hidrotermo-eólicos Interligados de Longo e Médio Prazos

Objetivo

- Definir a alocação ótima de recursos hídricos e térmicos para cada mês minimizando o valor esperado do custo total de operação (custos de geração térmica mais penalidades nas falhas de suprimento de carga) levando em consideração medidas de risco (CVaR ou SAR)

- Usinas individualizadas/REEs conectados hidraulicamente

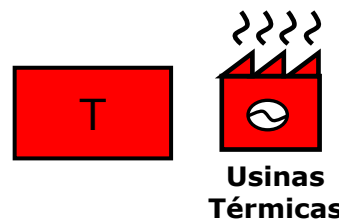
- Restrições hidráulicas diversas

Usinas Hidroelétricas

- Restrições de intercâmbio
- Perdas nos grandes Troncos de interligação

GERAÇÃO

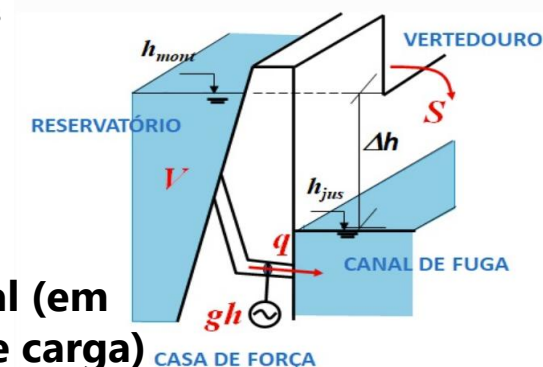
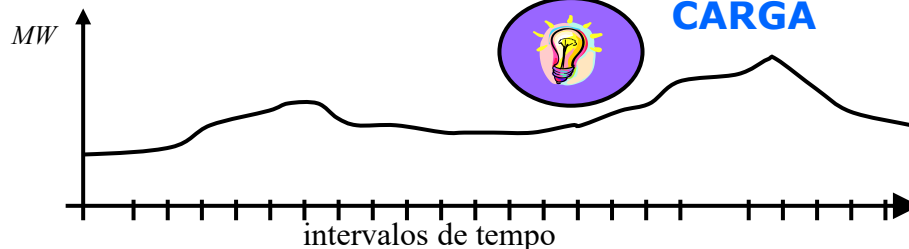
- Restrições para Usinas térmicas
- Gerações de outras fontes



Outras Fontes

TRANSMISSÃO

CARGA



- Carga mensal (em patamares de carga)

Modelo NEWAVE

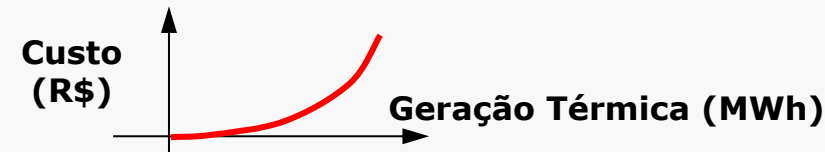
Planejamento da Operação de Longo e Médio Prazos

Objetivo

Calcular a Função de Custo Futuro (FCF) que valoriza a energia/água armazenada nos reservatórios do sistema

USINAS TÉRMICAS

- Representa-se explicitamente os custos crescentes de combustível para geração



USINAS HIDROELÉTRICAS

- Composição entre valor da água e a eficiência (produtibilidade) da usina

Custo de geração

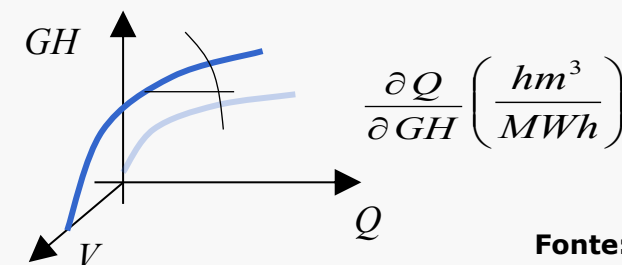
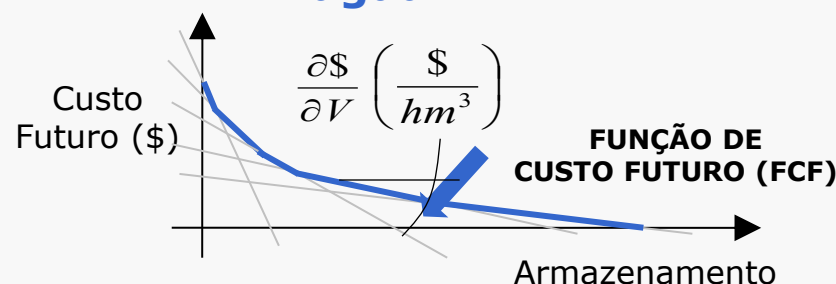
$$\left(\frac{\$}{MWh} \right)$$

=

valor da água

×

"consumo" de água para geração



Fonte: Cepel

PCHs, UHEs reversíveis, NOVAS RENOVÁVEIS (EÓLICA, SOLAR (fotovoltaicas, heliotérmicas), armazenamento)

- Previsão determinística ainda é considerada
- Representação da incerteza da geração eólica de forma conjunta com a incerteza nas vazões afluentes

Modelo NEWAVE

Planejamento da Operação de Longo e Médio Prazos

Características (continuação)

- Representação do parque hidroelétrico por reservatórios equivalentes de energia ou individualizadamente

Período de Estudo

período de planejamento
5 a 30 anos

ponto de corte definido pelo
usuário

reservatórios equivalente de energia (REE)

usinas individualizadas

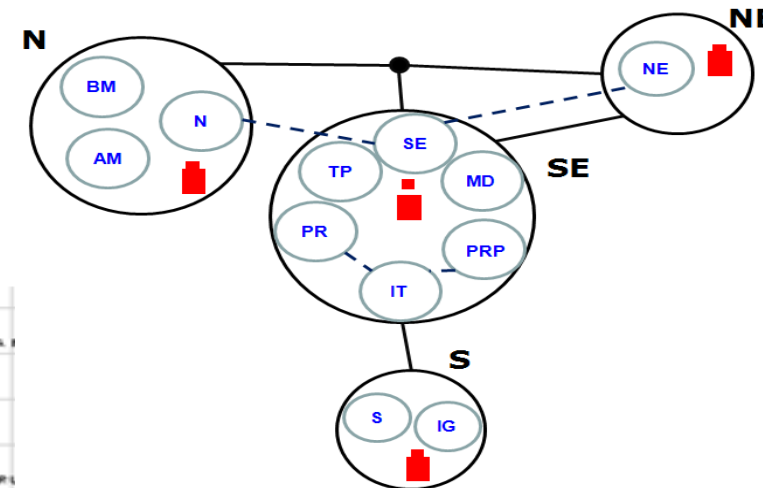
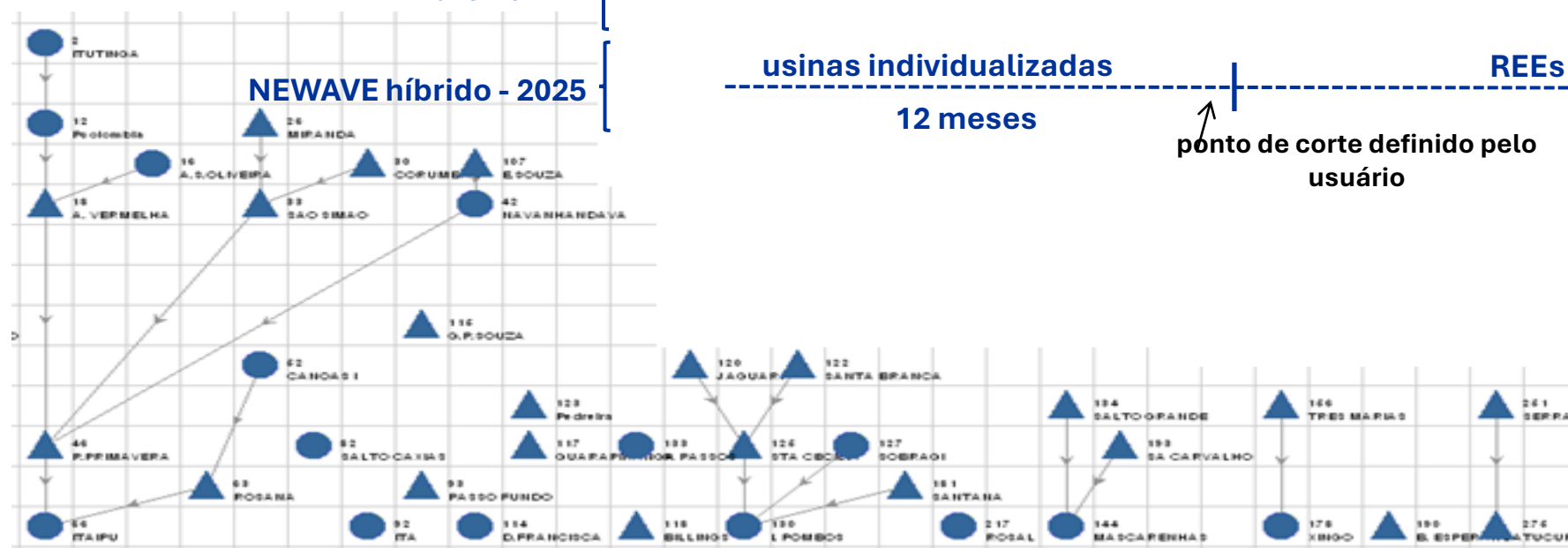
12 meses

REEs

ponto de corte definido pelo
usuário

NEWAVE – até 2024

NEWAVE híbrido - 2025



Modelo NEWAVE

Planejamento da Operação de Longo e Médio Prazos

4 módulos básicos:

1) Construção dos reservatórios equivalentes de energia (REE)

- para cada REE agrega os reservatórios em um único reservatório de energia e uma usina fio d'água equivalente
- as vazões são agregadas em afluências equivalentes de energia

2) Geração de séries sintéticas de afluências

- Afluências às UHE's: Modelo autorregressivo periódico - $PAR(p)$ / $PAR(p)$ -A e Amostragem Seletiva
- Velocidades do Vento: Modelo autorregressivo periódico - $PAR(p)$

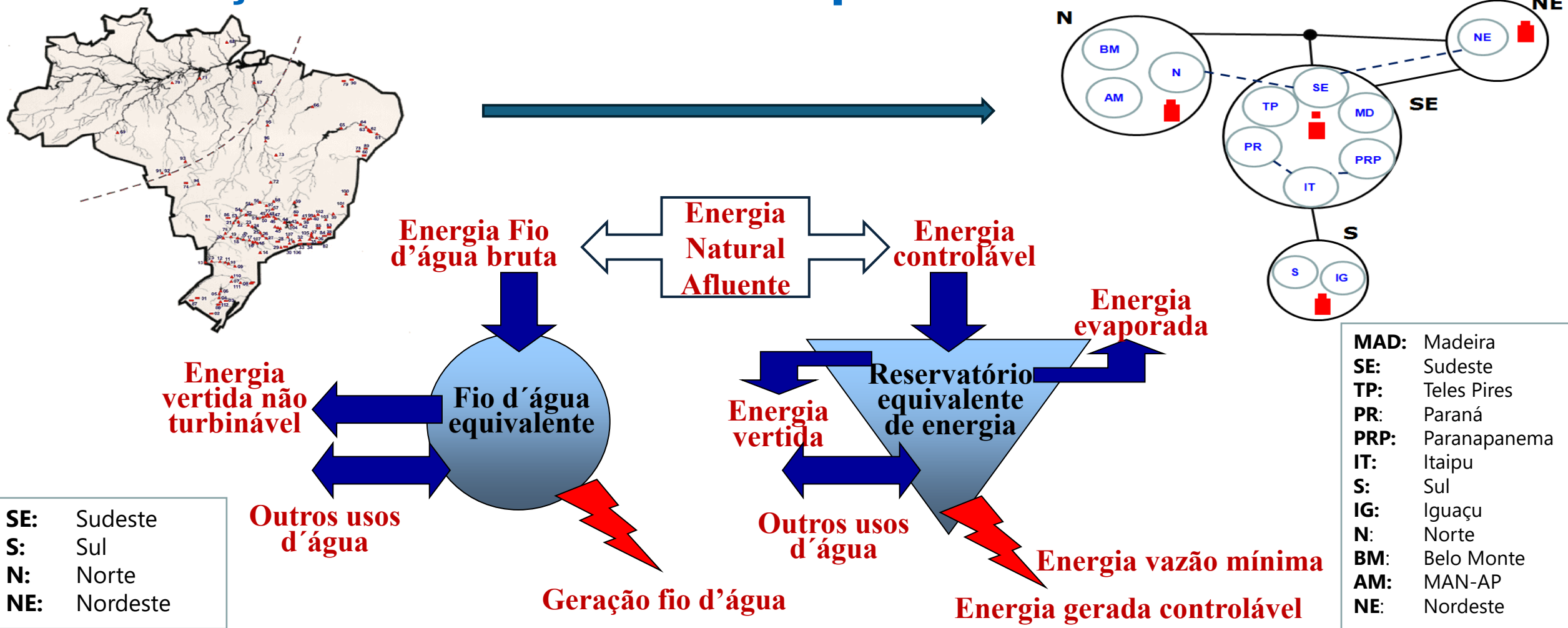
3) Cálculo da Política de Operação

- calcula a política de operação mais econômica, considerando aversão ao risco, representando-se as incertezas das afluências futuras

4) Simulação da Operação do Sistema

- cálculo de índices probabilísticos de desempenho do sistema
- valor esperado da energia não suprida e risco de déficit
- distribuição de frequências de custos marginais, intercâmbios, etc

Construção dos Reservatórios Equivalentes de Energia (REE)



Modelo NEWAVE

Planejamento da Operação de Longo e Médio Prazos

Cálculo da Política de Operação

Objetivo

- Definir a alocação ótima de recursos hídricos e térmicos para cada estágio minimizando o custo total de operação esperado ao longo do horizonte de planejamento

$$\text{Minimizar } Z = \sum_{t=1}^{NPER} \text{CUSTO_OPERACAO}_t$$

sujeito a ...

variáveis que caracterizam o estado do sistema: (i) estado de armazenamento no final de $(t-1)$
(ii) aflúências passadas ao período t

$$\vartheta_t(x_{t-1}, \xi_t) = \min_{x_t} c_t x_t + E_{\xi_{t+1} | \xi_t, \dots, \xi_{t+1-p}} [\vartheta_{t+1}(x_t, \xi_{t+1})]$$

custo presente

aflúência no período t

custo futuro

$$\text{s. a. } g_t(x_t) = b_t(x_{t-1}, \xi_{t-j}, j=1, \dots, p)$$

$$x_t \in X_t = 1, \dots, T$$

Custo de Operação: custos de geração térmica mais penalidades nas falhas de suprimento de carga

Modelo NEWAVE

Planejamento da Operação de Longo e Médio Prazos

Cálculo da Política de Operação

Algoritmo de Solução

É preciso decompor o problema, além de representar o sistema hidroelétrico por REEs em parte do horizonte de planejamento

Programação dinâmica dual estocástica – PDDE (sigla em inglês: SDDP)

Modelo NEWAVE com *PDDE* foi oficialmente empregado no setor elétrico a partir de 1998 (para cálculo dos contratos iniciais das novas UHEs)

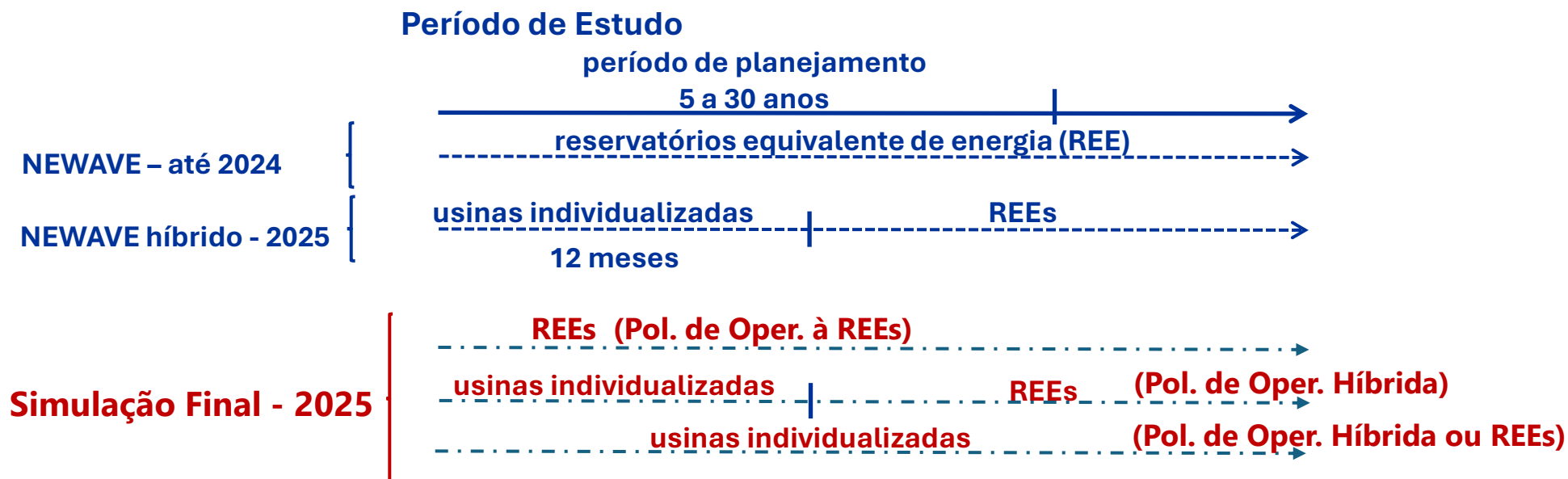
Anteriormente era empregado o algoritmo de programação dinâmica estocástica - *PDE*

Modelo NEWAVE

Planejamento da Operação de Longo e Médio Prazos

Simulação Final Simulação da operação de sistemas hidrotérmicos interligados

- De posse da política ótima de operação do sistema hidrotérmico interligado (FCF):
- Simula a operação do sistema ao longo do período de planejamento para distintos cenários de sequencia hidrológicas
- Calcula índices de desempenho tais como média do custo de operação, dos custos marginais, risco de déficit, etc
- Considera 2000 séries sintéticas diferentes daquelas utilizadas no cálculo da política
- A simulação final também pode ser realizada utilizando séries históricas



Modelo NEWAVE

Planejamento da Operação de Longo e Médio Prazos

Modelo Estocástico para Geração de Séries Sintéticas de Afluências

Representação da Variabilidade, Sazonalidade, Dependência Temporal e Dependência Espacial das Vazões, Ventos e Irradiação Solar

Ajuste de um modelo estocástico aos dados históricos:

PAR(p) (ou PAR(p)-A)

São geradas *séries sintéticas*

Princípio de um modelo estocástico

- Deve garantir semelhança estatística entre os registros histórico e sintético

