

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



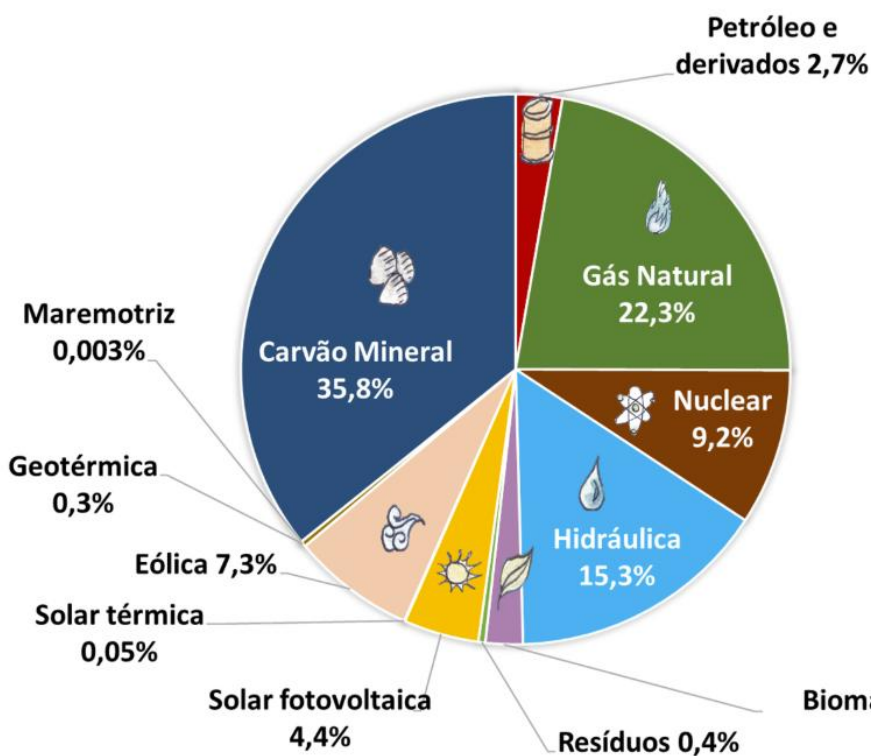
**Departamento de
Estatística**



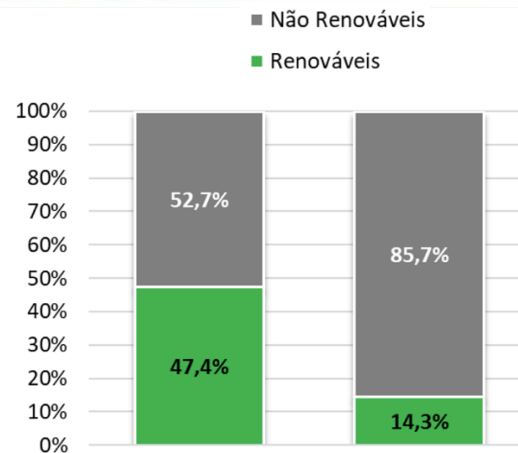
**ELE
Depto. de Eng. Elétrica**



Características do Sistema Elétrico Brasileiro

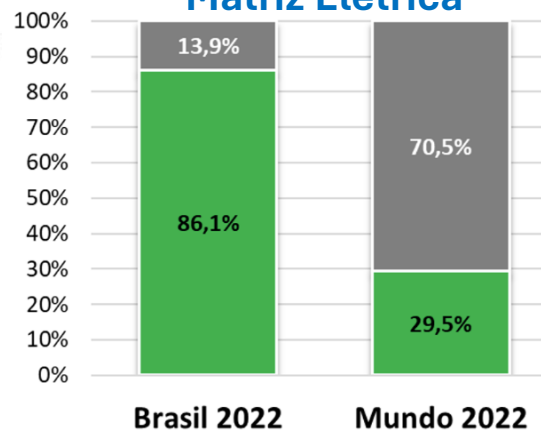


(IEA, 2023; total em 2022: 29,3 milhões de GWh - *gigawatt-hora*)



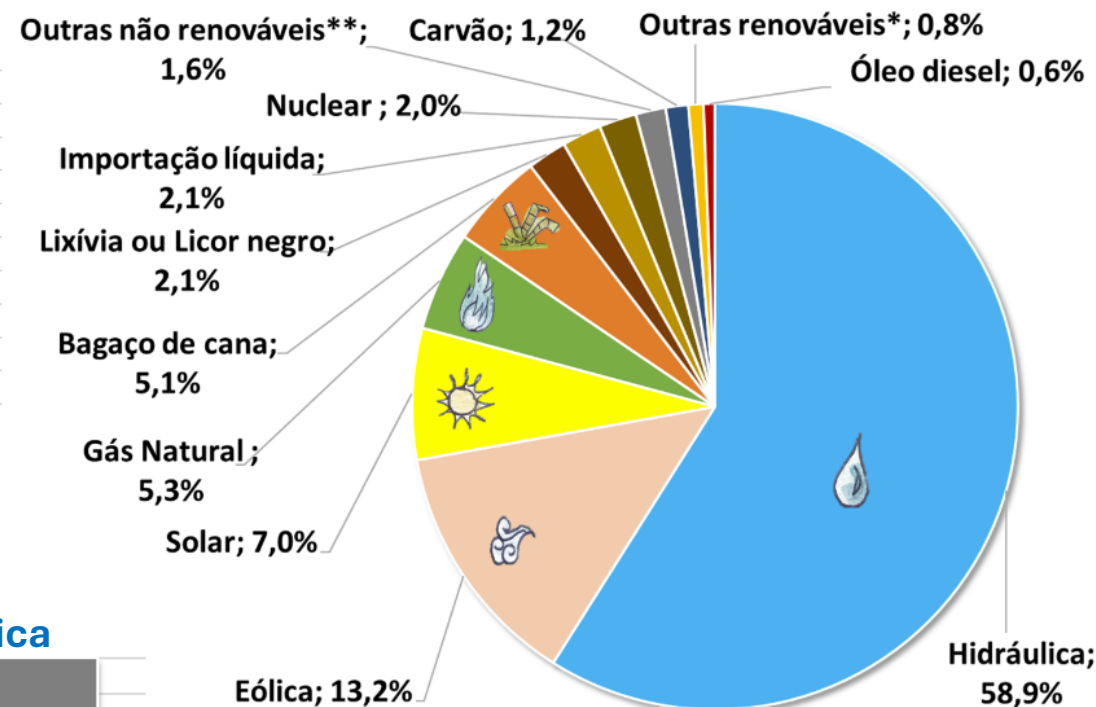
Matriz Energética

Matriz Elétrica



Brasil 2022

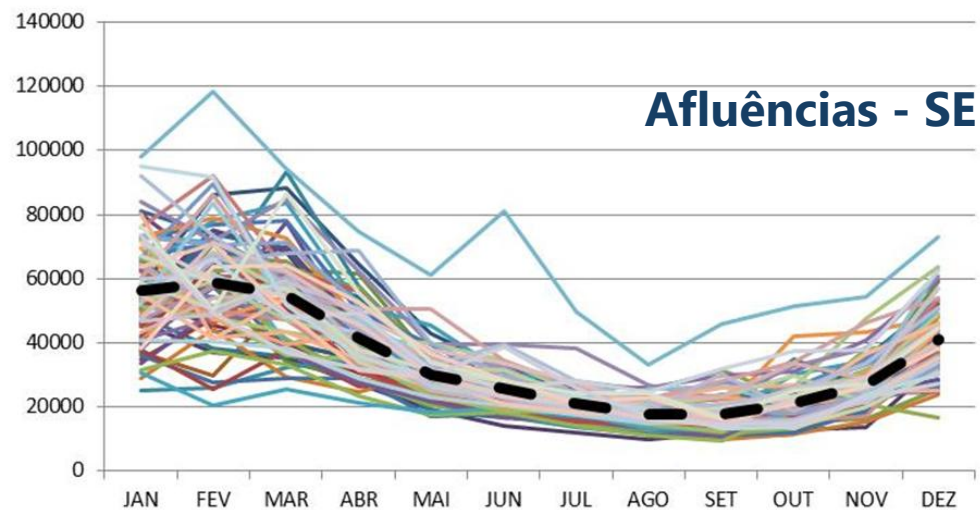
Mundo 2022



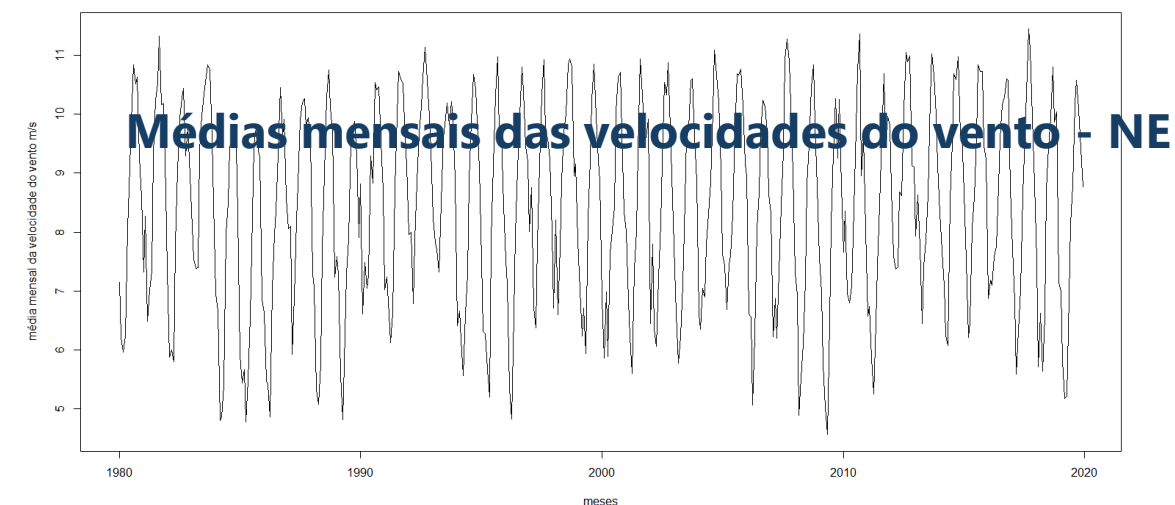
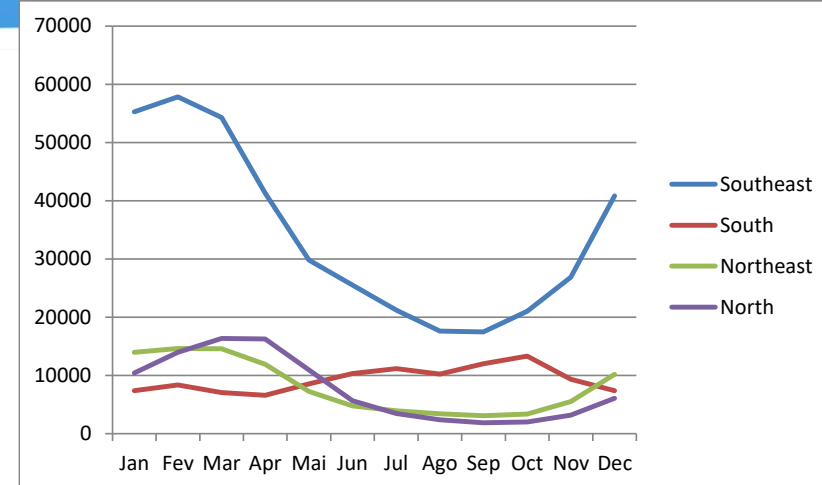
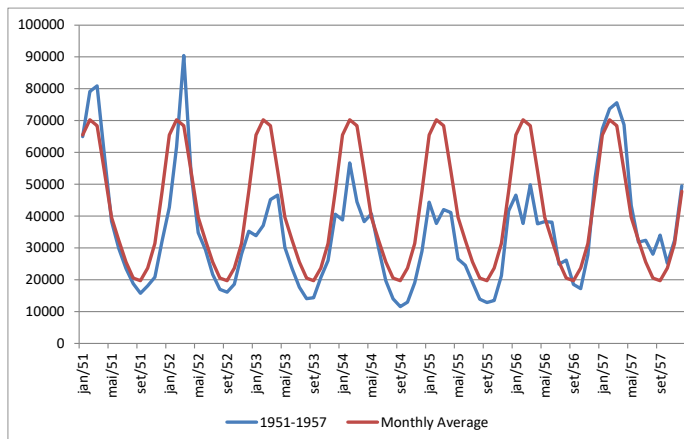
(BEN, 2024; total em 2023: 708 TWh - *terawatt-hora*)

Transição Energética

Características do Sistema Elétrico Brasileiro



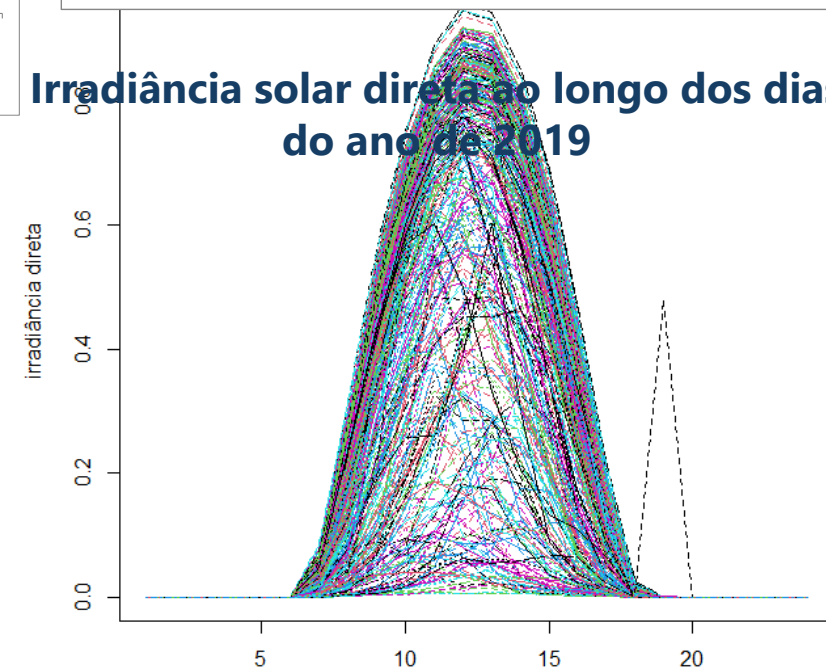
Fontes Renováveis



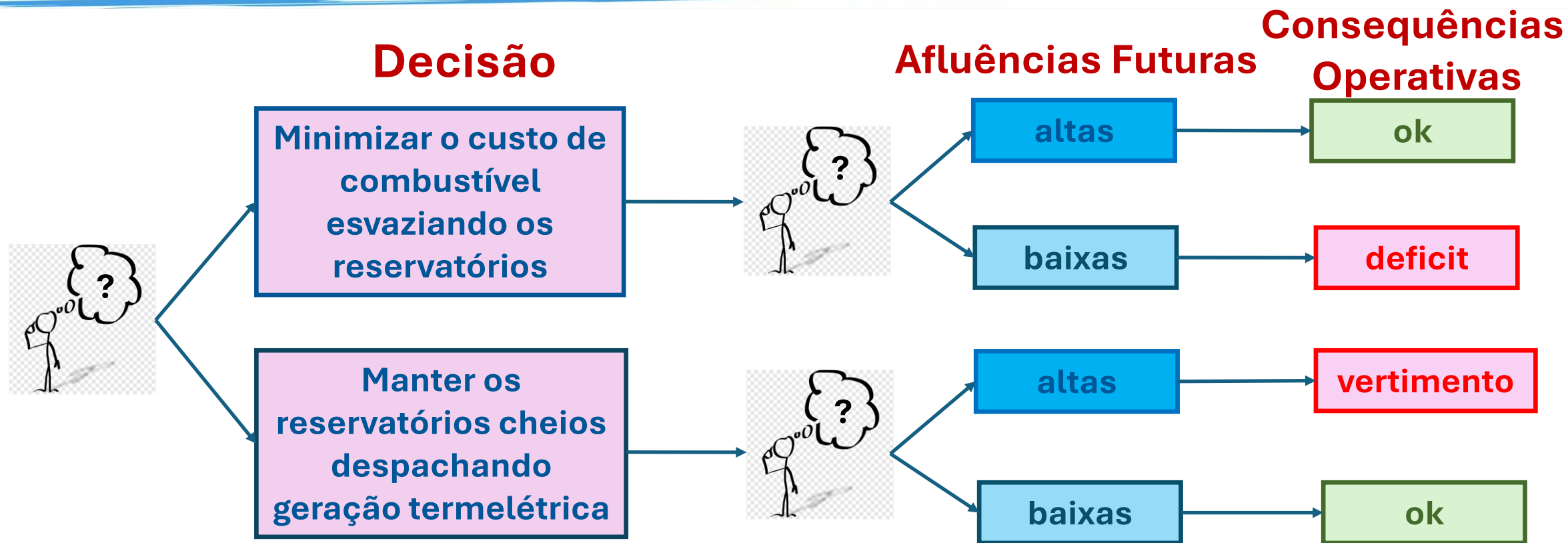
Modelagem de Incertezas

Mudanças Climáticas

Irradiância solar direta ao longo dos dias do ano de 2019



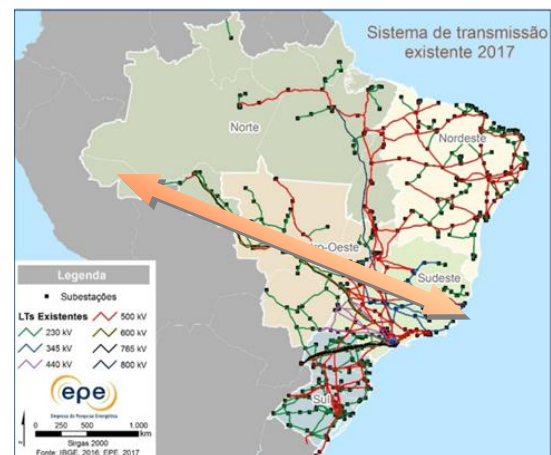
Planejamento da Operação de Longo e Médio Prazos



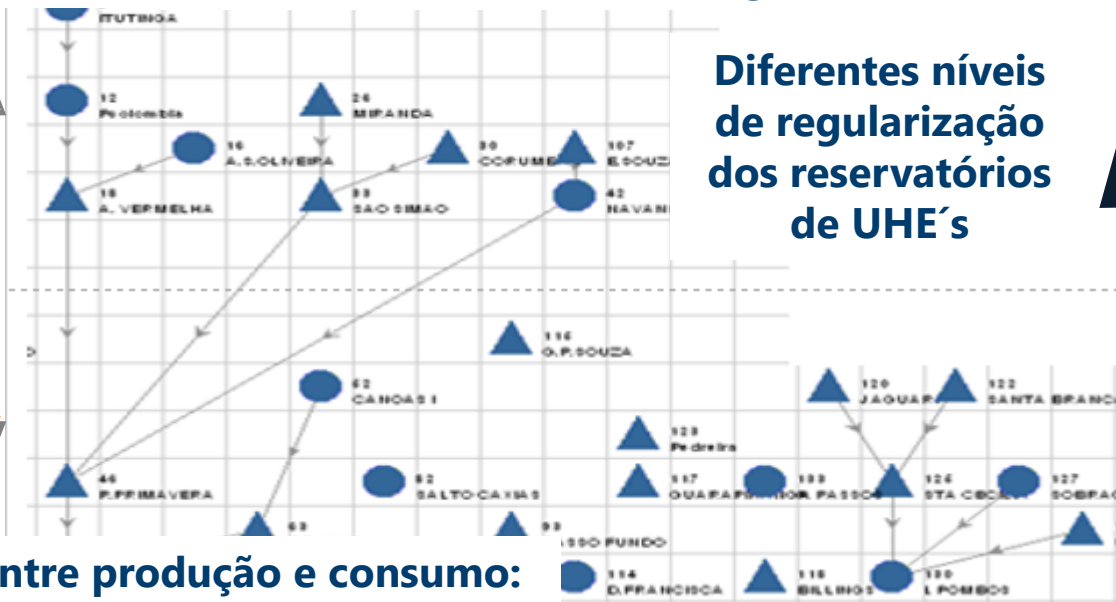
Calcular uma estratégia de operação!

Outras Características do Sistema Elétrico Brasileiro

Dimensões Continentais Sistema de Potência de Grande Porte



As fontes renováveis tem comportamentos distintos nas diversas regiões do país



Diferentes níveis de regularização dos reservatórios de UHE's

Decisão de Operação

Longo / Médio Prazos
(10 a 5 anos)
(mensal)

Curto Prazo
(até 1 ano)
(mensal/semanal)

Programação da Operação
(até 14 dias)
(1/2 hora / horário)

Representação das incertezas

Detalhamento do Sistema

Distâncias elevadas entre produção e consumo:
Rede de Transmissão

Secas de longa duração no passado: 50's, 2014-2017, 2021...

A decisão operativa hoje afeta as condições futuras de atendimento e a decisão operativa no futuro

Capacidade de armazenar energia

UHEs



Eólicas

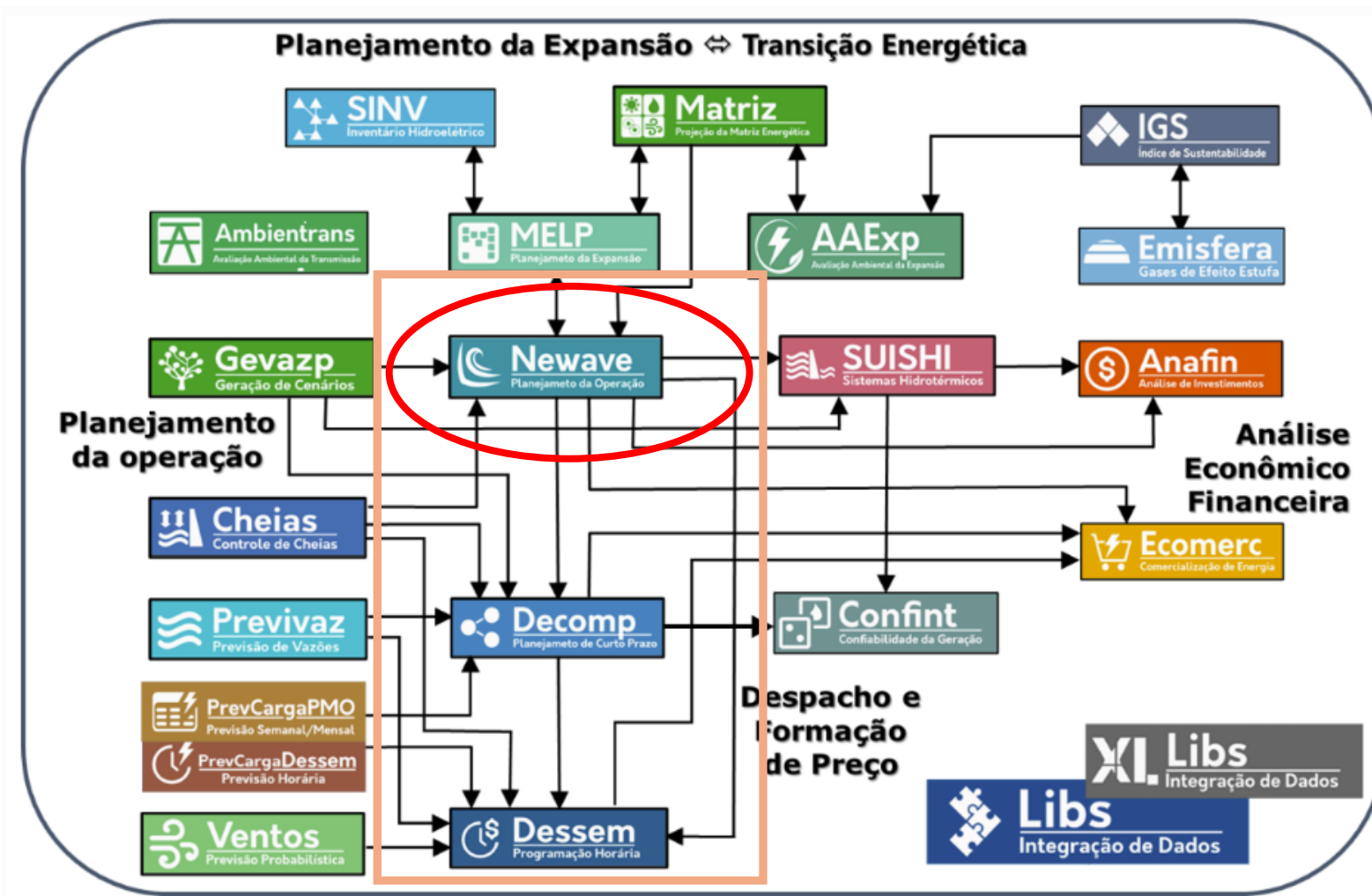


Solar

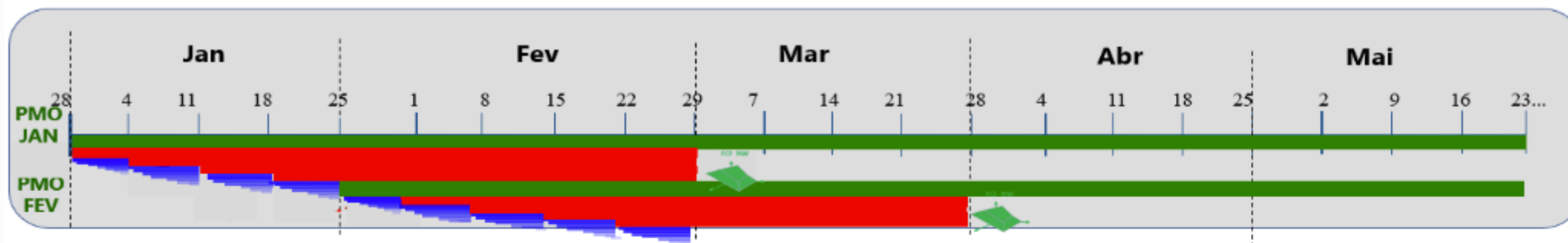





Armazenamento de energia:
baterias, usinas reversíveis, *uhe's de regularização*

- **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**



Execução Encadeada dos Modelos Newave, Decomp e Dessem Programa Mensal de Operação - ONS



	Aplicação	Horizonte	Discretização	PMO	Árvore de Cenários	Modelagem do Sistema	Estratégia de Solução
médio	Mensal	10 anos	Mensal, patamares de carga		Estocástica, amostra de cenários	Reserv. Equivalentes Usinas Individualizadas Intercâmbios	PDDE
curto	Semanal	2 meses (pode ir até 1 ano)	Sem/Mensal, patamares de carga		Estocástica, Árvore Completa	Usinas Individualizadas, Intercâmbios	PDD
curtíssimo	Diária	2 semanas	meia-hora		Determinística	unit commitment, Fluxo DC	MILP

Cepel - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

FCF – Função de Custo Futuro

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

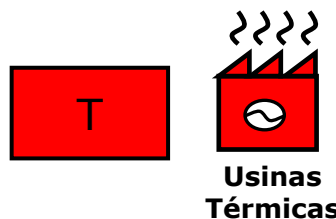
- Restrições hidráulicas diversas

Usinas Hidroelétricas

- Restrições de intercâmbio
- Perdas nos grandes Troncos de interligação

GERAÇÃO

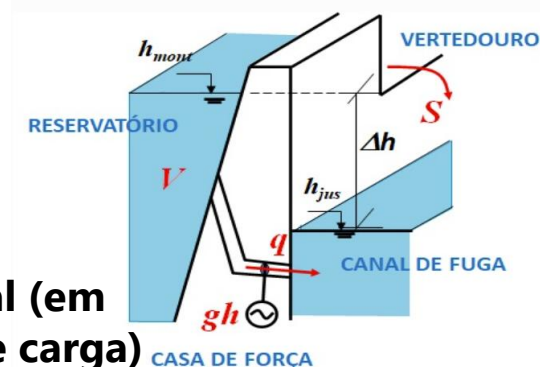
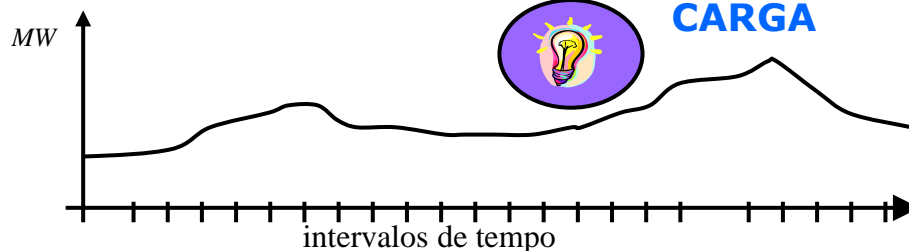
- Restrições para Usinas térmicas
- Gerações de outras fontes



Outras Fontes

TRANSMISSÃO

CARGA



- Carga mensal (em patamares de carga)

Modelo NEWAVE

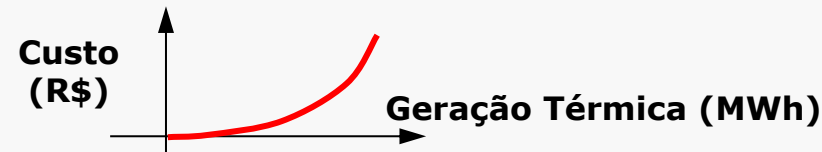
Planejamento da Operação de Longo e Médio Prazos

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

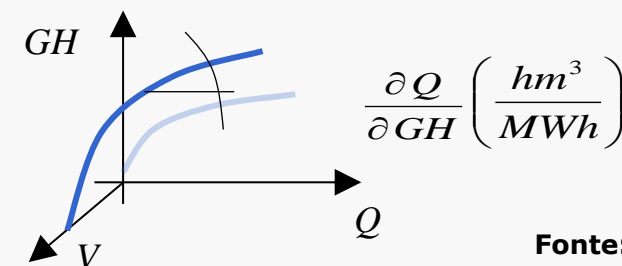
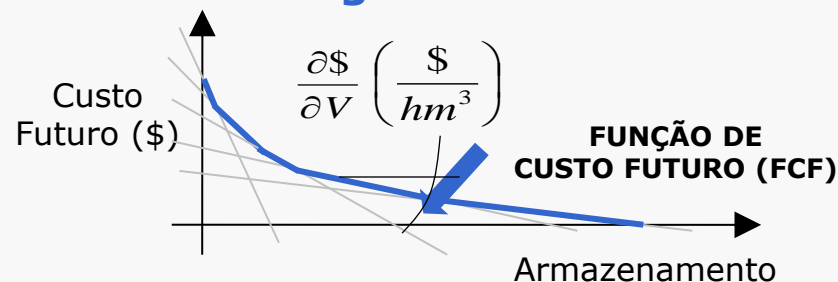
$$\left(\frac{\$}{MWh} \right)$$

=

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

- **Horizonte de 5 a 15 anos com discretização mensal**
 - Capacidade de regularização dos reservatórios de hidrelétricas
 - Períodos hidrológicos críticos, desfavoráveis ao suprimento econômico de energia
- **Aleatoriedade das afluições**
 - Cenários sintéticos gerados por um modelo PAR(p) ou PAR(p)-A
- **Aleatoriedade das velocidades de vento e irradiação solar**
 - Cenários sintéticos gerados por um modelo PAR(p) (disponível, mas não em uso oficial)
- **Correlação entre afluições, velocidades de vento e irradiação solar**
 - Cenários sintéticos incorporam estas características estatísticas (disponível, mas não em uso oficial)

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

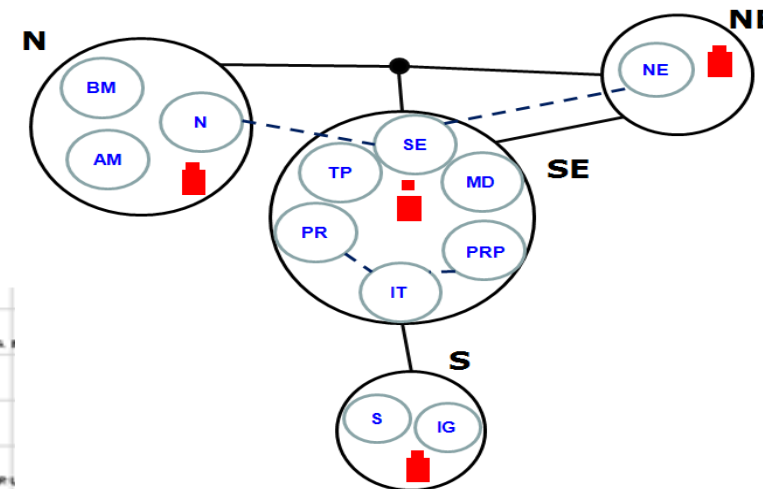
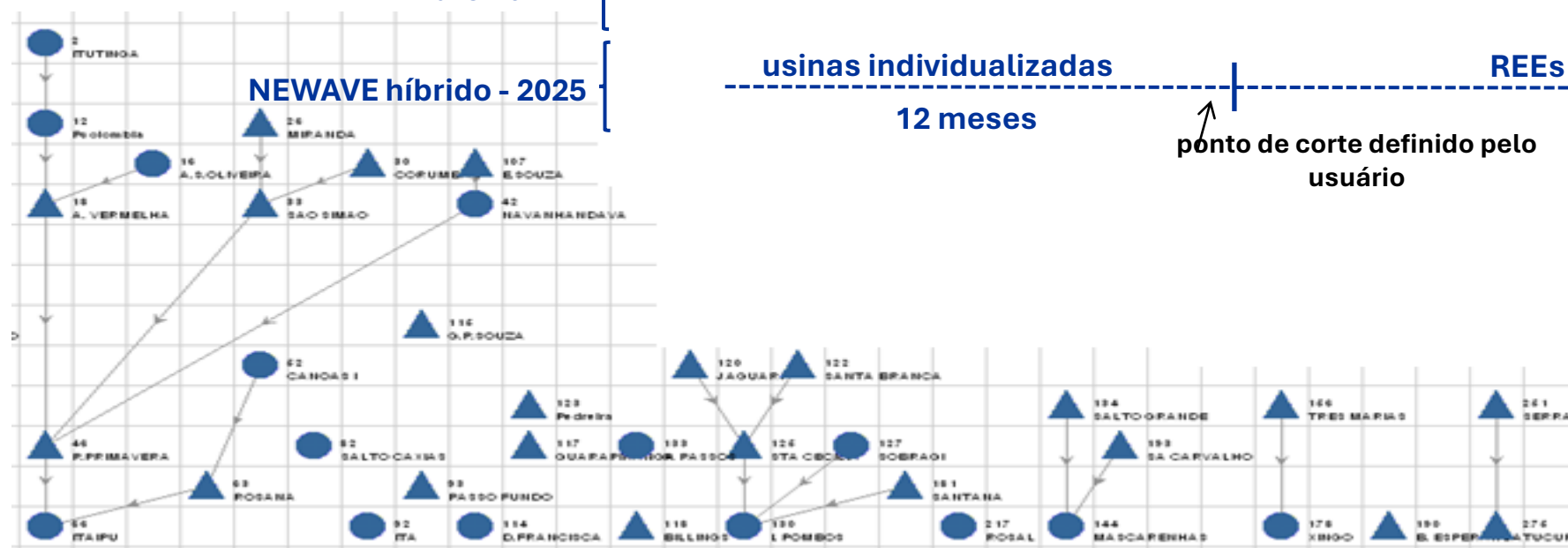
12 meses

REEs

ponto de corte definido pelo
usuário

NEWAVE – até 2024

NEWAVE híbrido - 2025

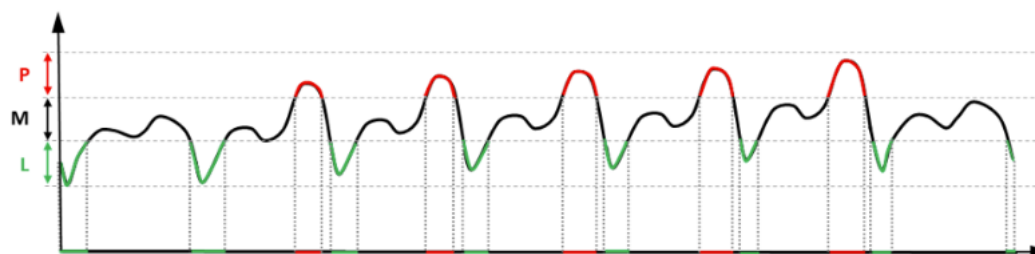


Modelo NEWAVE

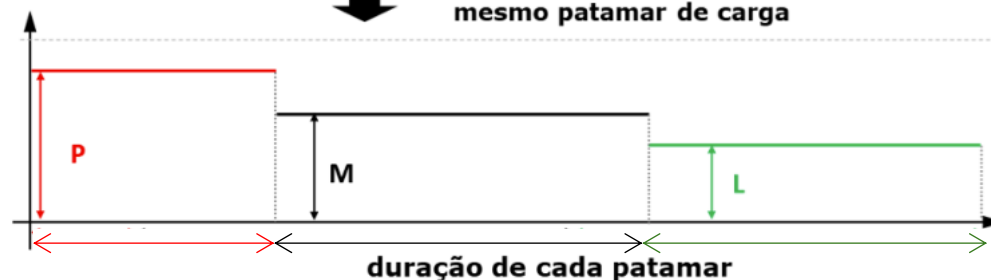
Planejamento da Operação de Longo e Médio Prazos

Características (continuação)

Patamares de Carga



↓
aglutinação dos intervalos de
mesmo patamar de carga



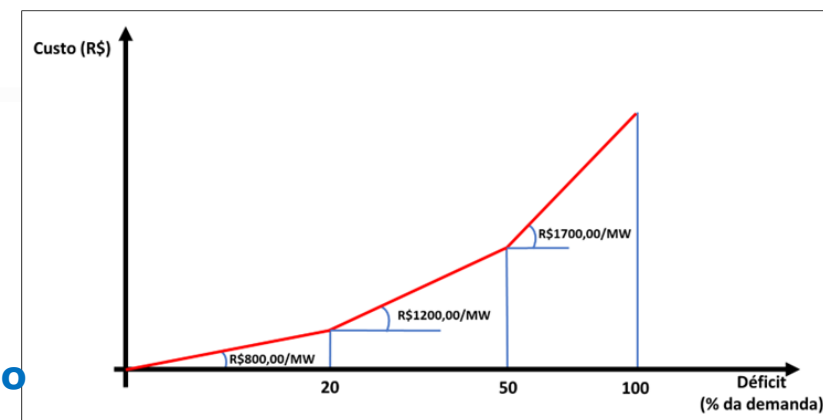
P: patamar pesado

M: patamar médio

L: patamar leve

Cortes de Carga

- Déficit pode ser modelado como uma térmica mais cara
- A função custo de déficit é representada por patamares
- É possível representar o custo de déficit em até quatro patamares de custo crescente
- Cada patamar de déficit corresponde a um percentual do mercado a ser atendido



Modelo NEWAVE

Planejamento da Operação de Longo e Médio Prazos

Características (continuação)

Estratégia do Solução

- **Programação dinâmica dual estocástica (PDDE)**
 - **Variáveis de Estado: energia armazenada no início do período, tendência hidrológica (afluências passadas) e despacho antecipado de usinas GNL**
- **Mecanismos de aversão a risco como o Conditional Value-at-Risk (CVaR) e volume mínimo operativo para as UHE's**

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

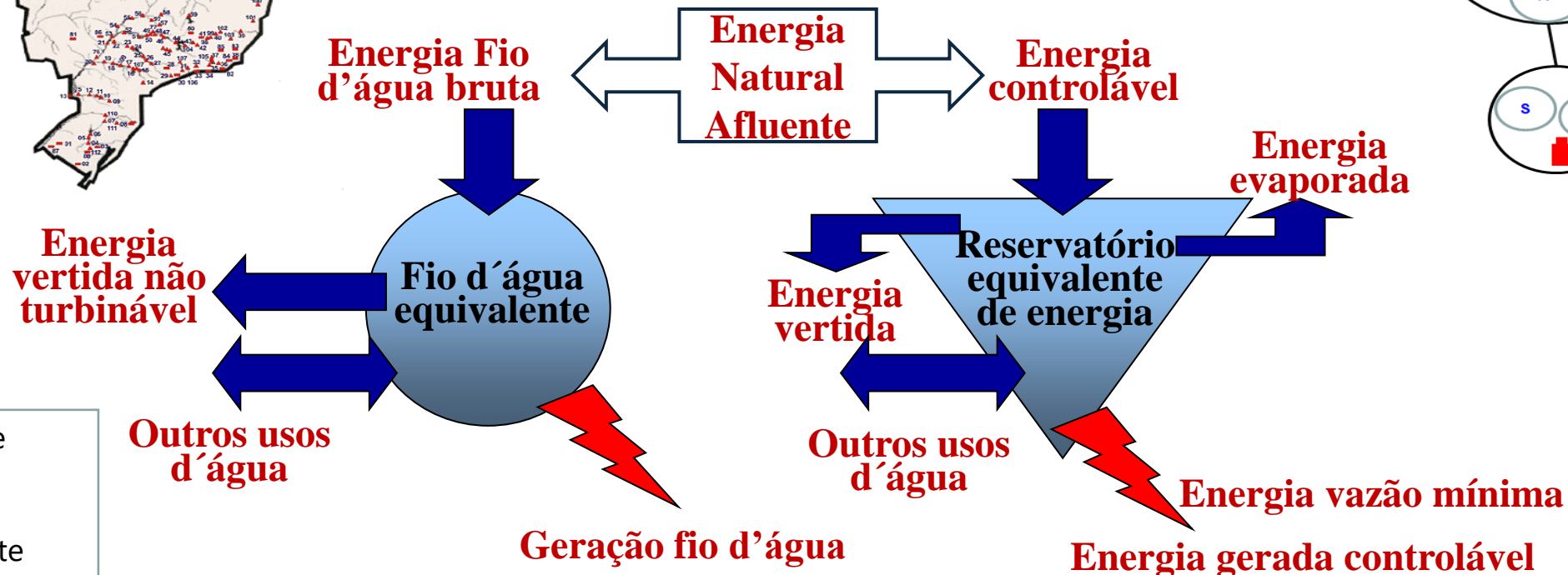
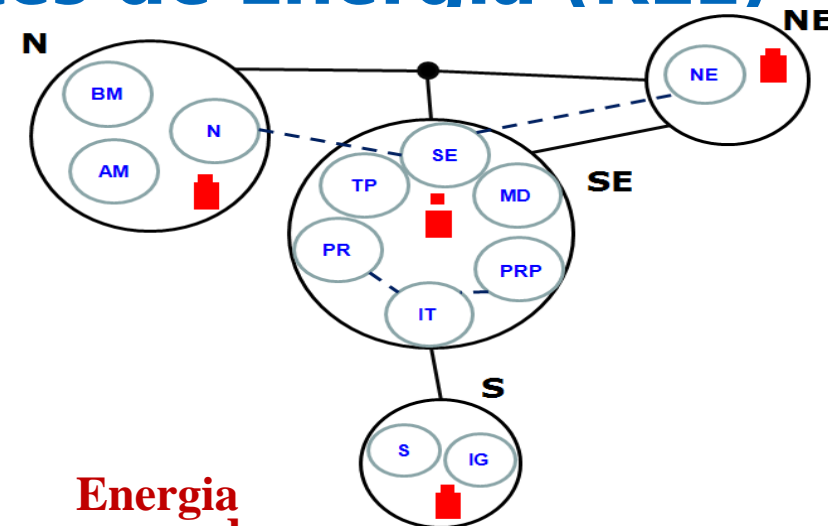
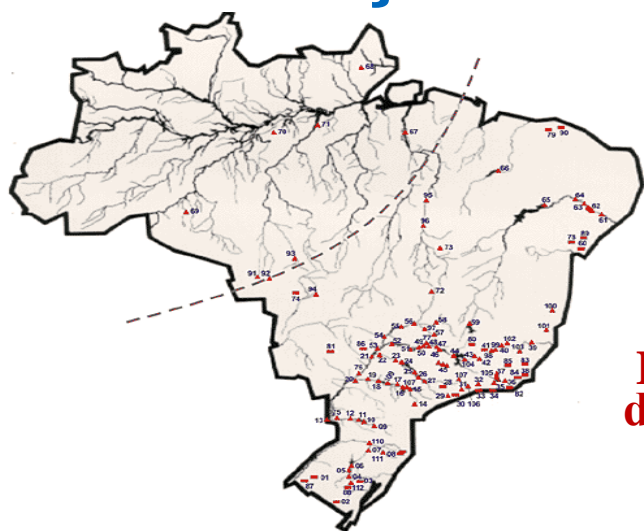
4) Simulação da Operação do Sistema

- 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

Modelo NEWAVE

Planejamento da Operação de Longo e Médio Prazos

Construção dos Reservatórios Equivalentes de Energia (REE)



MAD:	Madeira
SE:	Sudeste
TP:	Teles Pires
PR:	Paraná
PRP:	Paranapanema
IT:	Itaipu
S:	Sul
IG:	Iguaçu
N:	Norte
BM:	Belo Monte
AM:	MAN-AP
NE:	Nordeste

SE:	Sudeste
S:	Sul
N:	Norte
NE:	Nordeste

Modelo NEWAVE

Planejamento da Operação de Longo e Médio Prazos

- **Cálculo de Grandezas relativas ao Reservatório Equivalente de Energia (REE):**

Energia Armazenável Máxima; Energia Armazenável Máxima por Restrição de Volume de Espera; Energia Natural Afluente (Controlável, Fio d'água bruta e líquida); Energia de Vazão Mínima; Energia Evaporada; Energia de Outros Usos d'água; Perda Energética por Enchimento de Volume Morto; Meta de Geração Hidráulica Máxima; Meta de Geração Hidráulica Mínima; Energia de Submotorização; Geração de pequenas usinas

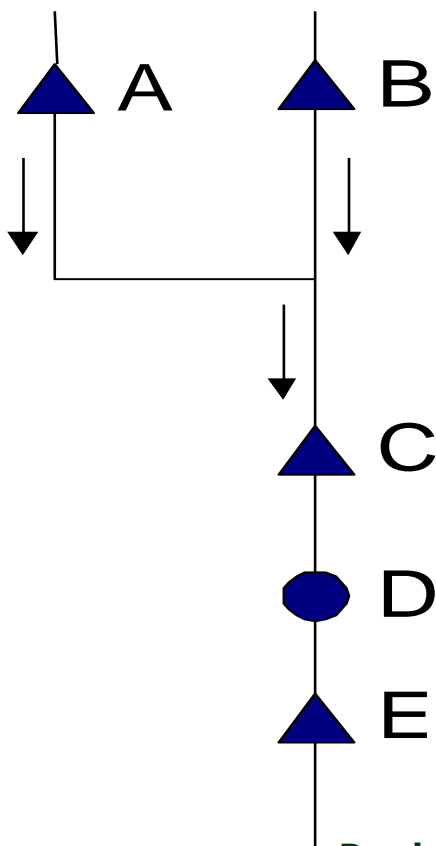
- **Energia Armazenável Máxima**

- Capacidade máxima de armazenamento no reservatório equivalente de energia
- É calculada considerando o deplecionamento de todos os reservatórios das usinas pertencentes a cada um dos REEs do SIN, desde o seu volume máximo até o volume mínimo
- É estimada pela energia produzida pelo esvaziamento completo dos reservatórios do sistema de acordo com a política de operação em paralelo

Modelo NEWAVE

Planejamento da Operação de Longo e Médio Prazos

• Energia Armazenável Máxima



$$EA_{\max} = c_1 \sum_{i \in R} [V_{\text{útil } i} \sum_{j \in J_i} \rho_j H_{eq_j}]$$

$$EA_{\max} = c_1 \{ V_A (H_{ApA} + H_{CpC} + h_{DpD} + H_{EpE}) + \\ V_B (H_{BpB} + H_{CpC} + h_{DpD} + H_{EpE}) + \\ V_C (H_{CpC} + h_{DpD} + H_{EpE}) + \\ V_E H_{EpE} \}$$

c_1 - constante que depende do sistema de unidades adotado

R - conjunto de reservatórios do sistema;

J_i - conjunto de usinas a jusante do reservatório i inclusive;

$V_{\text{útil}}$ - volume útil do reservatório i ($V_{\text{útil}} = V_{\max} - V_{\min}$) em hm^3 ;

ρ_j - produtibilidade específica da usina j em $\text{MW}/\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$

H_{eqj} - altura equivalente do reservatório j ou altura líquida (h_j) para as usinas a fio d'água em m ;

Produtibilidade específica: quantidade de energia gerada pelo turbinamento de $1 \text{ m}^3/\text{s}$ em 1 m de queda líquida;

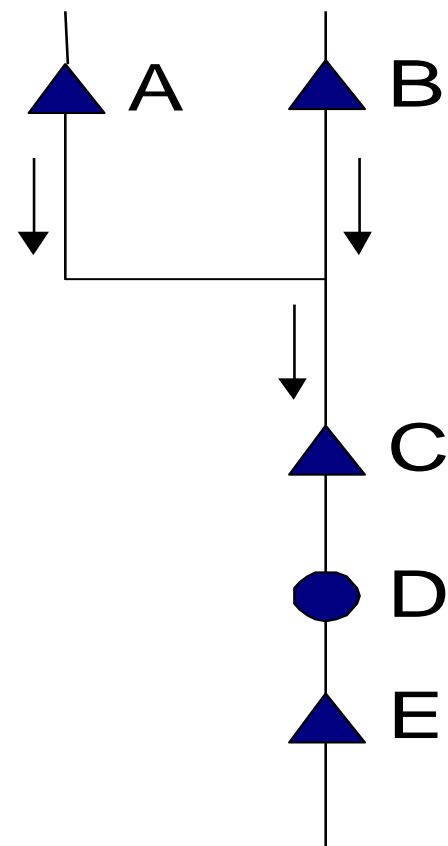
Altura equivalente: obtida pela integração do polinômio cota-volume.

Modelo NEWAVE

Planejamento da Operação de Longo e Médio Prazos

- **Energia Natural Afluyente**

- Para os aproveitamentos com reservatório de regularização, as vazões afluentes mensais da série histórica são transformadas em energias afluentes. Somando-se essas energias para todos os reservatórios do sistema, obtêm-se as séries de **energia controlável** ao sistema equivalente
- Analogamente são obtidas, para as usinas a fio d'água, as séries de **energia a fio d'água**
- Somando-se essas duas séries, controlável e fio d'água, obtemos a série de **energia natural afluyente** ao sistema equivalente



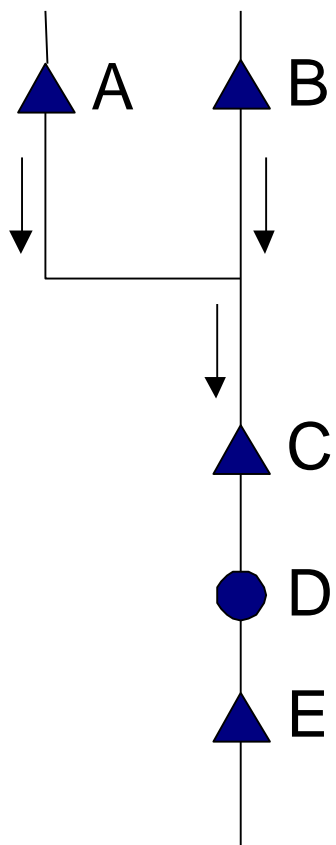
As séries históricas de *vazões* afluentes às UHE's (1931 a 2024) devem ser inicialmente transformadas em séries históricas de *energias* afluentes a cada um dos REE's

Modelo NEWAVE

Planejamento da Operação de Longo e Médio Prazos

• Energia Controlável

$$EC = \sum_{i \in R} [Q_{i,k} (\rho_i H_{65\%,i} + \sum_{j \in J_i} \rho_j h_j)]$$



Parcela da energia natural afluyente que chega às usinas com reservatório

Energia pode ser armazenada (controlada)

$$EC = Q_A H_A \rho_A + Q_B H_B \rho_B + Q_C (H_C \rho_C + h_D \rho_D) + Q_E H_E \rho_E$$

- R - conjunto de reservatórios do sistema;
- J_i - conjunto de usinas a fio d'água compreendidas entre o reservatório i e o próximo reservatório a jusante;
- $Q_{i,k}$ - afluência natural ao reservatório i durante o mês k em m^3/s ;
- ρ_j - produtibilidade específica da usina j em $MW/m^3/s/m$;
- $H_{65\%,i}$ - altura a 65% do reservatório i em m;
- h_j - altura líquida para a usina a fio d'água j em m.

Modelo *NEWAVE*

Planejamento da Operação de Longo e Médio Prazos

• Energia Fio d'Água

- Parcela da energia natural afluyente que chega às usinas a fio d'água
- É calculada considerando a afluência incremental, pois uma parcela da afluência natural dessas usinas já foi considerada no cálculo da energia controlável das usinas a montante com reservatório
- Por não possuírem capacidade de armazenamento, deve-se levar em conta o limite de turbinamento (engolimento máximo)
 - Fio d'água bruta: não considera o limite de turbinamento
 - Fio d'água líquida: considera o limite de turbinamento
 - Perdas por engolimento máximo: Bruta - Líquida

$$EFIOB = \sum_{i \in F} (Q_{i,k} - \sum_{j \in M_i} Q_{j,k}) \rho_i h_i$$

Vazão incremental (Q_{inc})

[MWmês]

Modelo NEWAVE

Planejamento da Operação de Longo e Médio Prazos

- Energia Fio d'Água

$$EFIOB = \sum_{i \in F} (Q_{i,k} - \sum_{j \in M_i} Q_{j,k}) \rho_i h_i$$

[MWmês]

Vazão incremental (Q_{inc})

- Energia Fio d'água Líquida



limitar a vazão incremental

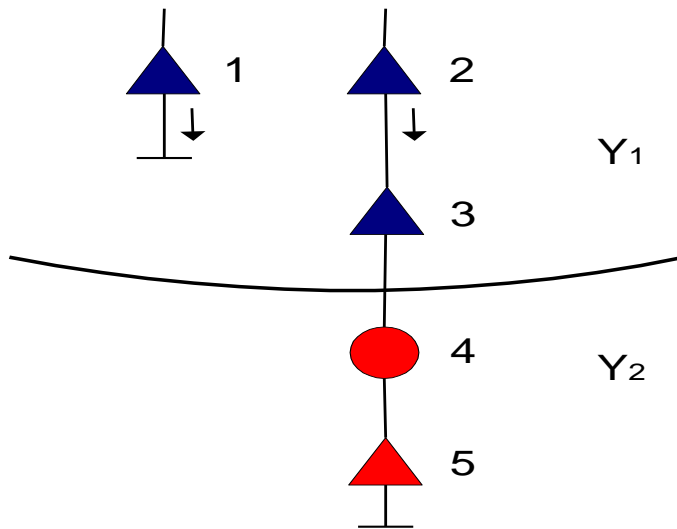
$$EFIOL = \sum_{i \in F} \min \{ (Q \max_i), (Q_{i,k} - \sum_{j \in M_i} Q_{j,k}) \} \rho_i h_i$$

- $Q \max_i$ - Engolimento máximo da usina a fio d'água i em m^3/s
- A diferença entre as energias a fio d'água bruta e líquida é definida como perdas fio d'água

Modelo NEWAVE

Planejamento da Operação de Longo e Médio Prazos

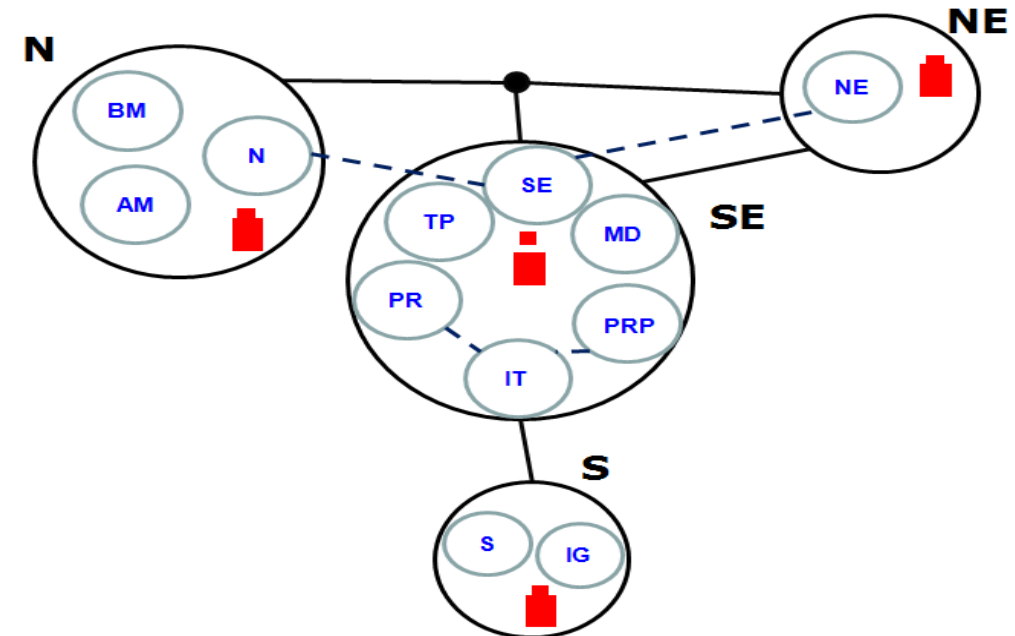
• Acoplamento Hidráulico



- Parte da energia armazenada em Y_1 será gerada no próprio Y_1
- Outra parte da energia armazenada em Y_1 será gerada em Y_2 (usinas 4 e 5)
- Parte da energia estocada Y_1 "pertence" à Y_2

Exemplos:

Acoplamento entre os REEs Paraná e Itaipu e também entre os REEs Paranapanema e Itaipu



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

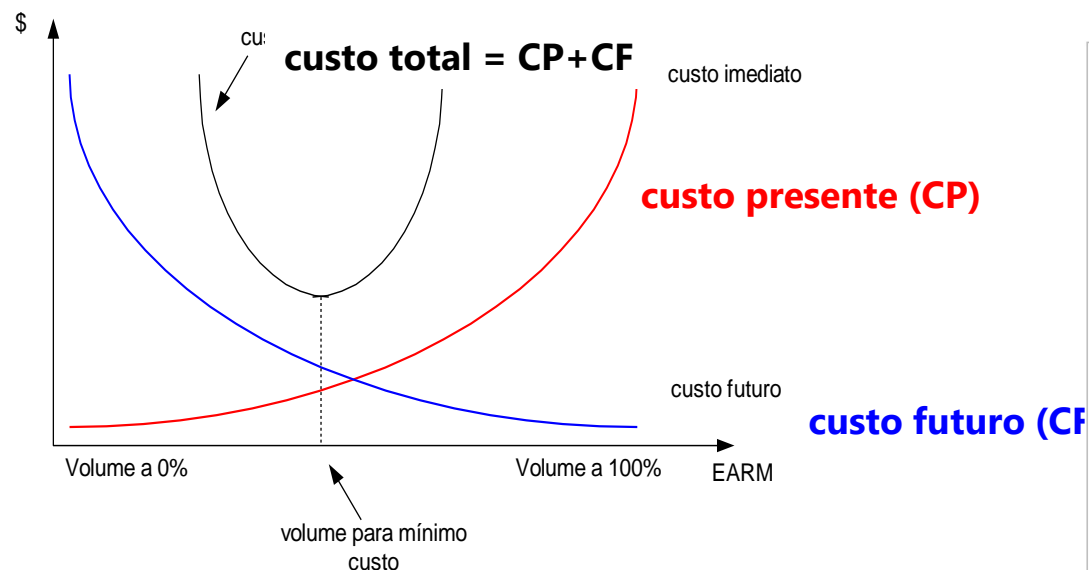
4) Simulação da Operação do Sistema

- 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

Modelo NEWAVE

Planejamento da Operação de Longo e Médio Prazos

Cálculo da Política de Operação



Atende à carga com água

Volume: Zero

CP: Zero

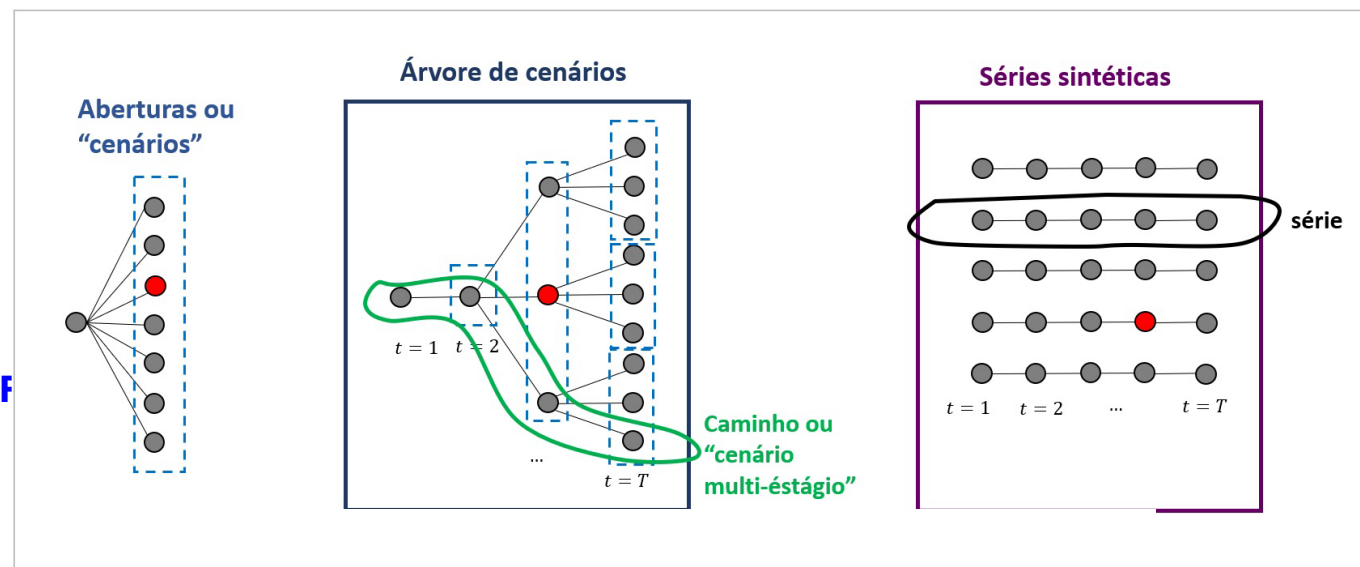
CF: Alto

Atende à carga com térmicas

Volume: 100%

CP: Alto

CF: Baixo



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

afluência 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)

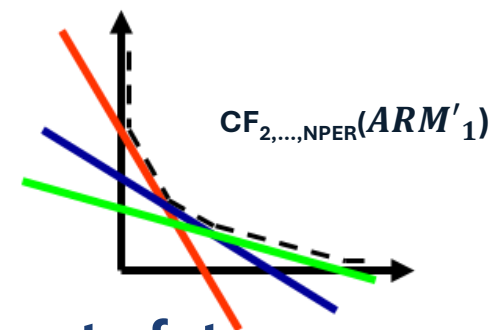
Anteriormente era empregado o algoritmo de programação dinâmica estocástica - *PDE*

Modelo NEWAVE

Planejamento da Operação de Longo e Médio Prazos

Cálculo da Política de Operação

- **Programação dinâmica dual estocástica (PDDE)**
 - Primeiro método a fazer uso da amostragem em programação estocástica
 - Evita a discretização do espaço de estados
 - Constrói iterativamente a função de custo futuro (CF) associada à árvore de cenários obtida previamente
- **Algoritmo com 2 passos**
 - *Recursão Backward*: construir a função de custo futuro
 - *Simulação Forward*: definir estados para a construção da função de custo futuro

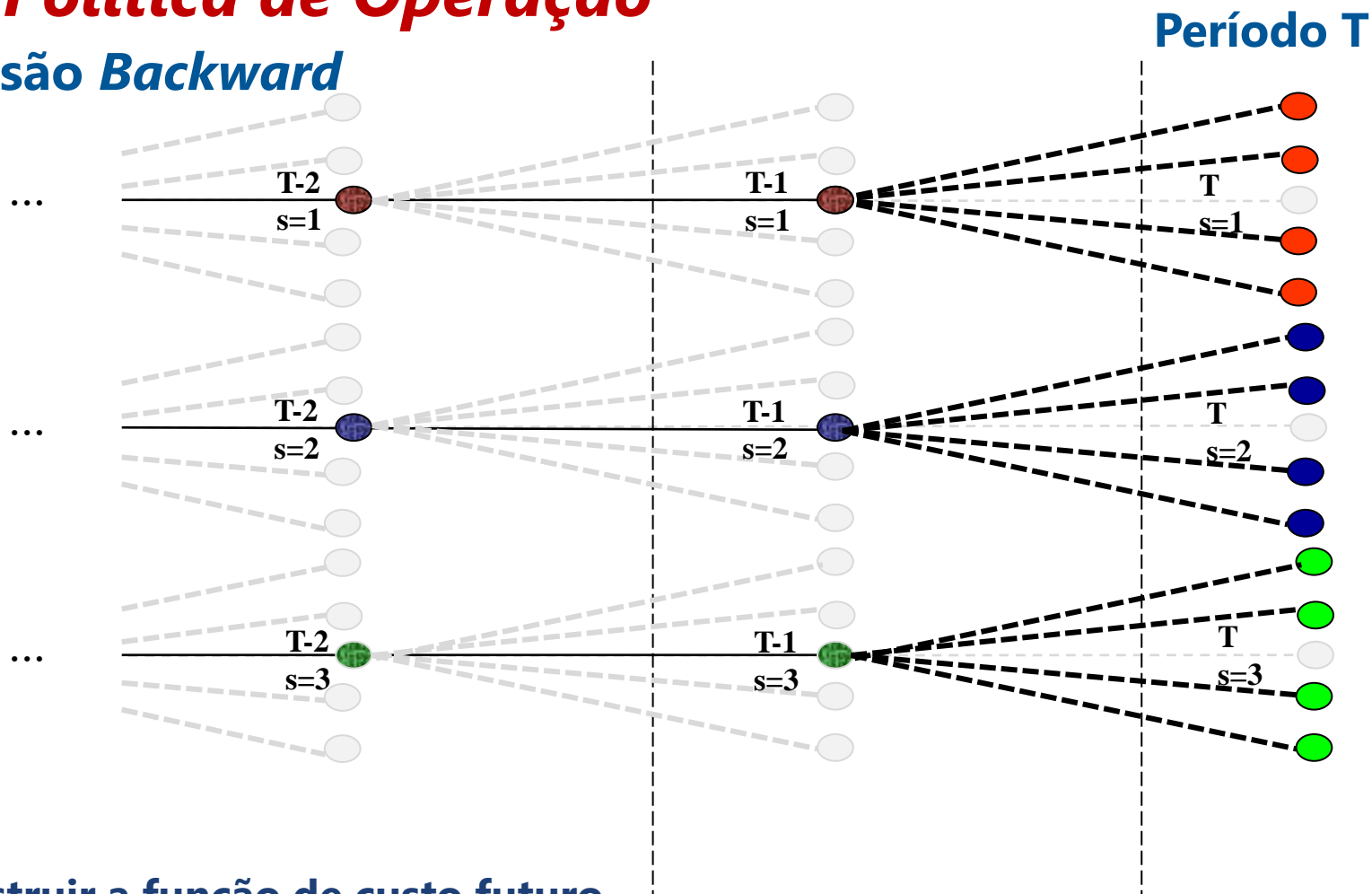


Modelo NEWAVE

Planejamento da Operação de Longo e Médio Prazos

Cálculo da Política de Operação

PDDE – Recursão Backward



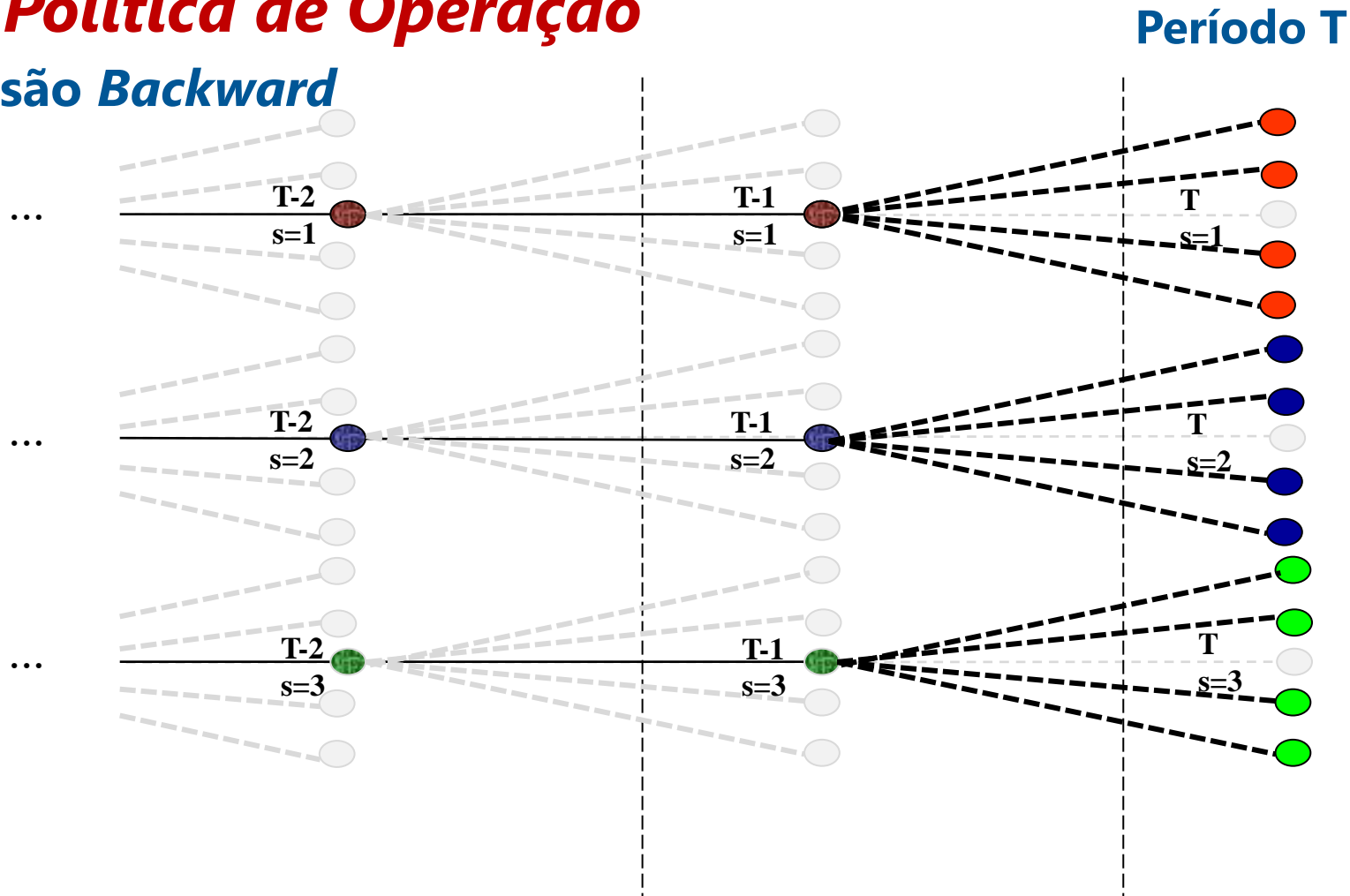
Objetivo: construir a função de custo futuro

Modelo NEWAVE

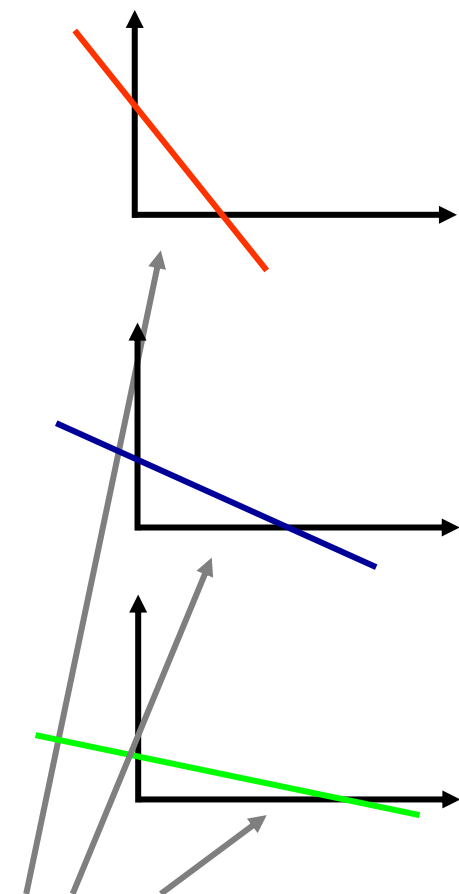
Planejamento da Operação de Longo e Médio Prazos

Cálculo da Política de Operação

PDDE – Recursão Backward



Período T



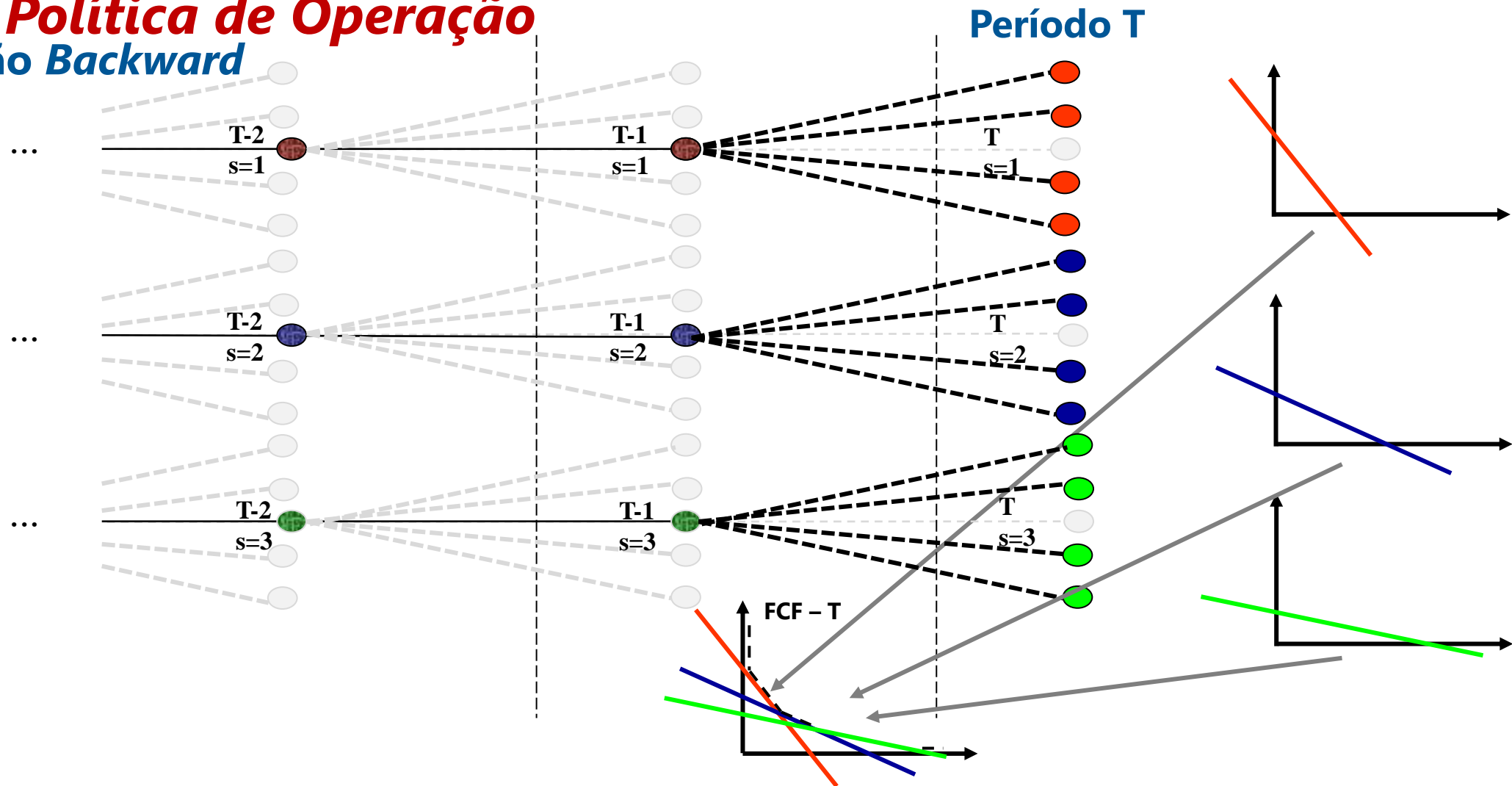
Corte de Benders – construído com o v.e. dos multiplicadores de Lagrange associado às restrições do problema

Modelo NEWAVE

Planejamento da Operação de Longo e Médio Prazos

Cálculo da Política de Operação

PDDE – Recursão Backward

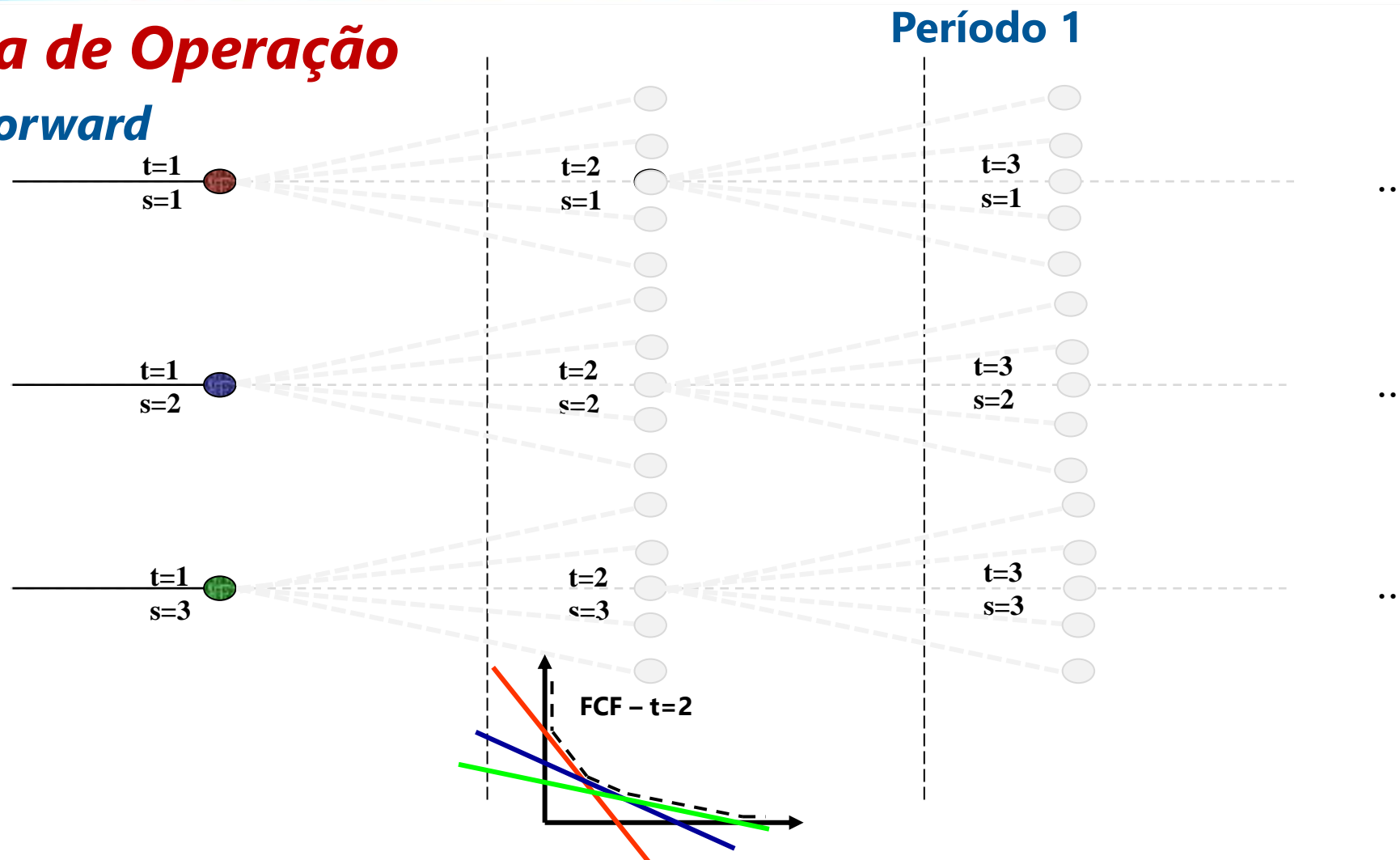


Modelo NEWAVE

Planejamento da Operação de Longo e Médio Prazos

Cálculo da Política de Operação

PDDE – Simulação Forward



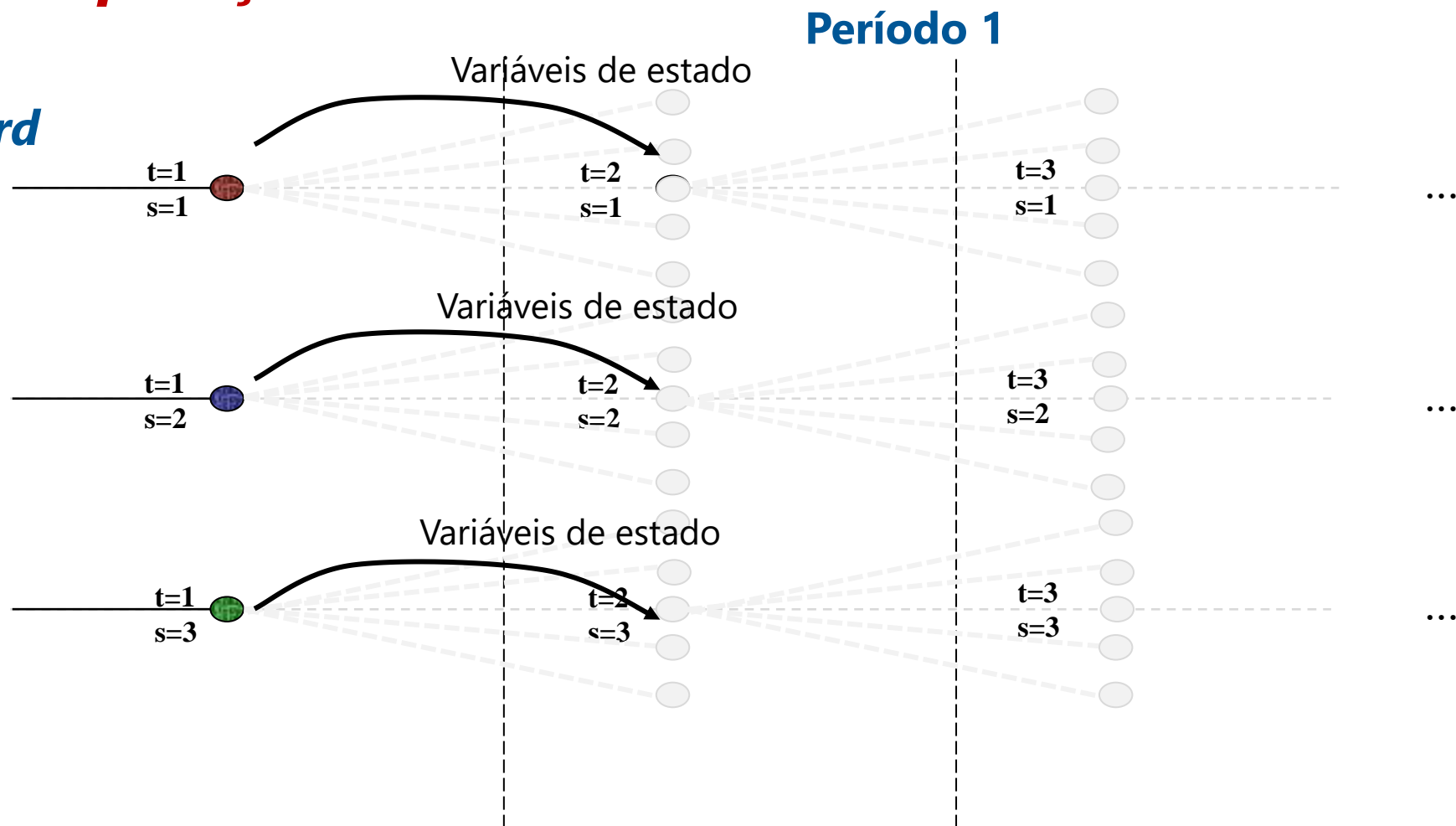
Objetivo: definir estados para a construção da função de custo futuro

Modelo NEWAVE

Planejamento da Operação de Longo e Médio Prazos

Cálculo da Política de Operação

PDDE – Simulação *Forward*



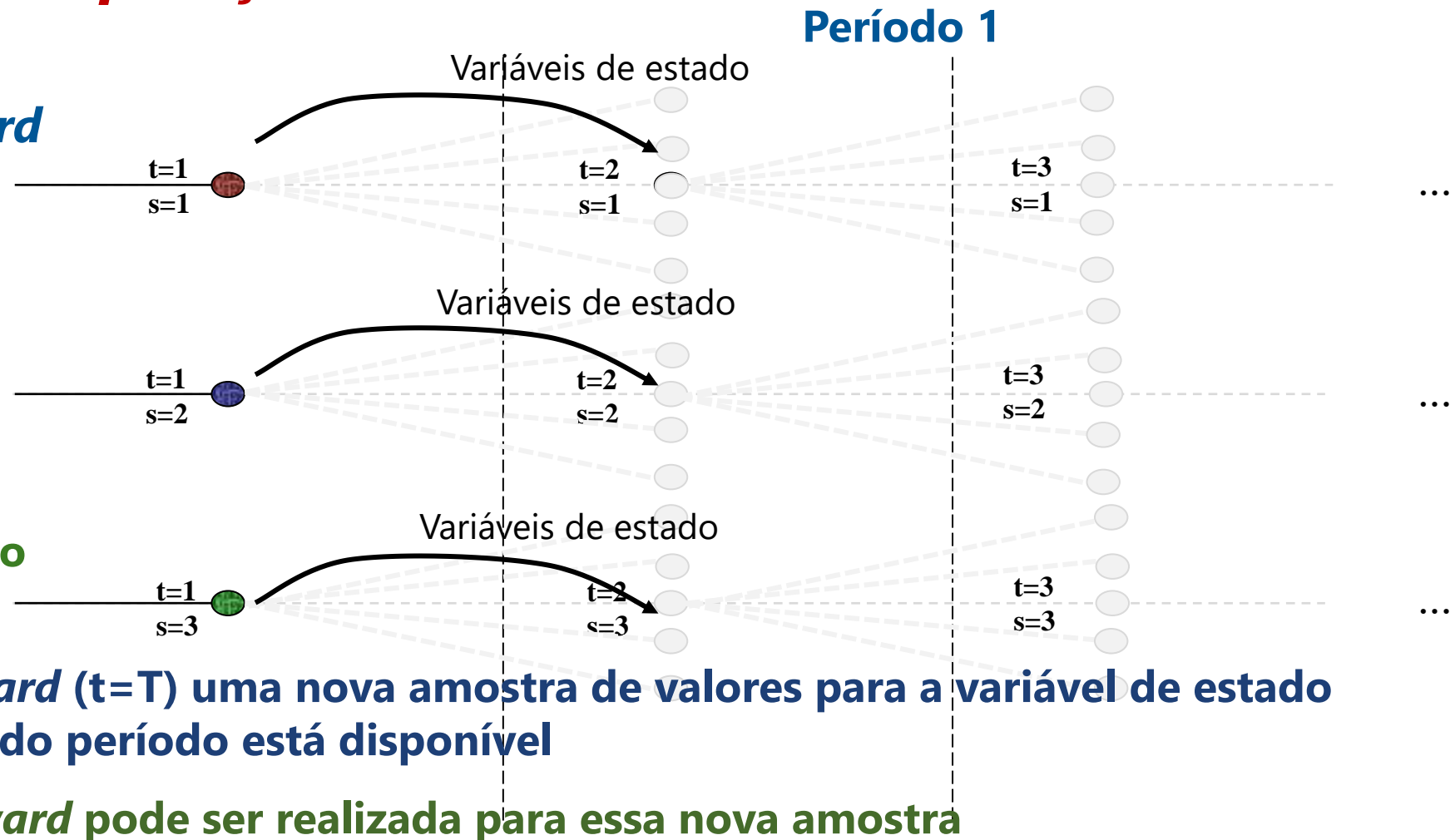
Modelo NEWAVE

Planejamento da Operação de Longo e Médio Prazos

Cálculo da Política de Operação

PDDE – Simulação *Forward*

- Repete-se esse processo para todos períodos do horizonte de planejamento ($t=1$ a $t=T$)
- Ao fim da simulação *forward* ($t=T$) uma nova amostra de valores para a variável de estado armazenamento no início do período está disponível
- Uma nova recursão *backward* pode ser realizada para essa nova amostra

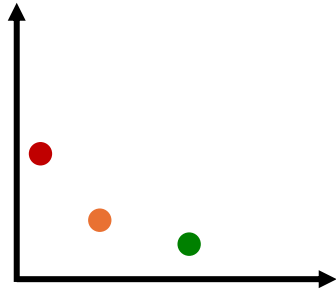


Modelo NEWAVE

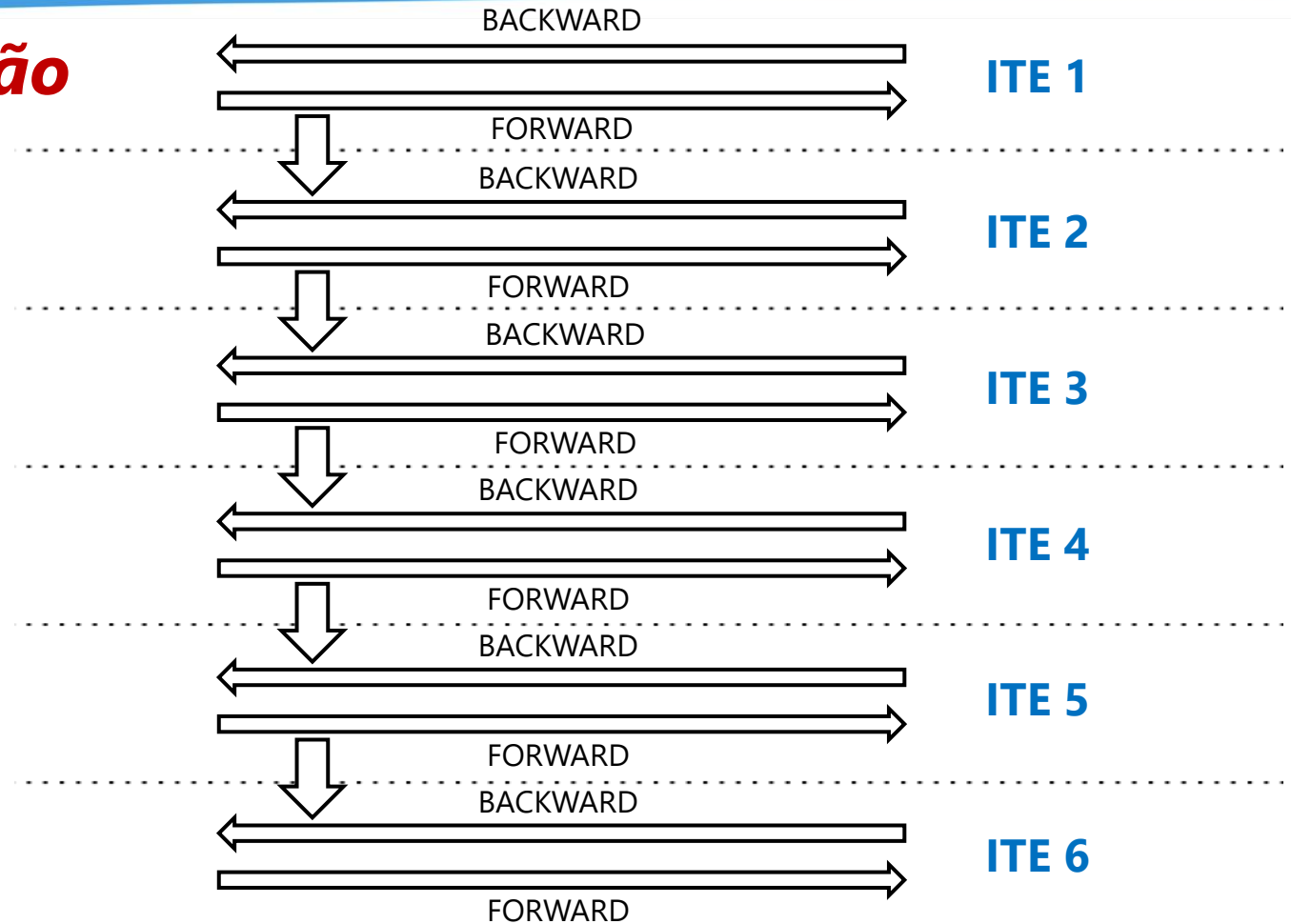
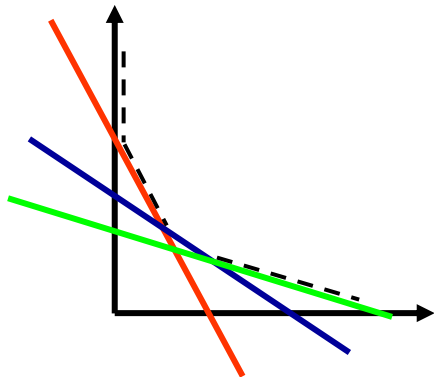
Planejamento da Operação de Longo e Médio Prazos

Cálculo da Política de Operação

FORWARD: definir estados para a construção da FCF



BACKWARD: construção da FCF



$$\text{Mínimo } Z_t = \text{CUSTO_OPERACAO}_t + \text{CUSTO_FUTURO}_{t+1, \dots, NPER}(\text{ARM}_t)$$

Modelo NEWAVE

Planejamento da Operação de Longo e Médio Prazos

Critério de parada do processo iterativo

**QUANDO
PARAR?**

Ao fim da simulação *forward*:

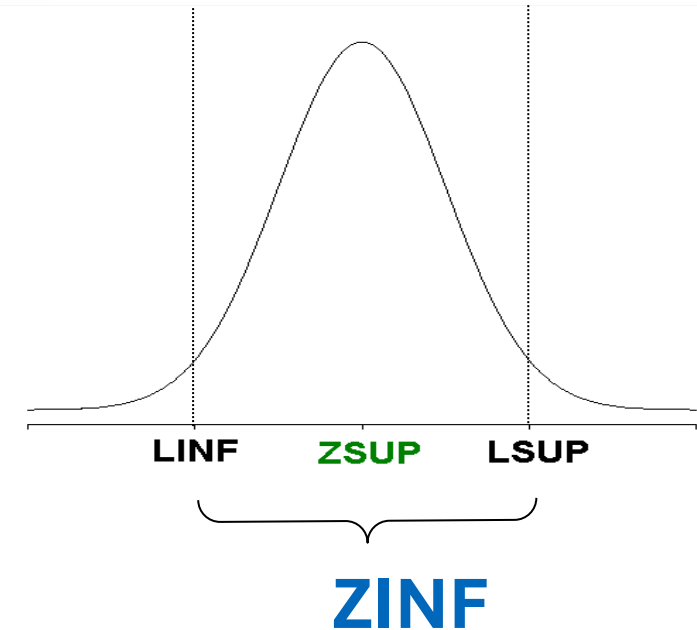
ZSUP - valor esperado do custo total “efetivo” de operação

$$ZSUP = \left(\sum_{i=1}^{nsim} \left(\sum_{t=1}^{NPER} CUSTO_OPERACAO_{i,t} \right) \right) / nsim$$

Ao fim do 1º período da simulação *forward*:

ZINF – custo esperado de operação estimado pela FCF

$$ZINF = \left(CUSTO_OPERACAO_{i,t} + \sum_{i=1}^{nsim} (CUSTO_FUTURO_{i,t=2}) \right) / nsim$$



•Convergência estatística:

ZINF dentro do intervalo de confiança do ZSUP
[LINf,LSUP]

Não é adequado quando do uso do CVaR

•Critério alternativo:

Estabilidade de ZINF (atualmente empregado)

Modelo NEWAVE

Planejamento da Operação de Longo e Médio Prazos

Problema da Operação Hidrotérmica

Formulação Neutra ao Risco - REE

Min (custo presente + custo futuro)

sujeito a

- equações de balanço hídrico
- equações de atendimento a demanda
- restrições de atendimento às metas de energia de desvio controlável e fio d'água
- restrições de atendimento às metas de energia vazão mínima
- função de custo futuro
- limites operativos
- limites físicos

Modelo NEWAVE

Planejamento da Operação de Longo e Médio Prazos

Problema da Operação Hidrotérmica

Função Objetivo

Min (custo presente + custo futuro)

$$\alpha_t = \min \sum_{isis=1}^{nsis} \left(\begin{aligned} & \sum_{iclt}^{tclsis(isis)} CT_{isis,iclt} \sum_{ipat}^{npmc} gt_{isis,iclt,ipat} \\ & + \sum_{idef=1}^{npdf} CDEF_{isis,idef} \sum_{ipat}^{npmc} def_{isis,idef,ipat} \\ & + Pvzm\delta vzm_{iree} \\ & + Pdsv(\delta dsv c_{iree} + \delta dsv f_{iree}) \\ & + Pghm \sum_{ipat}^{npmc} \delta ghm_{iree,ipat} \end{aligned} \right) + 1/\beta \alpha_{t+1}$$

Modelo NEWAVE

Planejamento da Operação de Longo e Médio Prazos

Problema da Operação Hidrotérmica

Balanço hídrico

$$EARM_f = EARM_i + EC - GH - VERT - EVAP - DSVC$$

$$ea_{t+1,iree} = EA_{iree} + FC_{iree} \gamma_{iree} ENA_{iree} - EVAP_{iree} - gh_{iree} - evert_{iree} - dsvc_{iree}$$

$$iree = 1, \dots, NREE$$

Modelo NEWAVE

Planejamento da Operação de Longo e Médio Prazos

Problema da Operação Hidrotérmica

Atendimento a demanda

$$GH + GT + DEF + IMP - EXP - EXC = D_{liq}$$

$$\begin{aligned}
 & gh_{iree,ipat} + gfiol_{iree} + \sum_{iclt=1}^{tclsis(isis)} gt_{isis,iclt,ipat} + \sum_{idef=1}^{npdf} def_{isis,idef,ipat} \\
 & + \sum_{jsis \in \Psi_{isis}} inter_{isis,jsis,ipat} - \sum_{jsis \in \Psi_{isis}} inter_{jsis,isis,ipat} \\
 & - exc_{isis,pat} = D_{isis,ipat} - \sum_{iclt=1}^{tclsis(isis)} GTMIN_{isis,iclt,ipat} - \left(\sum_{iree \in isis} SUBM_{iree} + PQUSI_{isis} \right) * FPENG_{ipat}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 isis &= 1, \dots, NSIS \\
 ipat &= 1, \dots, NPMC
 \end{aligned}$$

Modelo NEWAVE

Planejamento da Operação de Longo e Médio Prazos

Problema da Operação Hidrotérmica

Geração hidráulica

Geração Hidráulica Máxima

$$gh_{iree,ipat} + gfiol_{iree} \leq GHMAX_{iree,ipat}$$

Geração Hidráulica Mínima

$$gh_{iree,ipat} + gfiol_{iree} + \delta ghm_{iree,pat} \geq GHMIN_{iree,ipat}$$

$iree = 1, \dots, NREE$
 $ipat = 1, \dots, NPMC$

Modelo NEWAVE

Planejamento da Operação de Longo e Médio Prazos

Problema da Operação Hidrotérmica

Atendimento de requisitos mínimos

Vazão Mínima

$$gh_{iree} + evert_{iree} + \delta vzm_{iree} = EVZM_{iree}$$

Desvio controlável

$$dsvc_{iree} + \delta dsvc_{iree} = MDSVC_{iree}$$

Desvio Fio d'água

$iree = 1, \dots, NREE$

$$dsvf_{iree} + \delta dsvf_{iree} = MDSVF_{iree}$$

Modelo NEWAVE

Planejamento da Operação de Longo e Médio Prazos

Problema da Operação Hidrotérmica

Energia Fio d'água

Perdas Fio d'água Líquida

$$\text{PERDAF} \geq \text{MARS}(\text{EFIOB}_{\text{tot}})$$

$$\text{perdaf}_{iree} + CA_{iree,ireta}(\text{dsf}_{iree}) \geq CA_{iree,ireta}(\text{EFIOB}_{iree}) + CL_{iree,ireta}$$

Geração Fio d'água Líquida

$$\text{GFIOL} = \text{EFIOB}_{\text{tot}} - \text{PERDAF}$$

$$\text{gfiol}_{iree} + \text{perdaf}_{iree} = \text{EFIOB}_{iree} - \text{dsf}_{iree}$$

$$\begin{aligned} iree &= 1, \dots, NREE \\ ipat &= 1, \dots, NPMC \end{aligned}$$

Modelo NEWAVE

Planejamento da Operação de Longo e Médio Prazos

Problema da Operação Hidrotérmica

Outras restrições

Balanco nos nós de interligação

$$\sum_{jsis \in \Psi_{isis}} inter_{isis,jsis} - \sum_{jsis \in \Psi_{isis}} inter_{jsis,isis} = 0$$

Limites

$$inter_{jsis,isis} \leq \overline{inter}_{jsis,isis}$$

$$\underline{ea}_{isis,t+1} \leq ea_{isis,t+1} \leq \overline{ea}_{isis,t+1}$$

$$GTMIN_{isis,iclt,ipat} \leq gt_{i_{isis,iclt,ipat}} \leq GTMAX_{isis,iclt,ipat}$$

isis = 1, ... ,NSBM

iclt = 1, ... ,TCL SIS (ISIS)

ipat = 1, ... ,NPMC

Modelo NEWAVE

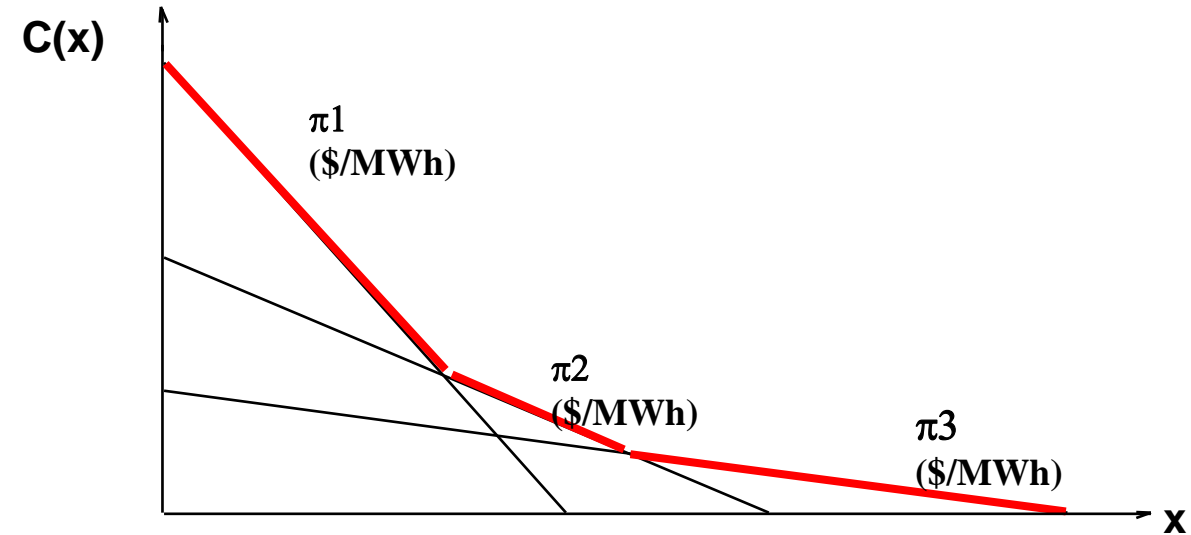
Planejamento da Operação de Longo e Médio Prazos

Problema da Operação Hidrotérmica

Cortes da função de custo futuro

$$\text{Alfa} \geq \text{RHS} + \text{Plv EARMf} + \text{Pla ENA}$$

$$\begin{aligned} \alpha_{t+1} - \sum_{isis=1}^{nsis} \pi_{v,t+1,icor}^{isis} E A_{t+1}^{isis} \\ \geq cte_{icor} + \sum_{isis=1}^{nsis} \sum_{k=1}^p \pi_{a,k,t+1,icor}^{isis} E N A_{t-k}^{isis} + \sum_{l=1}^{LAGMAX} \sum_{m=1}^{NSBM} \sum_{c=1}^{NPMC} ((\pi_{gnl}^{m,c,i})_{t+l} SGT_{t+l,m,c}) \end{aligned}$$



icorte = 1, ... ,NCOR

Modelo NEWAVE

Planejamento da Operação de Longo e Médio Prazos

Mecanismo de Aversão a Risco

Minimização pelo valor condicionado a um dado risco - CVaR

A partir da 2ª década do século XXI, com a ocorrência de períodos secos mais severos, surgiu a necessidade de se incorporar medidas de aversão a risco complementares à minimização do valor esperado do custo de operação no modelo NEWAVE

$$\min_{x_1} \left[c_1 x_1 + (1-\lambda) E \left[\min_{x_2 \mid \begin{matrix} A_2 x_2(\omega_2) = b_2(\omega_2) - E_1 x_1 \end{matrix}} c_2 x_2 \right] + (\lambda) CVaR_{\alpha} \left[\min_{x_2 \mid \begin{matrix} A_2 x_2(\omega_2) = b_2(\omega_2) - E_1 x_1 \end{matrix}} c_2 x_2 \right] \right]$$

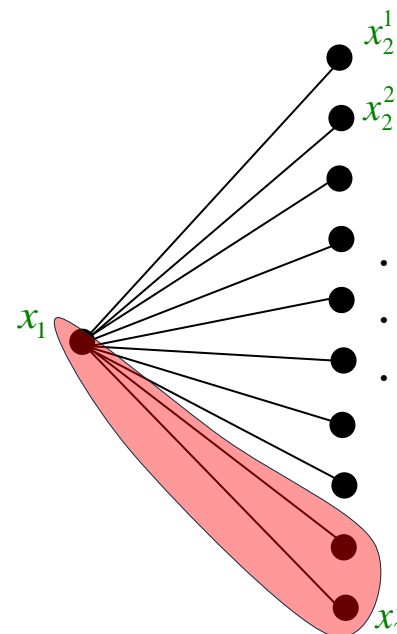
Peso para o valor esperado (green arrow pointing to $(1-\lambda)$)

Nível de risco (red arrow pointing to α)

Peso para o CVaR (blue arrow pointing to λ)

Parâmetros: λ, α

Formulação matemática - problema de 2 estágios



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

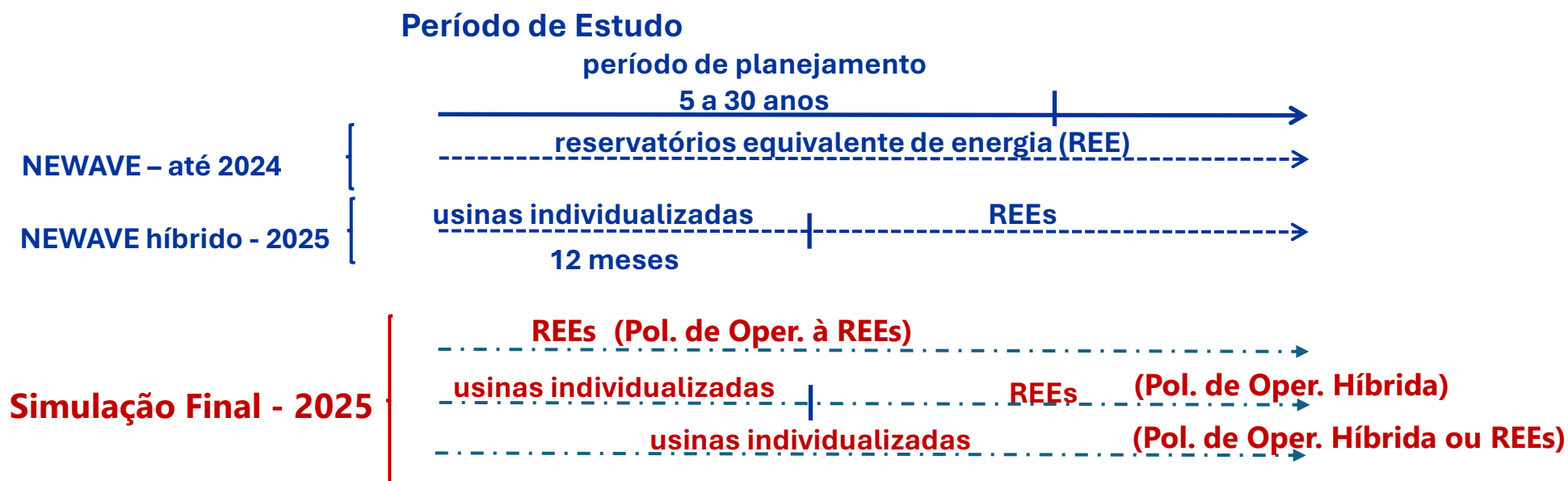
- cálculo de índices probabilísticos de desempenho do sistema
- valor esperado da energia não suprida e risco de déficit
- distribuição de frequências de custos marginais, intercâmbios, etc

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



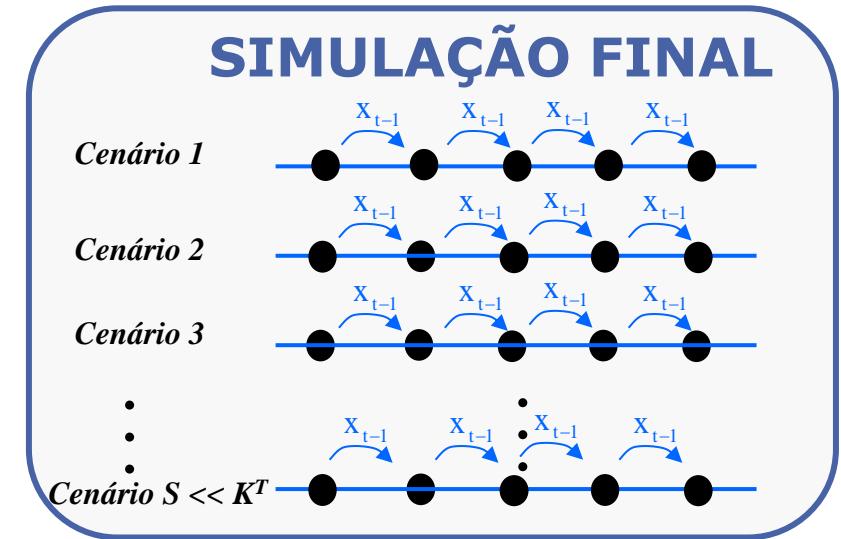
Modelo NEWAVE

Planejamento da Operação de Longo e Médio Prazos

Simulação Final

Simulação da operação de sistemas hidrotérmicos-eólicos interligados

- Risco anual de déficit
- Valor esperado e *distribuição de frequências*:
 - custo de operação
 - geração de cada uma das usinas geradoras (ou REEs) da configuração futura
 - intercâmbio entre os subsistemas
 - CMO's



Estudos de viabilidade de expansão
Estudos de comercialização

Modelo NEWAVE

Planejamento da Operação de Longo e Médio Prazos

Problema da Operação Hidrotérmica

Possui 4 módulos básicos:

1) Construção dos reservatórios equivalentes de energia (REE) (se for o caso)

- 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 (modelo GEVAZP)

- **Modelo autorregressivo periódico - PAR(p) com Amostragem Seletiva (PAR(p)-A)**

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

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

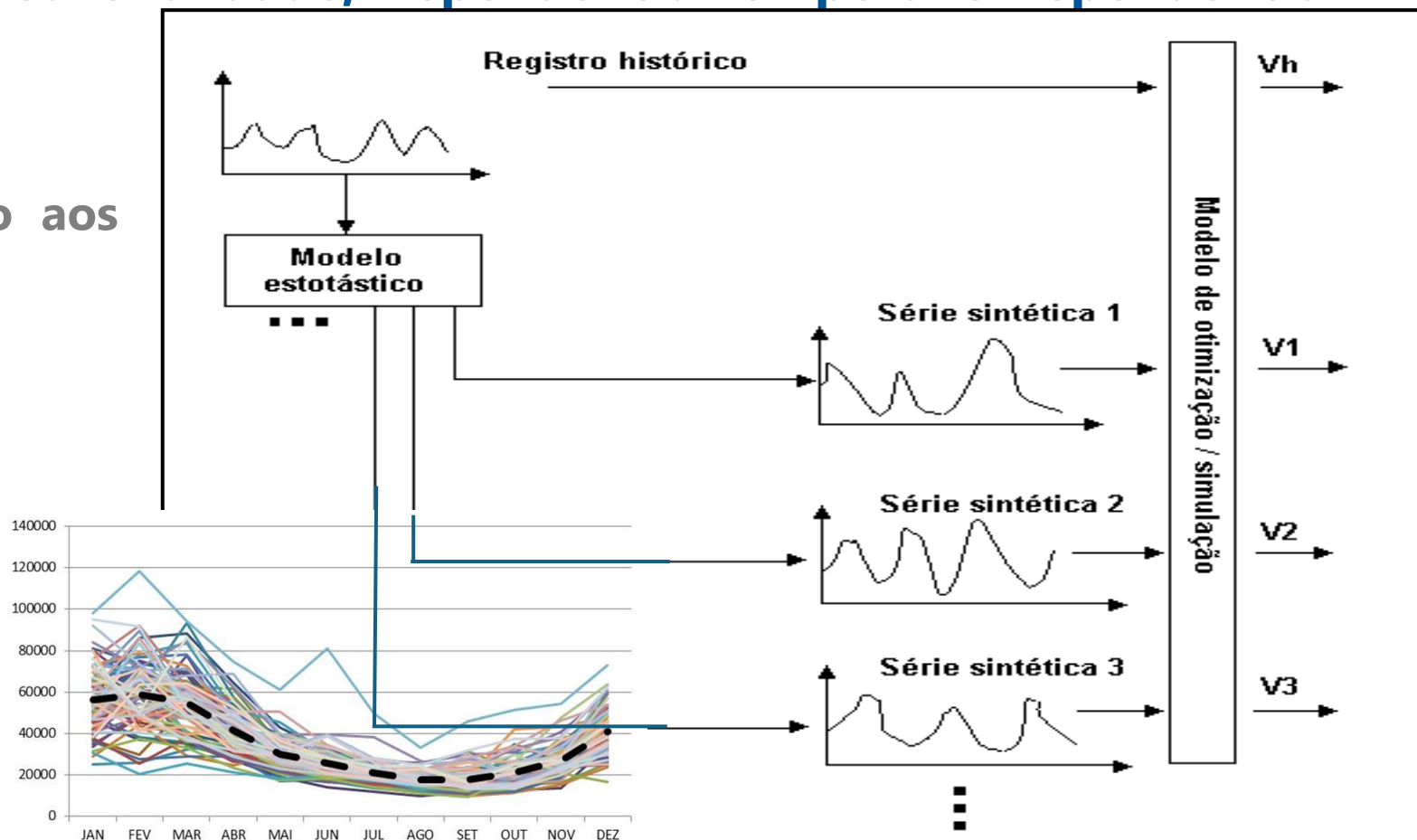
Ajuste de um modelo estocástico aos dados históricos:

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



Modelo NEWAVE

Planejamento da Operação de Longo e Médio Prazos

Modelo Estocástico para Geração de Séries Sintéticas de Afluências

Representação da Variabilidade das Vazões

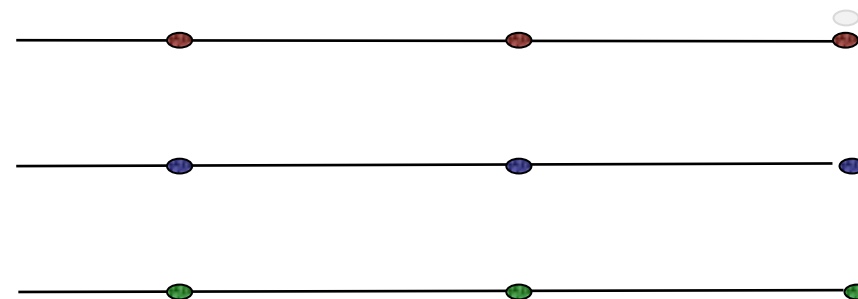
No modelo NEWAVE as *séries sintéticas* são empregadas na recursão *backward*, na simulação *forward* e na *simulação final* do algoritmo PDDE

simulação *forward*: 200 cenários mensais de igual tamanho ao período de estudo

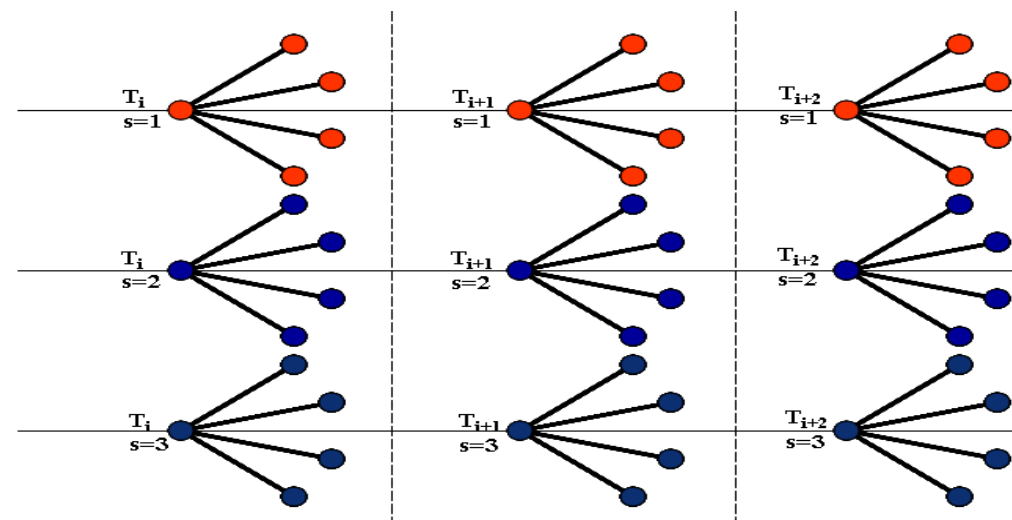
simulação *final*: 2.000 cenários mensais de igual tamanho ao período de estudo

recursão *backward*: 20 cenários mensais por mês e estado do algoritmo de PDDE

simulações *forward* e *final*



simulação *backward*



OBRIGADA!

Maria Elvira Piñeiro Maceira

melvira@ime.uerj.br