



Mecanismos de Aversão a Risco no Planejamento da Operação de Longo, Médio e Curto Prazos

CPAMP
24/Julho/2013

Maria Elvira P. Maceira

Departamento de Otimização Energética e Meio Ambiente

Otimização da Operação do SIN

Formação do Preço de Liquidação no Mercado de Curto Prazo

Com base em

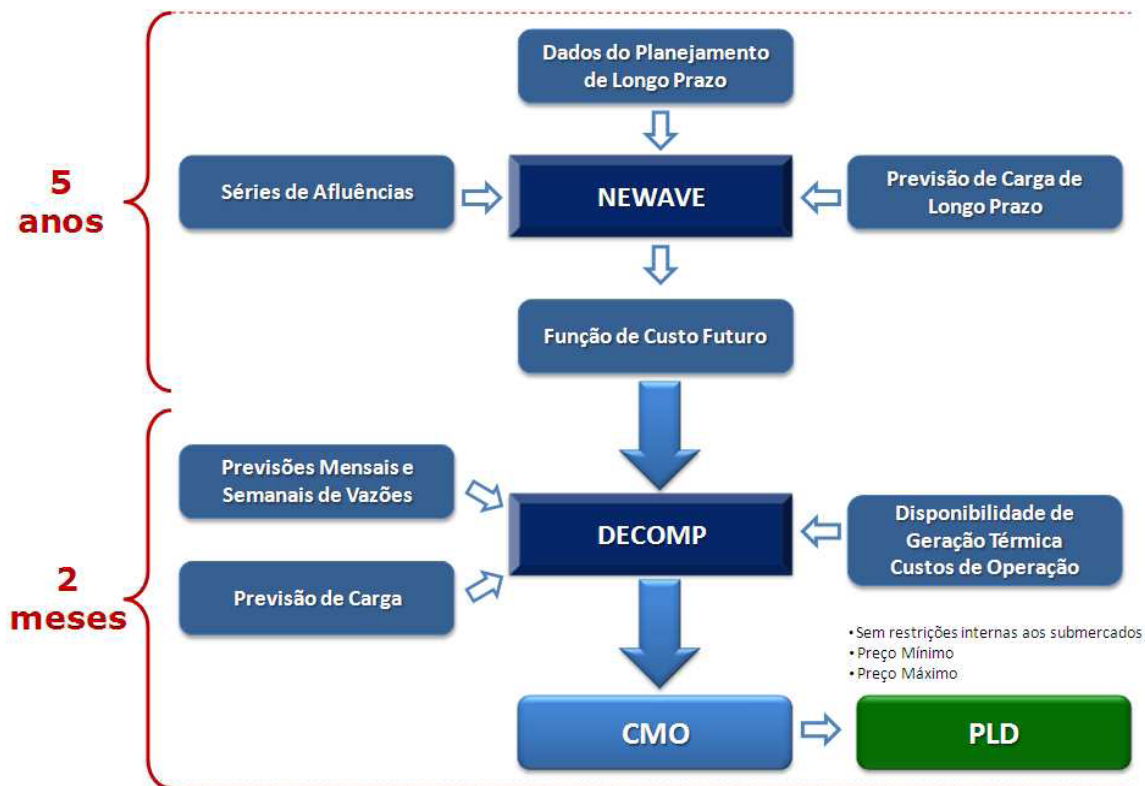
- **Condições hidrológicas**
- **Energia armazenada**
- **Previsão da demanda de energia**
- **Custos de combustíveis**
- **Custo do déficit**
- **Entrada de novos projetos e**
- **Disponibilidade dos equipamentos de geração e transmissão**

Os modelos computacionais determinam

- **Despacho ótimo de geração e os intercâmbios de energia considerando uma estratégia que minimiza o valor esperado do custo total de operação ao longo de todo o horizonte de planejamento**
- **são ainda obtidos os Custos Marginais de Operação (CMOs) para cada período e submercado**

Preço do Mercado de Curto Prazo ou Preço de Liquidação de Diferenças (PLD)

Baseia-se no cálculo do CMO e é determinado semanalmente para cada submercado (Norte, Nordeste, Sudeste/Centro-Oeste e Sul) e para cada patamar de carga (pesada, média e leve), sem considerar as usinas em teste e as restrições de transmissão internas a cada submercado, incorporadas pelo ONS no planejamento da operação



O PLD é limitado ainda por um preço máximo e um mínimo, estabelecidos pela ANEEL

O modelo NEWAVE é rodado uma vez ao mês, enquanto o modelo DECOMP é rodado toda semana

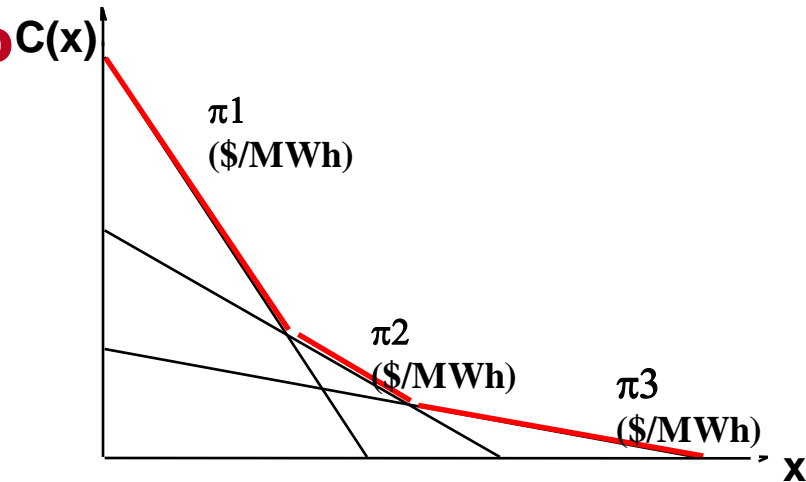
Problema de Planejamento da Operação a Longo e Médio Prazo

• Objetivo

- definir a alocação ótima de recursos hídricos e térmicos para cada *mês* minimizando o *custo total de operação esperado* (custos de geração térmica mais penalidades nas falhas de suprimento de carga)

• Solução

- programação dinâmica dual estocástica
- agregação de vários reservatórios em reservatórios equivalentes (com e sem dependência espacial)
- *estado*: energia armazenada e tendência hidrológica

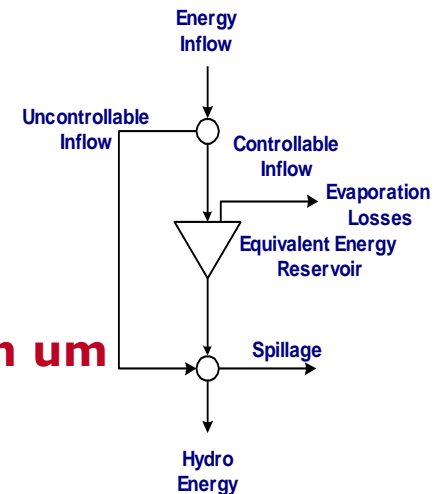


Função de custo futuro

4 módulos básicos:

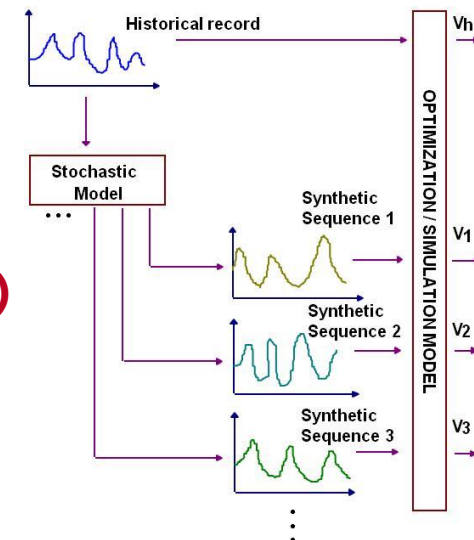
1) Construção dos sistemas equivalentes

- para cada subsistema agrega os reservatórios em um único reservatório de energia (com ou sem dependência espacial)
- as vazões são agregadas em afluências equivalentes de energia
- acoplamento hidráulico



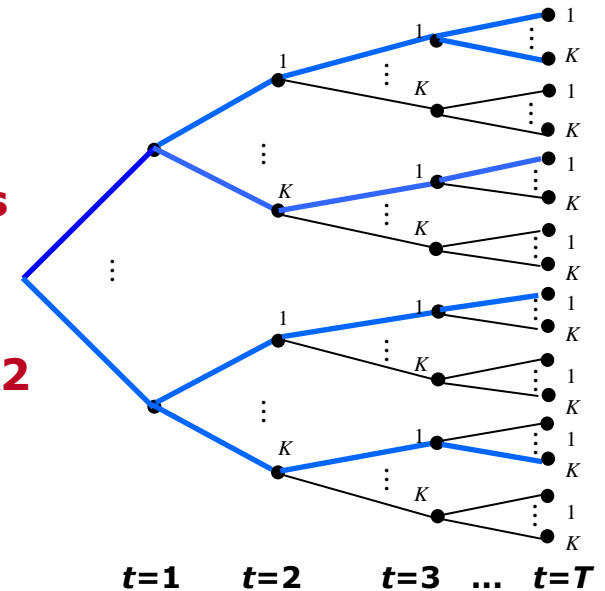
2) Geração de séries sintéticas de energias

- GEVAZP (modelo PAR(p), amostragem seletiva)



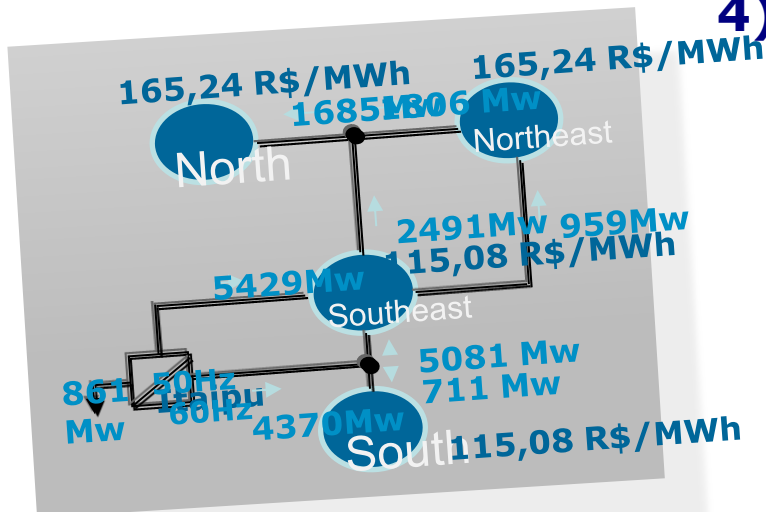
3) Cálculo da Política de Operação

- calcula a política de operação mais econômica representando-se as incertezas das afluências futuras (programação dinâmica dual estocástica)
- considera mecanismo de aversão a risco (CAR2 e CAR5 com penalidade original e criativa)
- usinas GNL



4) Simulação da Operação do Sistema com 2000 cenários de Afluências Multivariadas

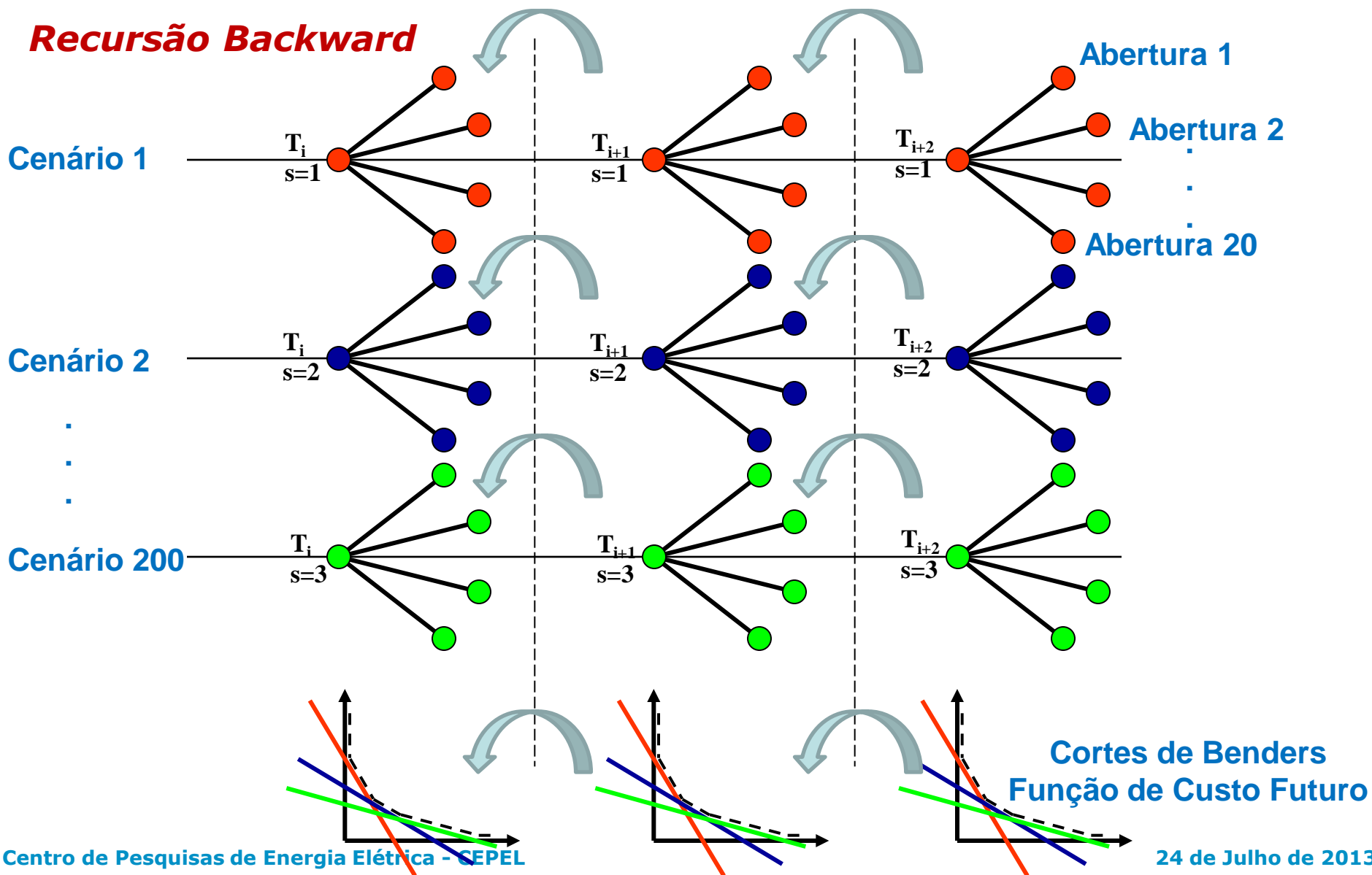
- cálculo de índices probabilísticos de desempenho do sistema
 - valor esperado da energia não suprida
 - risco de déficit
 - distribuição de frequências de custos marginais, intercâmbios, geração hidráulica, geração térmica, etc



NEWAVE

Cálculo da Política de Operação

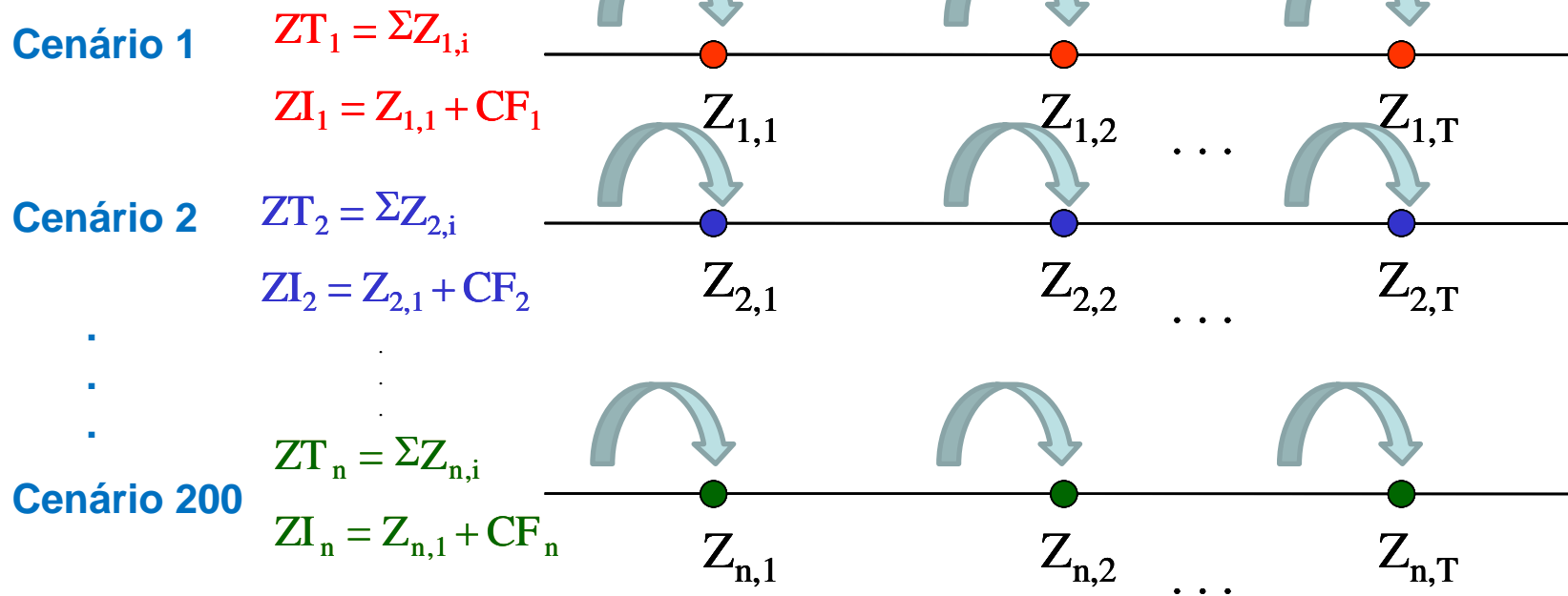
Recursão Backward



NEWAVE

Cálculo da Política de Operação

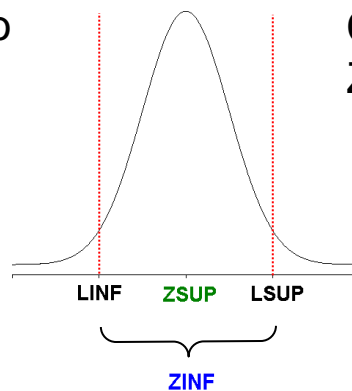
Recursão Forward



Convergência estatística: ZINF dentro do intervalo [LINF, LSUP]

$$ZSUP = \frac{\sum_{i=1}^n ZT_i}{n}$$

$$ZINF = \frac{\sum_{i=1}^n ZI_i}{n}$$



Convergência por estabilidade do ZINF

Função Objetivo

- Problema de um estágio (t)

$$\text{MIN } \{ \sum GT_t(j) * C_{\text{term}}(j) + \sum \text{Def}_t(j) * C_{\text{def}}(j) + \\ C_{\text{dsv}} * (\Delta \text{EDSVC}_t + \Delta \text{EDSVF}_t) + \frac{1}{1 + \beta} * CF_{t+1} \}$$

Minimização do valor esperado do custo total de operação

Problema de Operação Hidrotérmica

- **Equações de balanço hídrico**

- $EA_{t+1}(i) = EA_t(i) + FC EC_t(i) - GH_t(i) - EVERT_t(i) - EVP_t(i) + EDSVC_t(i) - EVZMIN_t(i) - EM_t(i)$

- **Equações de atendimento a demanda**

- $GHT(i) + \sum GTT(j) + (Ft(k,i) - Ft(i,k)) - EXCt(i) = Dt(i) - EFIOT(i) - EVZMINT(i) - EDSVFT(i)$

- **Demanda Líquida**

- $Dt(i) = Merct(i) - Submot(i) - Pequsit(i) - \sum GTmint(j)$

Problema de Operação Hidrotérmica

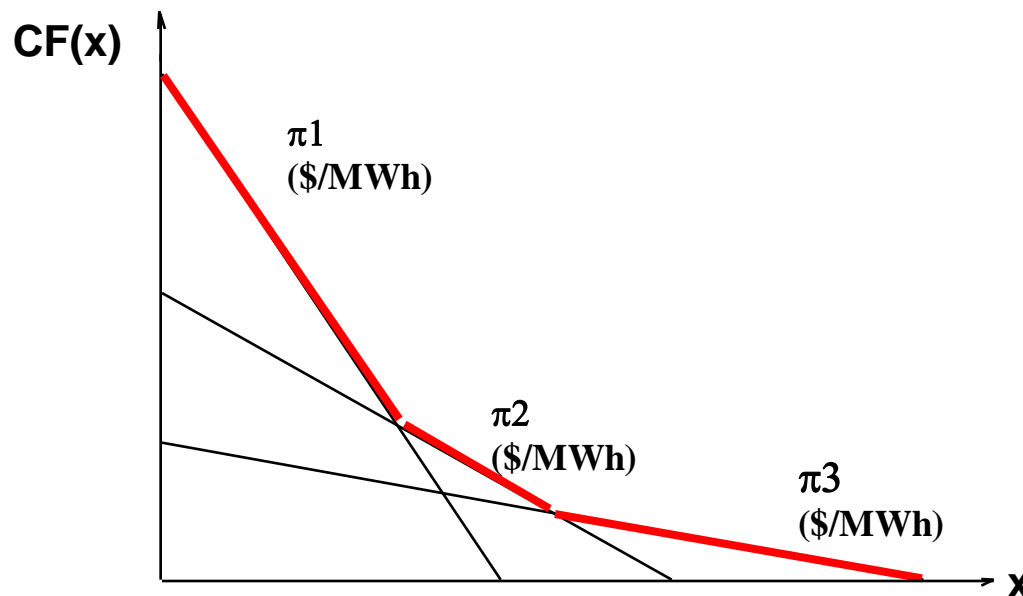
- **Restrições de armazenamento máximo**
 - $EARM_{t+1}(i) \leq EARM_{max,t+1}(i)$
- **Restrições de geração hidráulica máxima**
 - $GHT(i) + EFIOt(i) + EDSVFt(i) + EVZMINT(i) + EXCt(i) \leq GHMAXt(i)$
- **Limites na geração térmica**
 - $0 \leq GTt(i) \leq GTmaxt(i) - GTmint(i)$

Problema de Operação Hidrotérmica

- Função de custo futuro (FCF)**

$$CF_{t+1} - \pi_{v,t+1}^{SE} EA_{t+1}^{SE} - \pi_{v,t+1}^S EA_{t+1}^S - \pi_{v,t+1}^{NE} EA_{t+1}^{NE} - \pi_{v,t+1}^N EA_{t+1}^N \geq$$

$$cte + \sum_{isis=1}^{nsis} \sum_{k=1}^p \pi_{a,t-k}^{isis} EAF_{t-k}^{isis}$$



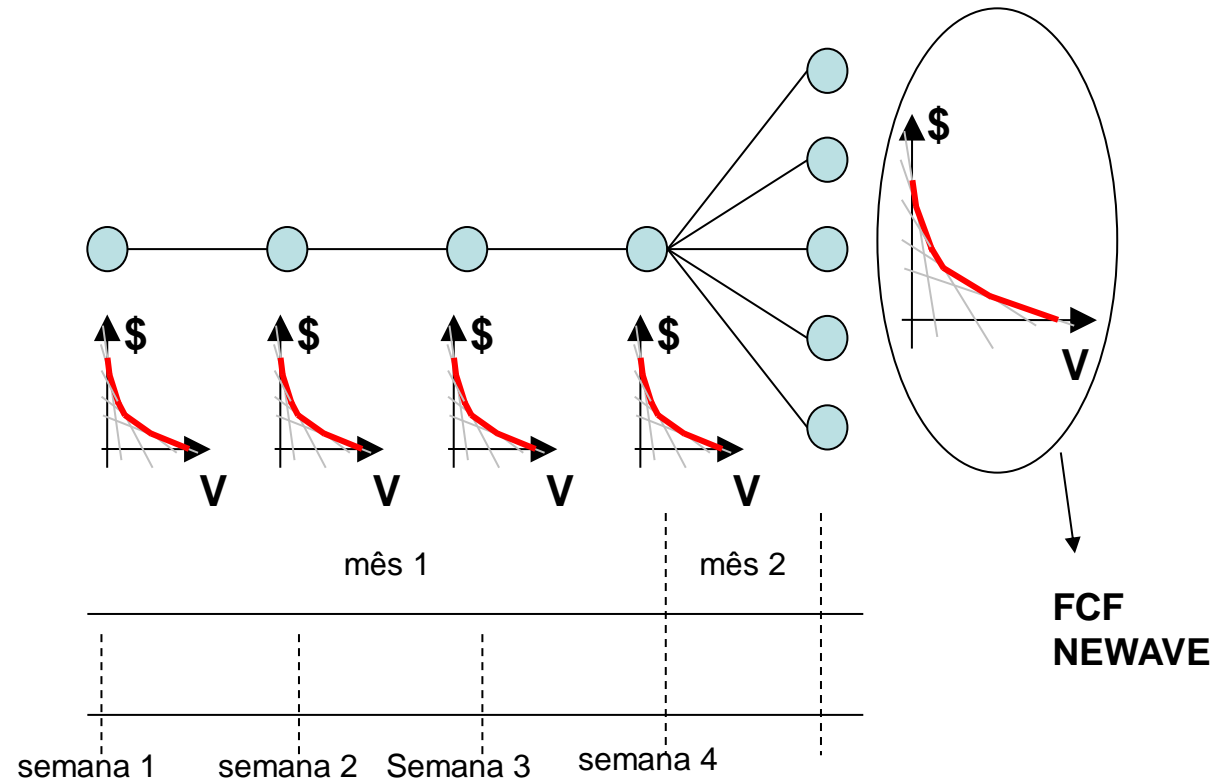
Problema de Operação Hidrotérmica

- **Restrições de armazenamento mínimo**
 - $\text{EARM}_{t+1}(i) \geq \text{EARMmin}_{t+1}(i)$
- **Restrições de intercâmbio mínimo**
 - $\text{Ft}(k,i) \geq \text{Ft}(k,i)$
- **Atendimento à meta de energia de desvio de água controlável**
 - $\text{EDSVct}(i) + \Delta\text{EDSVct}(i) = \text{MEDSVct}(i)$
- **Atendimento à meta de energia de desvio de água fio d'água**
 - $\text{EDSVft}(i) + \Delta\text{EDSVft}(i) = \text{MEDSVft}(i)$
- **Limite de energia de desvio de água fio d'água**
 - $\text{EDSVft}(i) \leq \text{EFIOt}(i)$
 - onde $i = 1, \dots, n^\circ$ de subsistemas/submercados

Coordenação Hidrotérmica a Curto Prazo

Objetivo

- define a alocação ótima de recursos hídricos e térmicos para todas as semanas do primeiro mês e para o restante dos meses do período de planejamento minimizando o custo total esperado de operação



Solução

- **Modelo de otimização estocástica, múltiplos períodos e cenários, linear**
- **as usinas hidráulicas são representadas individualmente**
- **programação dinâmica dual estocástica**
- ***estado*: energia armazenada**
- **Usinas GNL**

Resultados

- **Metas de geração por usina, intercâmbio entre subsistemas e custos marginais**
- **Aplicação no procedimento operativo de curto prazo**

Horizonte

- **Até 12 meses, semanal no 1º mês, mensal no restante**

Curva de Aversão a Risco - CAR

Superfície de Aversão a Risco - SAR

Valor Condicionado a um Dado Risco - CVaR

CAR **CURVA DE** **AVERSÃO A RISCO**

Proposta pelo Comitê de Revitalização do Modelo do Setor Elétrico, em seu Relatório de Progresso N° 2, (Jan/2002), Tema 21 - Procedimentos de alerta quanto a dificuldades de suprimento, Documento de Apoio C: “Aversão a Risco - Proposta Metodológica”

A metodologia com “penalidade original”, foi implementada no Programa NEWAVE em Junho de 2002

Uma alternativa metodológica, “penalidade criativa”, tem sido utilizada no somente no modelo NEWAVE para a realização dos PMOs desde 2004

- **Curva unidimensional de armazenamento mínimo por subsistema**
- **Seus valores tem como premissa um intercâmbio de energia *esperado* entre os subsistemas**
- **Com o passar do tempo, mostrou-se incapaz de fornecer uma sinalização adequada o suficiente para indicar um despacho térmico mais seguro**
- **Posteriormente, o ONS passou a utilizar o *Procedimento Operativo de Curto Prazo* a fim de obter despacho térmico adicional**

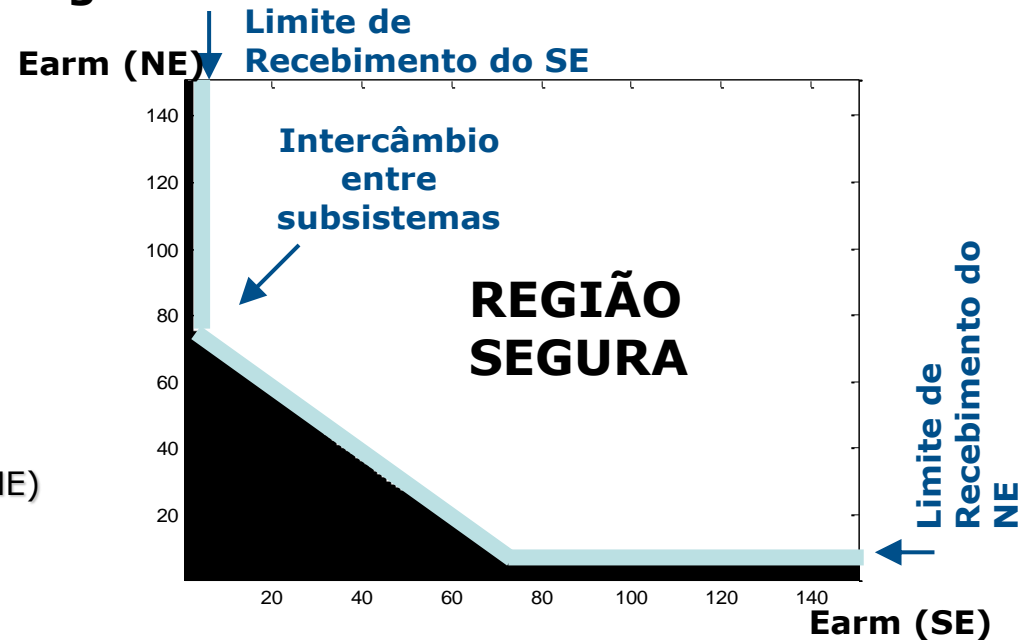
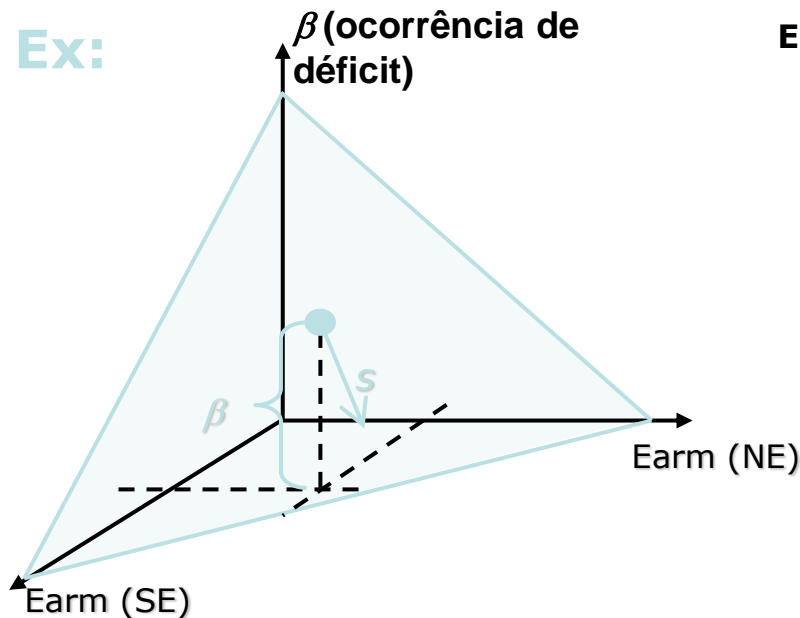
SAR **SUPERFÍCIE DE** **AVERSÃO A RISCO**

Uma metodologia com esta característica foi inicialmente proposta pela PSR através da apresentação “Possíveis Aperfeiçoamentos da Curva de Aversão a Risco” no ONS em março de 2008

A análise desta proposta conduzida pelo CEPEL verificou a necessidade de aprimorá-la e estendê-la para viabilizar a sua aplicação, conforme apresentação “Análise de Proposta e Discussão de Alternativas para Implementação da SAR no NEWAVE” para a Comissão Permanente de Análise de Metodologias e Programas Computacionais do Setor Elétrico – CPAMP em maio de 2008

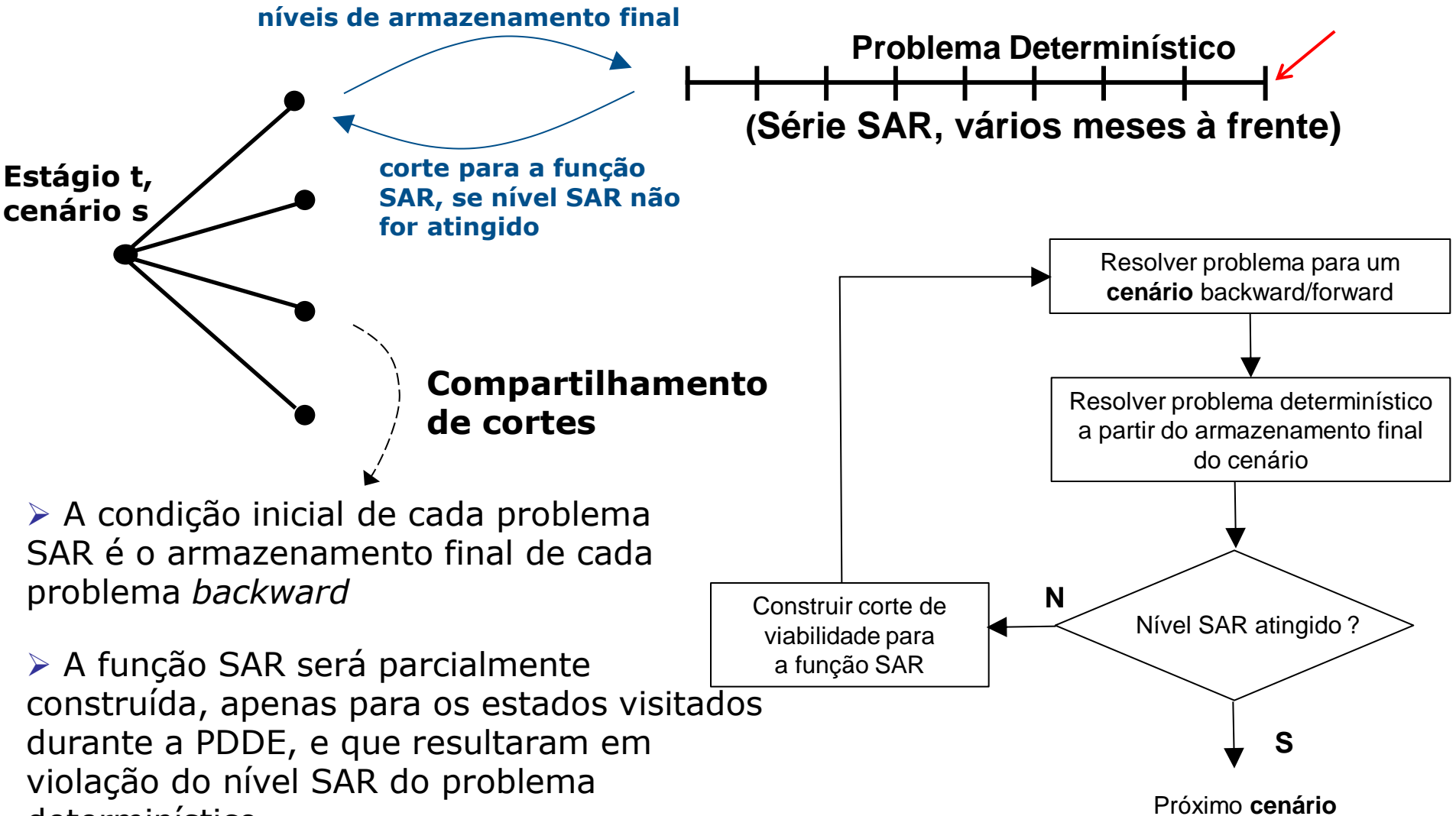
- É uma forma mais acurada do que a CAR de estabelecer níveis mínimos seguros para energia armazenada nos subsistemas
 - Leva em consideração a operação interligada dos subsistemas ao invés de utilizar níveis individuais mensais para cada subsistema
 - Pode ser construída de forma iterativa, ao longo da resolução do problema de planejamento de médio prazo (NEWAVE)
 - É uma extensão, para o caso multivariado, das restrições de armazenamento mínimo de energia nos subsistemas

Ex:



MODELAGEM IMPLÍCITA DA SAR NO MODELO NEWAVE

RECURSÃO BACKWARD e FORWARD



➤ A condição inicial de cada problema SAR é o armazenamento final de cada problema *backward*

➤ A função SAR será parcialmente construída, apenas para os estados visitados durante a PDDE, e que resultaram em violação do nível SAR do problema determinístico

Série Hidrológica SAR

- ***Não condicionada***
 - **Série histórica ou %MLT**
 - **A mesma série hidrológica será utilizada para todos os estados da forward e para todos estados e cenários da backward**
- ***Condicionada***
 - **Geração condicionada aos valores de afluências passadas (previsão condicionada)**
 - **Em cada estado e cenário da simulação backward e forward, um cenário hidrológico diferente é considerado no problema SAR**

SUBPROBLEMA PARA CONSTRUÇÃO DA FUNÇÃO SAR

$$\beta(ea_i^\tau) = \min_{z, ea, gh, gt, f} \sum_{\tau=t+1}^T \sum_{i=1}^{NSIS} z_i^\tau$$

Corte de carga

s.a.

$$\left\{ \begin{array}{l} ea_i^{\tau+1} + gh_i^\tau = ea_i^\tau + EAF_i^\tau, \\ gh_i^\tau + gt_i^\tau + \sum_{j \in \Omega_i} (f_{j,i}^\tau - f_{i,j}^\tau) + z_i^\tau = D_i^\tau, \\ ea_i^T \geq \text{Nível SAR}_i^T \\ z^\tau, ea^\tau, gh^\tau, gt^\tau, f^\tau \geq 0, \\ gt^\tau \leq gt_{\max}^\tau \end{array} \right.$$

$$\begin{array}{l} i = 1, \dots, NSIS, \\ \tau = t + 1, \dots, T, \end{array}$$

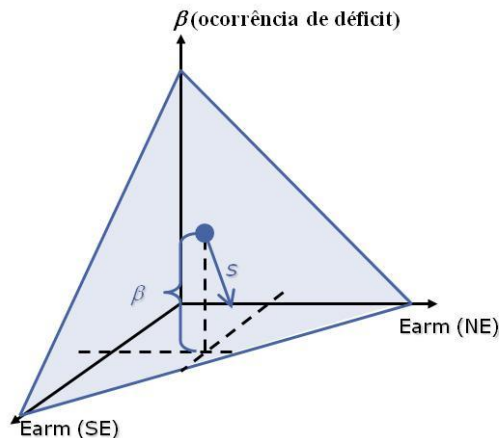
SUBPROBLEMA DO NEWAVE (backward/forward)

$$\min_{x^t, \alpha_{t+1}} (c^t)^\top x^t + p_{SAR} \Delta_{SAR} + CF_{t+1} \longrightarrow \text{Custos presente + futuro}$$

$$s.a. \begin{cases} A_t x^t = b^t - E x^{t-1} \\ CF_{t+1} \geq \varpi_\ell + (\pi^\ell)^\top x^t, \quad \ell = 1, \dots, \Lambda \\ \beta(ea^{t+1}) + \Delta_{SAR} \geq 0 \\ x^t \geq 0, \end{cases}$$

Balanço Hídrico
 Atendimento à Demanda
 Metas de Desvio
 Limites de Variáveis
 etc.

Cortes de Benders - Função Custo Futuro

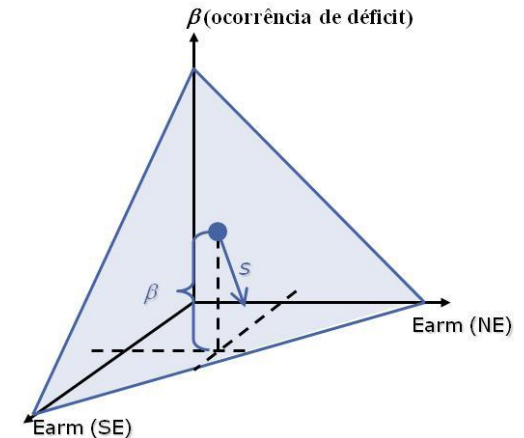


Representação da função SAR

Função SAR

- Série hidrológica SAR não condicionada
 - Função SAR é uma função **multivariada** dos *armazenamentos finais*

$$\sum_{isis=1}^{nsis} \pi_{VS,t+1}^{isis,irsar} EARM_{t+1}^{isis} + \Delta_{SAR,t+1}^{irsar} \geq RHSS_{t+1}^{irsar}$$

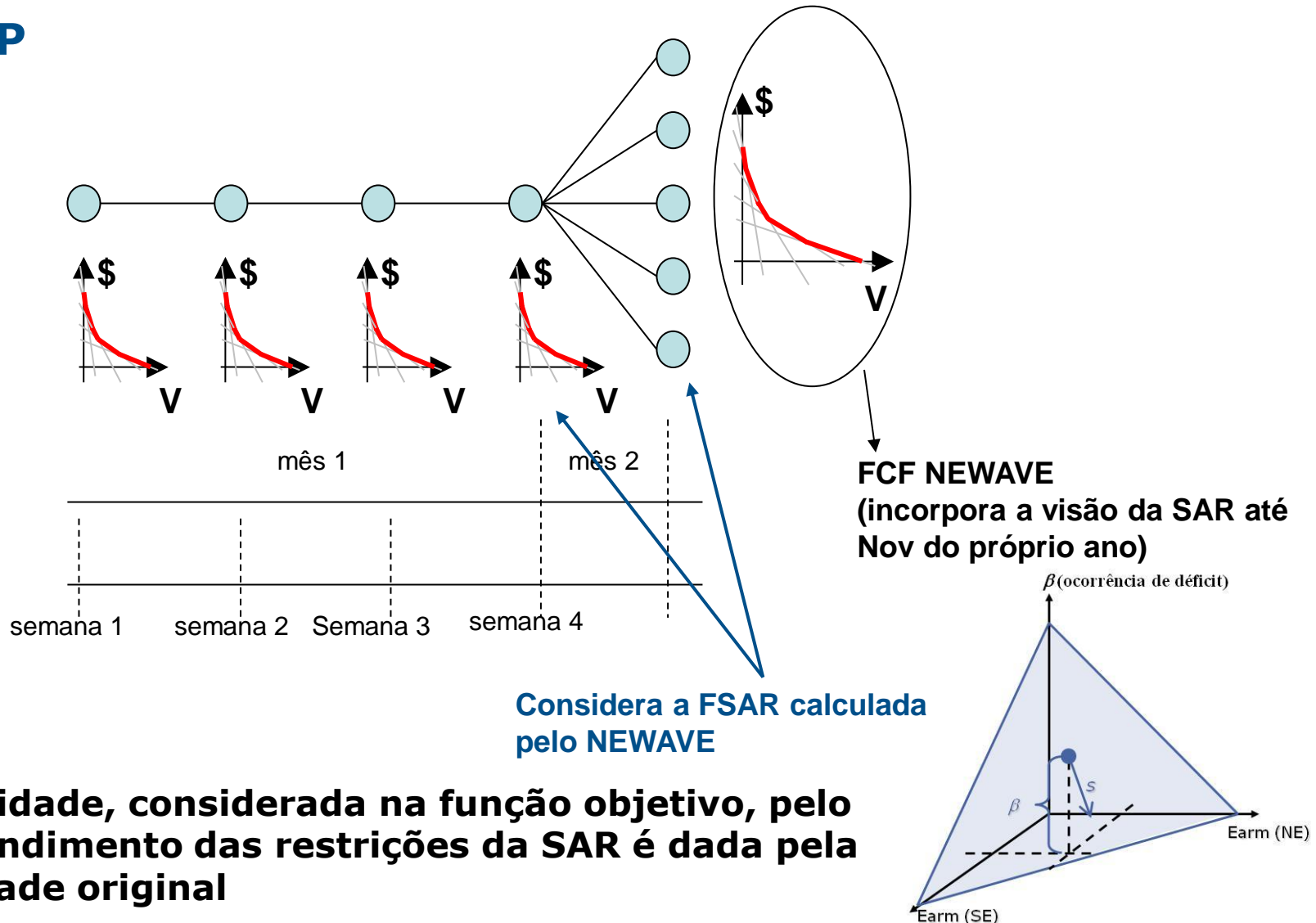


- Série hidrológica SAR condicionada
 - Função SAR é uma função **multivariada** dos *armazenamentos finais* e das *afluências passadas*

$$\sum_{isis=1}^{nsis} \pi_{VS,t+1}^{isis,irsar} EARM_{t+1}^{isis} + \Delta_{SAR,t+1}^{irsar} \geq RHSS_{t+1}^{irsar} + \sum_{isis=1}^{nsis} \sum_{j=1}^p \pi_{ASj,t+1}^{isis,irsar} EAF_{t+1-j}^{isis}$$

MODELAGEM DA SAR NO MODELO DECOMP

DECOMP



A penalidade, considerada na função objetivo, pelo não atendimento das restrições da SAR é dada pela penalidade original

Considera a FSAR calculada pelo NEWAVE

**FCF NEWAVE
(incorpora a visão da SAR até Nov do próprio ano)**

CVaR

Valor Condicionado a um dado Risco

Uso de Variáveis Artificiais

A.B. Philpott, V.L. Matos, “Dynamic sampling algorithms for multi-stage stochastic programs with risk aversion”, Eur. J. Oper. Res, v. 218, 470-483, 2012 (Technical report presented on Optimization Online in Dec. 2010).

A. Shapiro, W. Tekaya, “Report for technical cooperation between Georgia Institute of Technology and ONS – Operador Nacional do Sistema”, Technical Report, Georgia Institute of Technology, 2011.

Abordagem Direta

A.L.Diniz, M.P. Tcheou, M.E.P. Maceira, “Uma abordagem direta para consideração do CVAR no problema de planejamento da operação hidrotérmica” XII SEPOPE - Symp. of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning, Maio 2012.

Abordagem Direta adotada em outros trabalhos publicados posteriormente

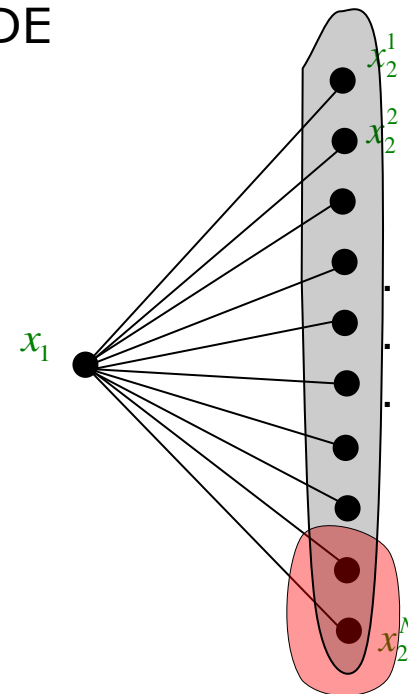
A. Shapiro, W. Tekaya, J.P. Costa, M.P. Soares, “Risk neutral and risk averse Stochastic Dual Dynamic Programming method”, Eur. J. Oper.Res., v.224, n.2, pp. 375-391, Jan. 2013.

A.B. Philpott, V.L. Matos, E.C. Finardi, “On solving multistage stochastic programs with coherent risk measures”, Optimization Online, Aug. 2012

- Visa incorporar o custo dos cenários mais críticos no cálculo da política de operação, de forma conjunta com a minimização do valor esperado
 - Proteção para um determinado nível de risco (α)
 - Pode ser aplicada diretamente no algoritmo de PDDE utilizado nos modelos NEWAVE e DECOMP
 - Parâmetros: λ , α

Formulação Matemática para o Problema de 2 Estágios

$$\min_{x_1} \left[c_1 x_1 + \underbrace{(1-\lambda)}_{\text{Peso para o valor esperado}} E \left[\min_{x_2} c_2 x_2 \right] + \underbrace{\lambda}_{\text{Peso para o CVaR}} \underbrace{CVaR}_{\text{Nível de proteção } \alpha} \left[\min_{x_2} c_2 x_2 \right] \right]$$



Formulação Matemática para o Problema Multi-estágios

$$\min_{x_1} c_1 x_1 + (1 - \lambda_2) E[(*)_2]$$

$$\min_{x_2} c_2 x_2 + (1 - \lambda_3) E[(*)_3]$$

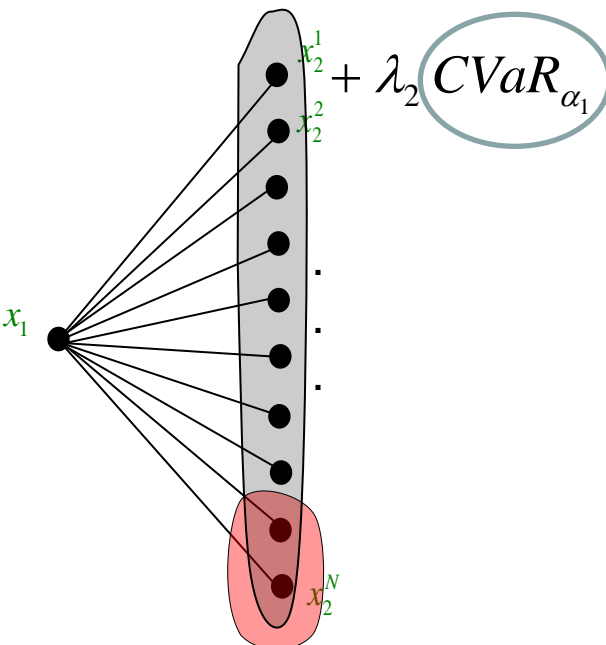
$$\min_{x_3} c_3 x_3 + (1 - \lambda_4) E[(*)_4]$$

$$+ \lambda_4 CVaR_{\alpha_3} \left[\min_{x_4} c_4 x_4 \right]$$

$[(*)_4]$

$[(*)_3]$

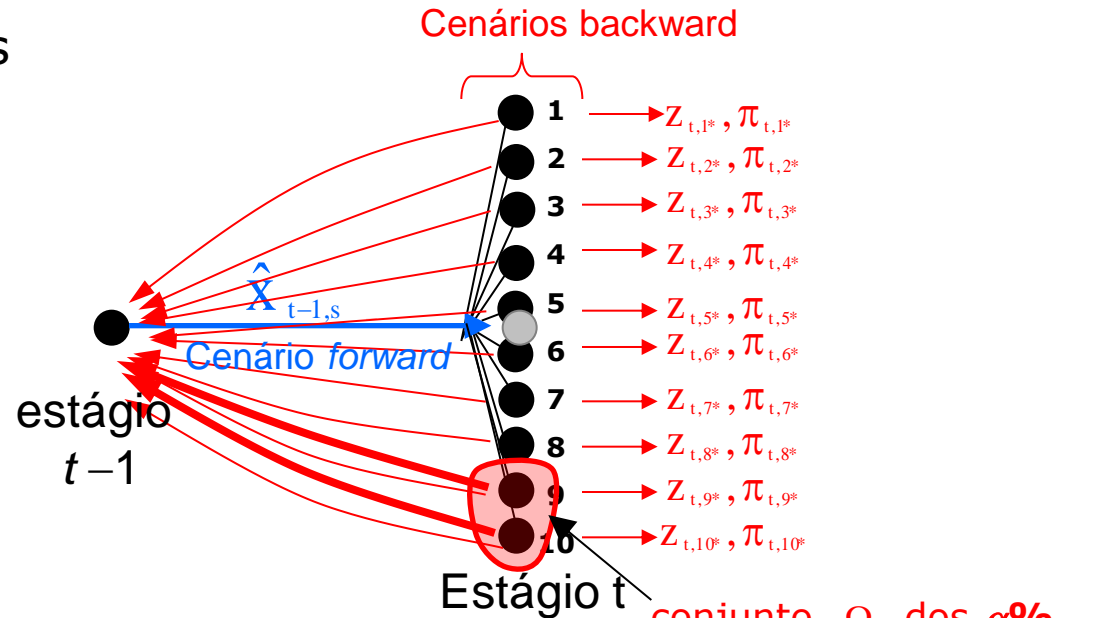
$[(*)_2]$



$$+ \lambda_3 CVaR_{\alpha_2}$$

APLICAÇÃO DIRETA DO CVAR NA PDDE

- resolver os subproblemas para todos os ω cenários backward
- identificar os $\alpha\%$ maiores valores de $z_{t,\omega}$
- Construir cortes levando em consideração tanto o valor esperado como o CVaR

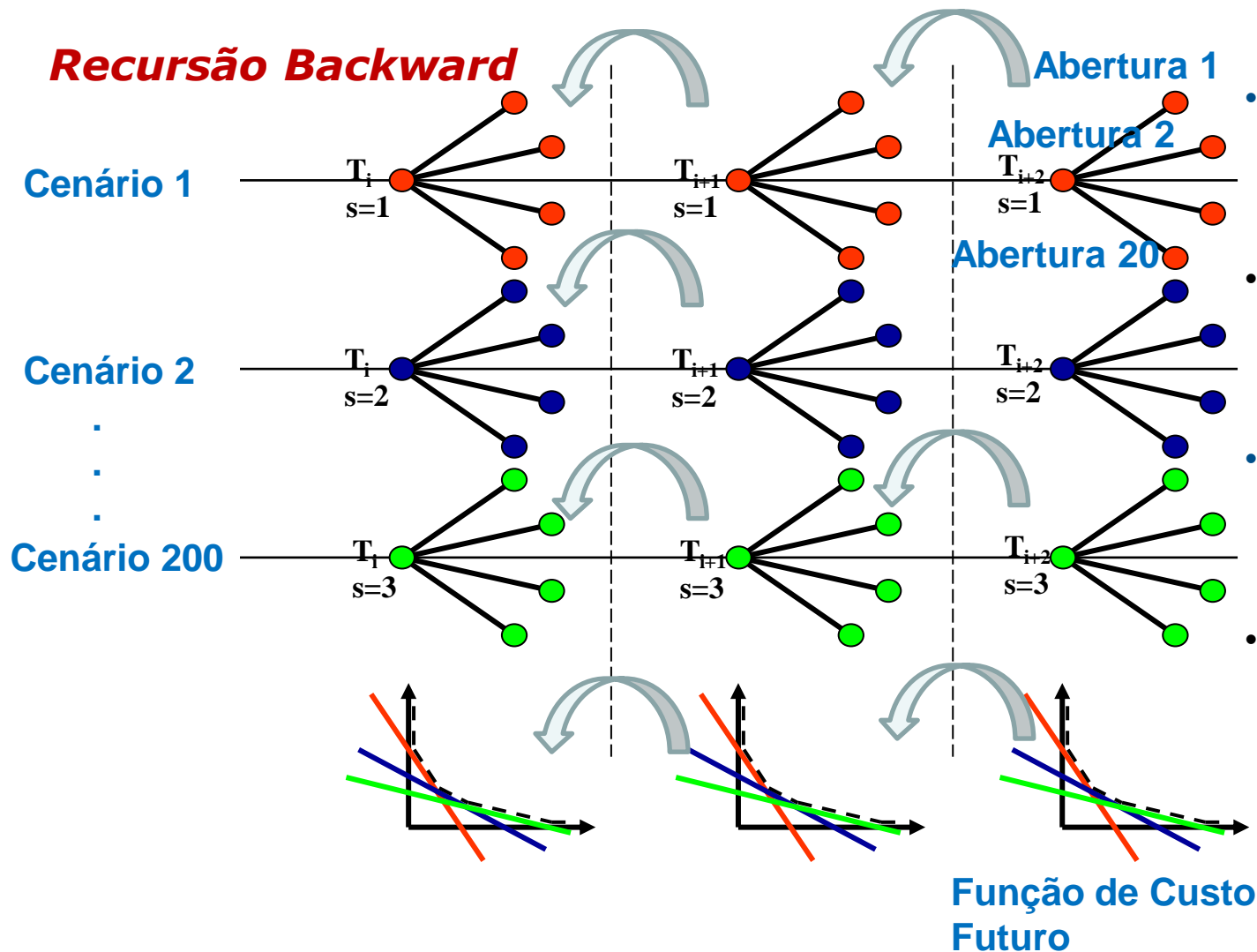


$$\varphi_t(x_{t-1}) \geq (1-\lambda) \sum_{\omega=1}^K p_{\omega} [z_{t,\omega^*} + \langle \pi_{t,\omega^*}, x_{t-1} - \hat{x}_{t-1,s} \rangle] + \left(\frac{\lambda}{\alpha}\right) \sum_{\omega \in \Omega_{\alpha}} p_{\omega} [z_{t,\omega^*} + \langle \pi_{t,\omega^*}, x_{t-1} - \hat{x}_{t-1,s} \rangle] = \bar{z}^* + \langle \bar{\pi}^*, x_{t-1} - \hat{x}_{t-1,s} \rangle$$

NEWAVE

Cálculo da Política de Operação

Recursão Backward

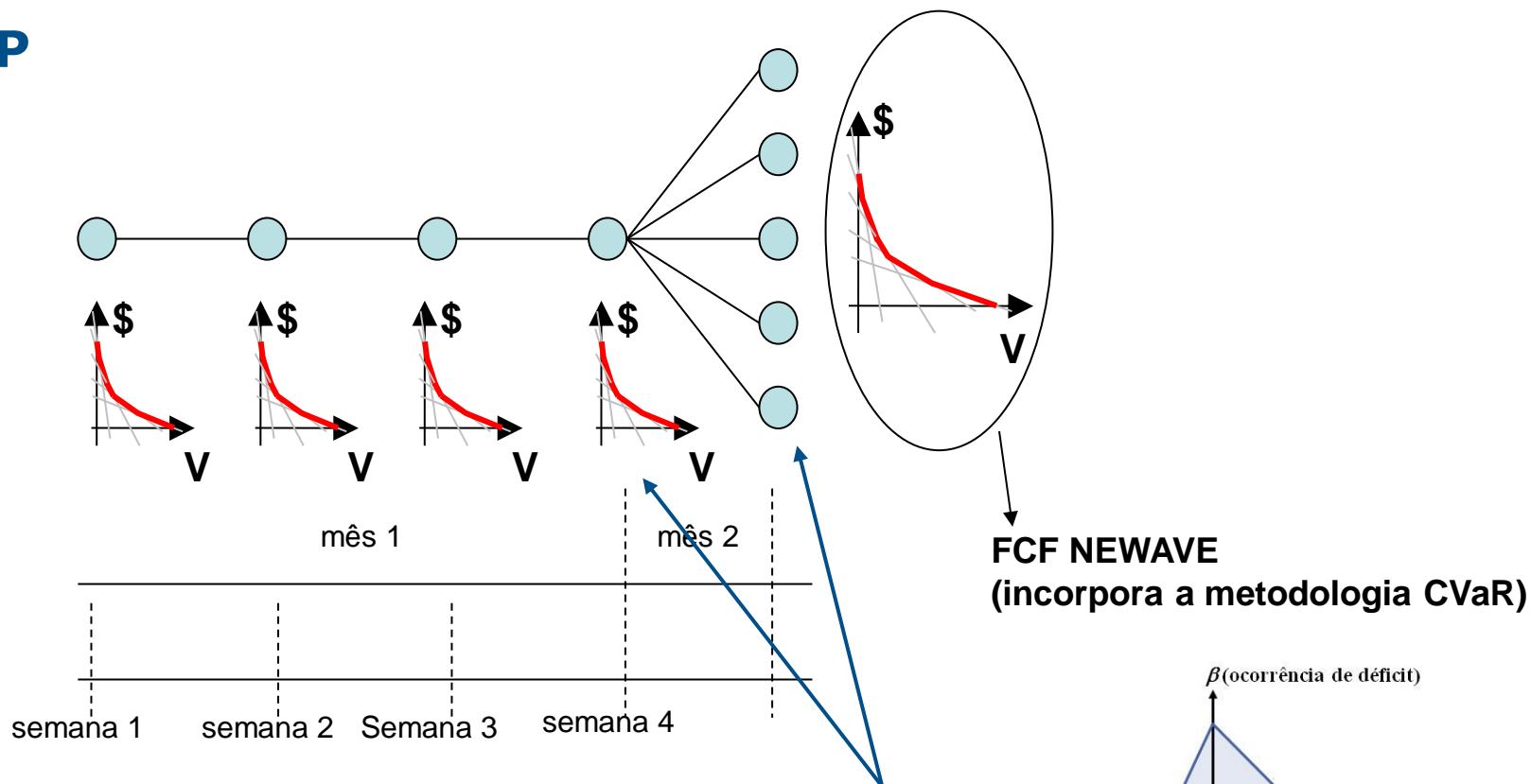


Para cada estado

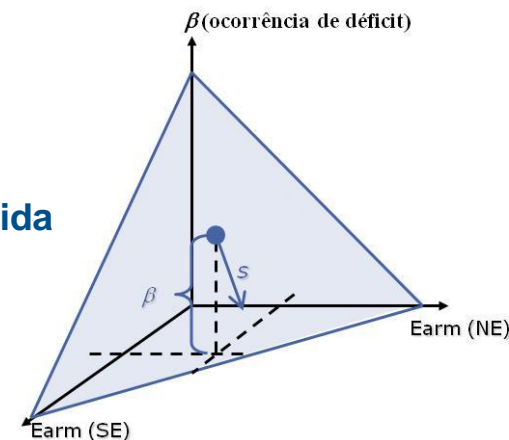
- após a solução dos 20 problemas de despacho de operação
- calcular o valor esperado do custo de operação
- calcular o valor esperado dos $\alpha\%$ problemas mais caros
- calcular o corte de Benders que comporá a *atualização da FCF*, através de uma ponderação (λ) entre os 2 valores esperados

MODELAGEM DO CVaR NO MODELO DECOMP

DECOMP



A metodologia incorporada no NEWAVE é diretamente estendida ao DECOMP



Objetivo da Incorporação de MARs

- **Solução de Compromisso entre Segurança e Custo**

Elementos a serem considerados

- **Geração térmica**
- **Deficits de energia**
- **Nível de armazenamento dos reservatórios**
- **Trajétórias do sistema por armazenamentos muito baixos**
- **CMOs**
- **Vertimento**

Obrigada

newave@cepel.br
decomp@cepel.br



Ministério de
Minas e Energia