

# Desmistificando o REE



A pesquisa que constrói o futuro

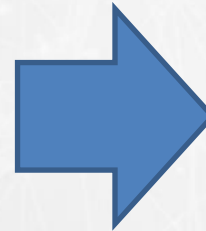
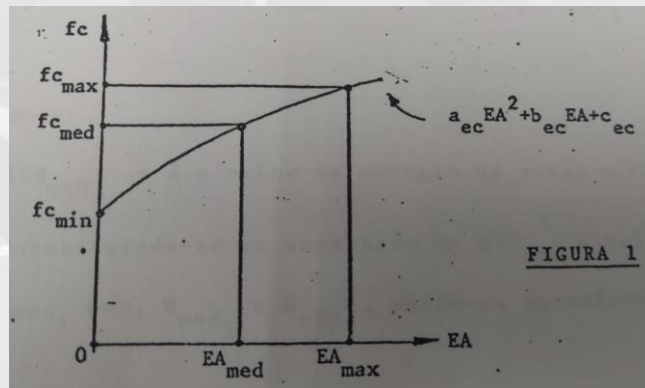
**Workshop do GT Metodologia**  
**13 de dezembro de 2021**

**Equipe NEWAVE**  
**Departamento de Otimização Energética**  
**e Meio Ambiente - DEA**

# Desmistificando o REE

## 1ª Proposta de Modelagem a sistema equivalente, 1980 (Resolução por PDE)

CEPEL 1705/ 80 RELATÓRIO TÉCNICO	Data: 15.02.80 Pag.: 1.1 à 2.80 Âpendice: 06
Autor(es): LESLIE AFRÂNIO TERRY VIDE PREFÁCIO ANEXO	Ref.:
Aprovado: DPST: <i>[Signature]</i> João G.C. Barros LSE: <i>[Signature]</i> Acher Mossê	
Assunto/Título: MODELO A SISTEMA EQUIVALENTE DESCRIÇÃO GERAL	Projeto: 7077



• • •

## Perdas por vertimento em usinas a fio d'água (2012)

**XII SEPOPE**  
May - 20<sup>th</sup> to 23<sup>rd</sup> - 2012  
RIO DE JANEIRO (RJ) - BRASIL

**XII SIMPÓSIO DE ESPECIALISTAS EM PLANEJAMENTO DA OPERAÇÃO E EXPANSÃO ELÉTRICA**  
XII SYMPOSIUM OF SPECIALISTS IN ELECTRIC OPERATIONAL AND EXPANSION PLANNING

**MODELAGEM DA FUNÇÃO DE PERDAS A FIO D'ÁGUA ATRAVÉS DO MARS (MULTIVARIATE ADAPTIVE REGRESSION SPLINES)**

M.P. Tcheou<sup>1</sup>, R.N. Cabral<sup>1</sup>, D.D.J. Penna<sup>1</sup>, V.S. Duarte<sup>1</sup>, M.E.P. Maceira<sup>1,2</sup>

## Acoplamento hidráulico (2011,2017)

17<sup>th</sup> Power Systems Computation Conference  
Stockholm Sweden - August 22-26, 2011

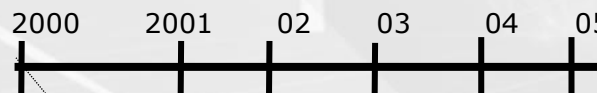
**AN APPROACH TO CONSIDER HYDRAULIC COUPLED SYSTEMS IN THE CONSTRUCTION OF EQUIVALENT RESERVOIR MODEL IN HYDROTHERMAL OPERATION PLANNING**

M.E.P.Maceira<sup>1,2</sup>, V.S.Duarte<sup>1</sup>, D.D.J.Penna<sup>1</sup>, and M.P.Tcheou<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Electric Energy Research Center (CEPEL), <sup>2</sup>State University of Rio de Janeiro (UERJ)  
Rio de Janeiro, Brazil

**XXIV SNTPEE**  
Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica  
22 a 25 de outubro de 2017  
Curitiba - PR

**PROPOSTA DE UMA NOVA FUNÇÃO DE ACOPLAMENTO HIDRÁULICO ENTRE RESERVATÓRIOS EQUIVALENTES EM PROBLEMAS DE PLANEJAMENTO HIDROTÉRMICO DE MÉDIO PRAZO**

Pedro Souza Simon<sup>1(\*)</sup>, André Luiz Diniz<sup>1,2</sup>, Cesar Luis Vilasboa de Vasconcelos<sup>1</sup>, Débora Dias Jardim Penna<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica  
<sup>2</sup>UERJ - Universidade do Estado do Rio de Janeiro

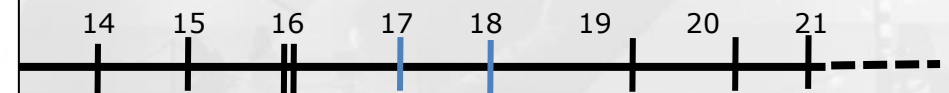


4 REEs

**XXII SNTPEE**  
Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica  
13 a 16 de Outubro de 2013  
Brasília - DF

**REPRESENTAÇÃO DE SUBSISTEMAS E SUBMERCADOS DE FORMA DIFERENCIADA NO PLANEJAMENTO DA OPERAÇÃO HIDROTÉRMICA**

M.I.Ennes<sup>1,2(\*)</sup> D.D.J.Penna<sup>1</sup> M.E.P.Maceira<sup>1,3</sup> A.L.Diniz<sup>1,3</sup> C.V.Vasconcelos<sup>1,2</sup>



9 REEs

12 REEs



# Desmistificando o REE

- ✓ *Contextualização: Motivação histórica para a modelagem por REE*
- ✓ *Componentes da Modelagem por REE*
- ✓ *Princípios Fundamentais na Modelagem dos REEs*
- ✓ *Consideração dos dados e características individuais das usinas na modelagem do REE*
- ✓ *Consideração das restrições individuais para as usinas na modelagem do REE*

# Contextualização

# Motivação para a modelagem por REEs

Os aspectos que motivaram a modelagem por REEs, e que se mantêm até hoje (pelo menos em parte do horizonte) relacionam-se com a complexidade do problema de otimização:

- **Horizonte de estudo** (10-30 anos) devido à regularização plurianual dos reservatórios
- **Representação das incertezas** => com dependência temporal de vários lags
- **Produtividade variável (não linear)** das UHEs com altura de queda
- **Grande Porte** (2001: 107 UHEs => 2020: 160 UHEs)

➔ Problema **estocástico, não linear, acoplado no espaço/tempo**, de **grande porte**

Modelo com **processo de validação minucioso**:

- representação das características e restrições das UHEs no cálculo da política operativa
- acurácia estatística na modelagem dos cenários
- avaliação dos requisitos teóricos e convergência da PDDE à solução ótima
- Tratamento de inviabilidades quanto ao atendimento e custo (CMO)
- análise dos resultados de simulação da política
- reprodutibilidade dos resultados

# Como o NEWAVE trata atualmente cada uma desses fatores de complexidades?

Fator	Tratamento
<i>Horizonte</i>	Por enquanto, mantido (PMO: 10 anos, PDE e LEILÃO: 20 anos)
Representação das Incertezas	<b>Não pode ser ignorada</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Aplicação de técnicas de <b>clusterização</b> (amostragem seletiva) para representar o processo estocástico tão melhor quanto possível com uma quantidade tratável de cenários</li><li>• Quantidade limitada de cenários é compatível com representação mais agregada das incertezas</li></ul>
Grande porte (usinas individualizadas + Restrições Operativas individuais)	<b>Não podem ser ignoradas</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• todos os dados, características e restrições operativas são informadas <b>de forma individualizada</b></li><li>• <b>Agregação das usinas em REEs levando em consideração diversas características e restrições operativas individuais para as usinas hidrelétricas</b></li><li>• modelo de geração de energias afluentes por REE tem com base o <b>histórico individualizado</b> de afluências às usinas hidrelétricas; 2017: Primeira versão do NEWAVE híbrido (individualizado nos primeiros 6 meses)</li></ul>
Produtividade Variável com altura de queda	<b>Não pode ser ignorada, principalmente no cálculo da política operativa</b> (construção da FCF) <ul style="list-style-type: none"><li>• <b>Consideração da variação não linear da produtividade com altura de queda, a partir de funções construídas a partir dos dados individuais para as usinas</b></li></ul>

**Aumento na penetração de fontes intermitentes:** importante incluir, no cálculo da política, o impacto da curva de carga líquida horária e restrições horárias de operação das usinas térmicas



# Componentes da Modelagem por REE

# Componentes da Modelagem por REE

Quais **características** das usinas hidrelétricas são representados através do REE?

- *Vazões naturais afluentes*
- *Capacidade de armazenamento*
- *Vertimentos em usinas a fio d'água*
- *Geração Hidráulica Máxima*
- *Evaporação*



Procura-se modelar esses aspectos na construção da REE de forma o mais fidedigna possível, a partir dos **dados individualizados** das usinas e observando-se as especificidades da operação individualizada



# Componentes da Modelagem por REE

Quais **restrições operativas individuais** das usinas hidrelétricas devem ser representados de maneira equivalente através do REE?

- Níveis operativos mínimos para os reservatórios
- Retirada de água para outros usos
- Vazões defluentes mínimas
- geração mínima operativa
- restrições elétricas internas ao REE

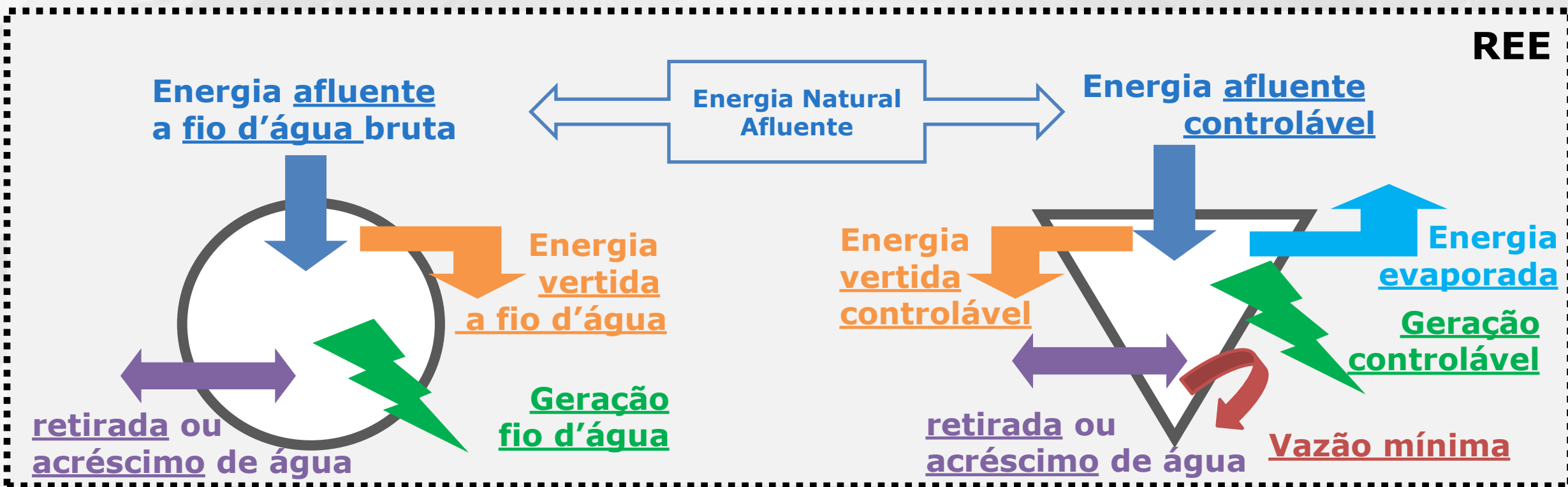


- Todos os dados das restrições são **informados de forma individualizada**
- o NEWAVE modela essas restrições em termos de energia, de forma variável com o estado do sistema (nível de armazenamento)



# Componentes da Modelagem por REE

## Principais componentes da Modelagem de um REE

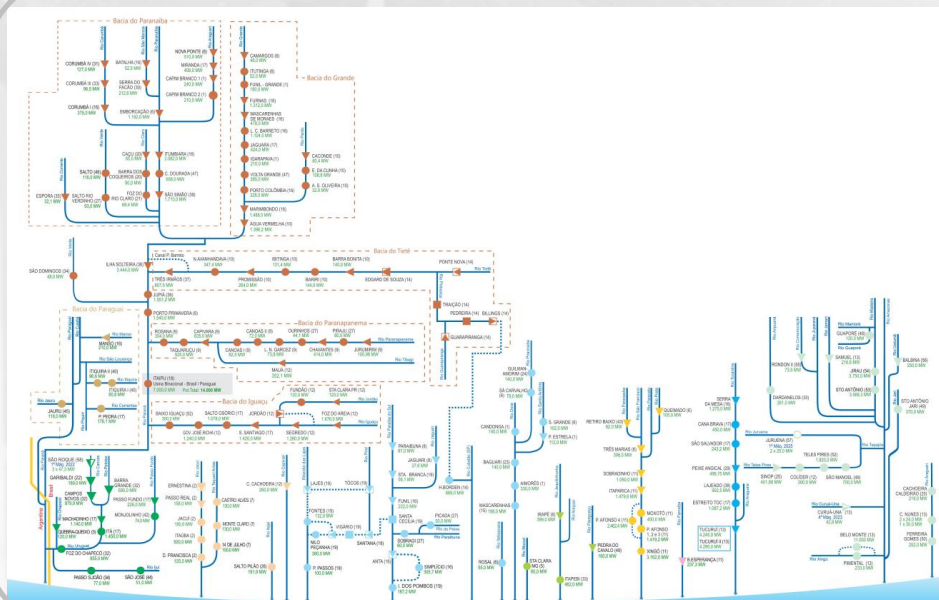


# Princípios Fundamentais da Modelagem dos REEs

# Modelagem por REE: Conceitos básicos

**Há 4 princípios fundamentais na construção dos REEs a partir dos dados e restrições individuais das usinas hidrelétricas**

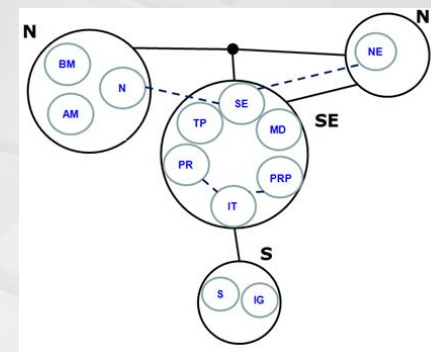
- **Localização da usina na cascata**
- **Controlabilidade da vazão afluente** (regularização mensal ou diária/semanal)
- **Produtividade variável** com a altura de queda líquida
- **Mudanças na configuração** ao longo do tempo: um modelo de REE por período



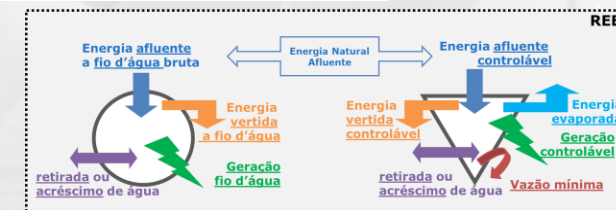
Dados **por usina**



Restrições operativas **por usina**



Divisão em 12 REEs



Modelagem de cada REE



# Princípios fundamentais da modelagem por REE

## Localização da Usina na Cascata

### A mesma vazão ( $m^3/s$ ) tem impacto diferente com a localização da usina na cascata

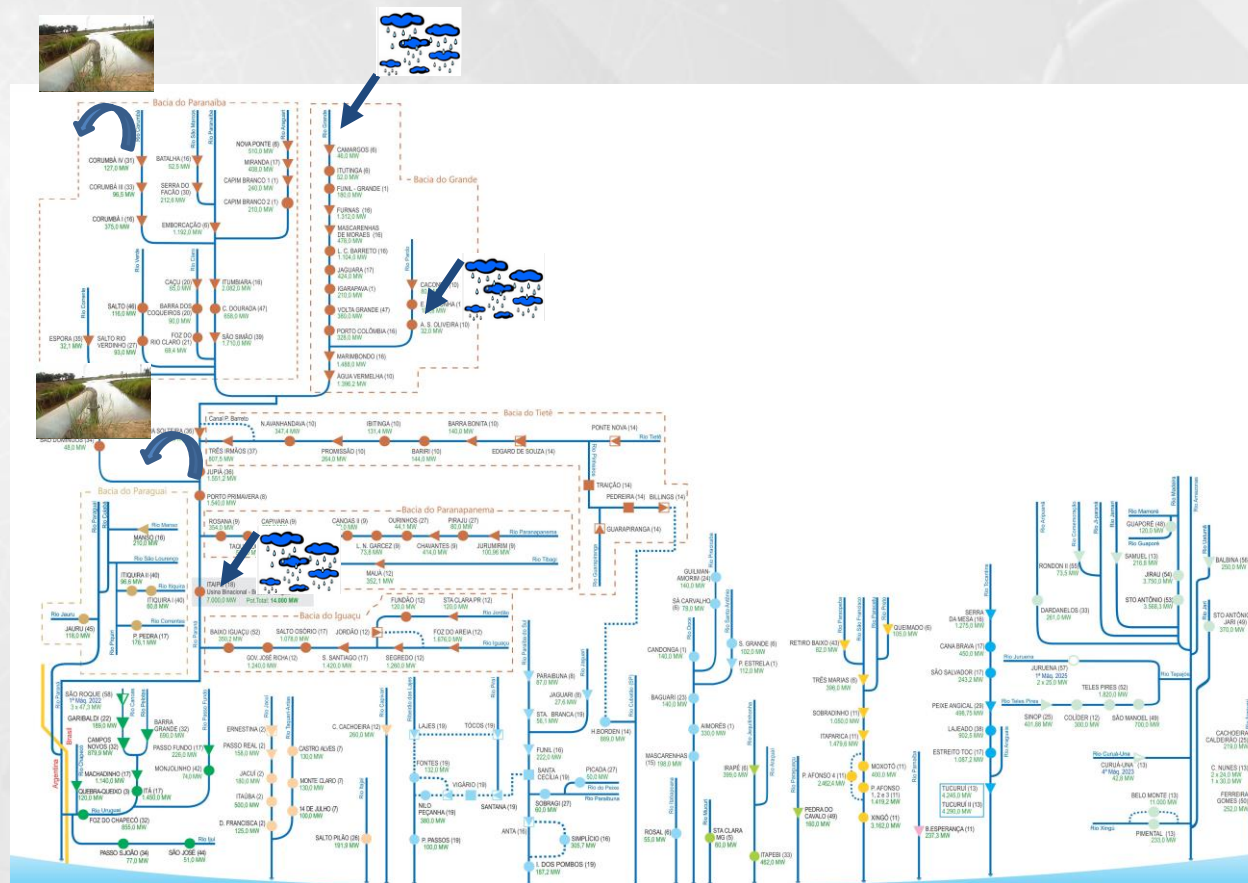
- dados históricos para cálculo da ordem e parâmetros do modelo de geração de cenários são tratados por usina hidrelétrica, para cálculo da energia afluente ao REE

➔ **afluências à montante** são mais favoráveis (> **energia afluente**)



- retiradas de água nos reservatórios são lidas por usina individualizada

➔ **Retiradas à jusante** são mais favoráveis (< **energia retirada**)

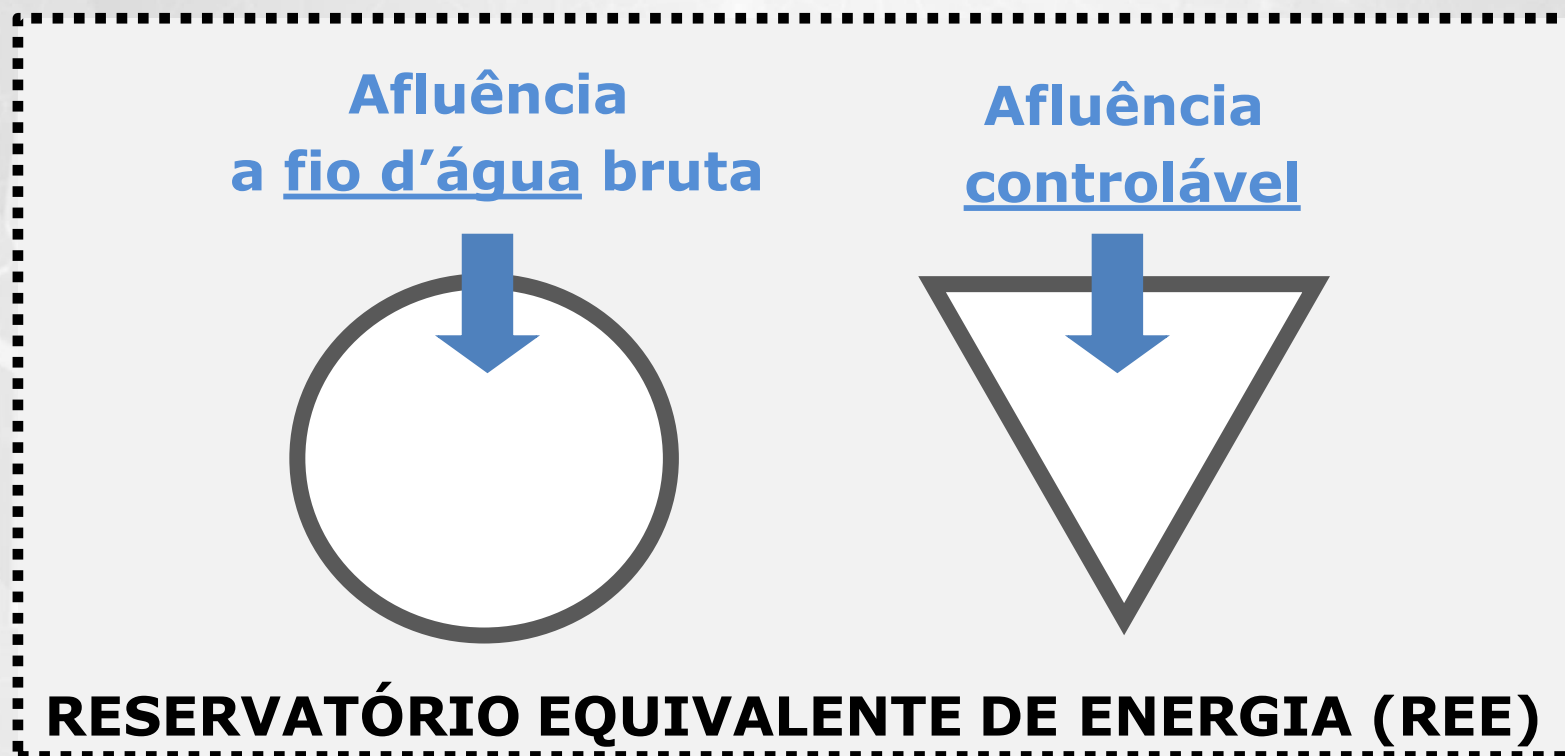


Fonte: ONS (adaptação)

# Controlabilidade da Vazão Afluente (1/6)

**Parte da energia afluente precisa ser utilizada imediatamente (no mesmo mês)**

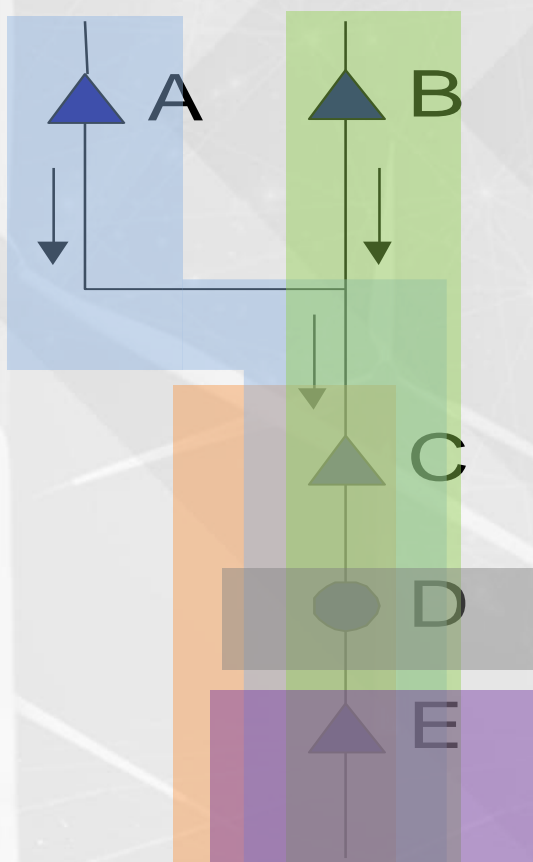
➔ **Estratégia:** dividir a energia afluente em controlável (pode ser armazenada) e a fio d'água (precisa virar geração ou vertimento)



# Controlabilidade da Vazão Afluente (2/6)

**Parte da energia afluente precisa ser utilizada imediatamente (no mesmo mês)**

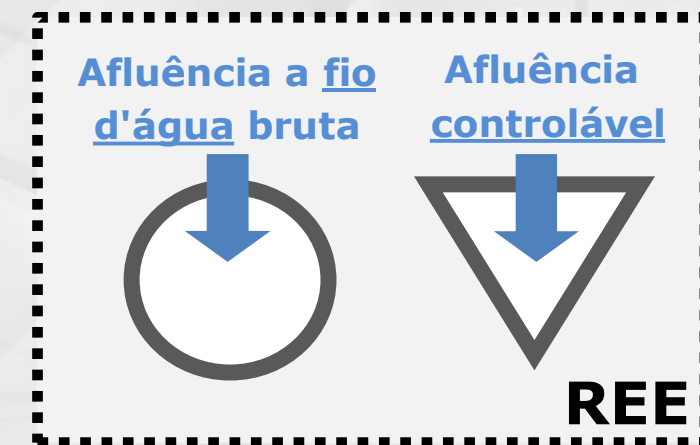
➔ Baseado no registro histórico **individualizado** de afluências, calcula-se **a participação média da energia controlável na energia afluente total**, por regressão linear (mínimos quadrados).



$$\begin{aligned}
 EC\_HIST = & QINC_A (H_A \rho_A + H_C \rho_C + h_D \rho_D + H_E \rho_E) + \\
 & QINC_B (H_B \rho_B + H_C \rho_C + h_D \rho_D + H_E \rho_E) + \\
 & QINC_C (H_C \rho_C + h_D \rho_D + H_E \rho_E) + \\
 & QINC_E (H_E \rho_E)
 \end{aligned}$$

$$EFIO\_HIST = QINC_D (h_D \rho_D)$$

$$ENA\_HIST = EC\_HIST + EFIO\_HIST$$

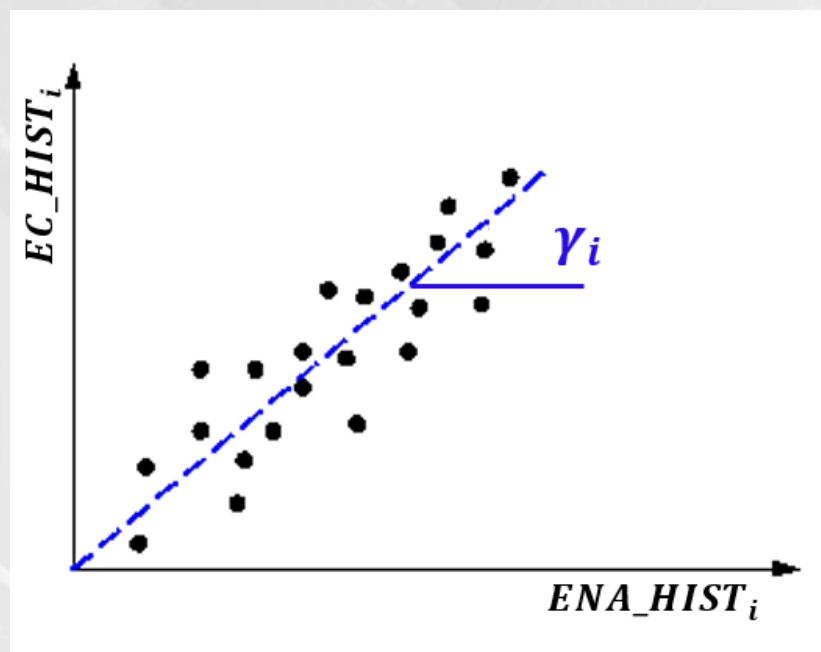


# Controlabilidade da Vazão Afluente (3/6)

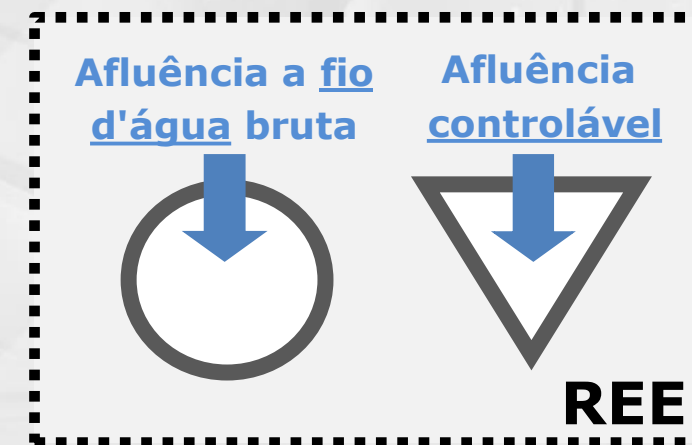
**Parte da energia afluente precisa ser utilizada imediatamente (no mesmo mês)**



Baseado no registro histórico **individualizado** de afluências, calcula-se **a participação média da energia controlável na energia afluente total**, por regressão linear (mínimos quadrados).



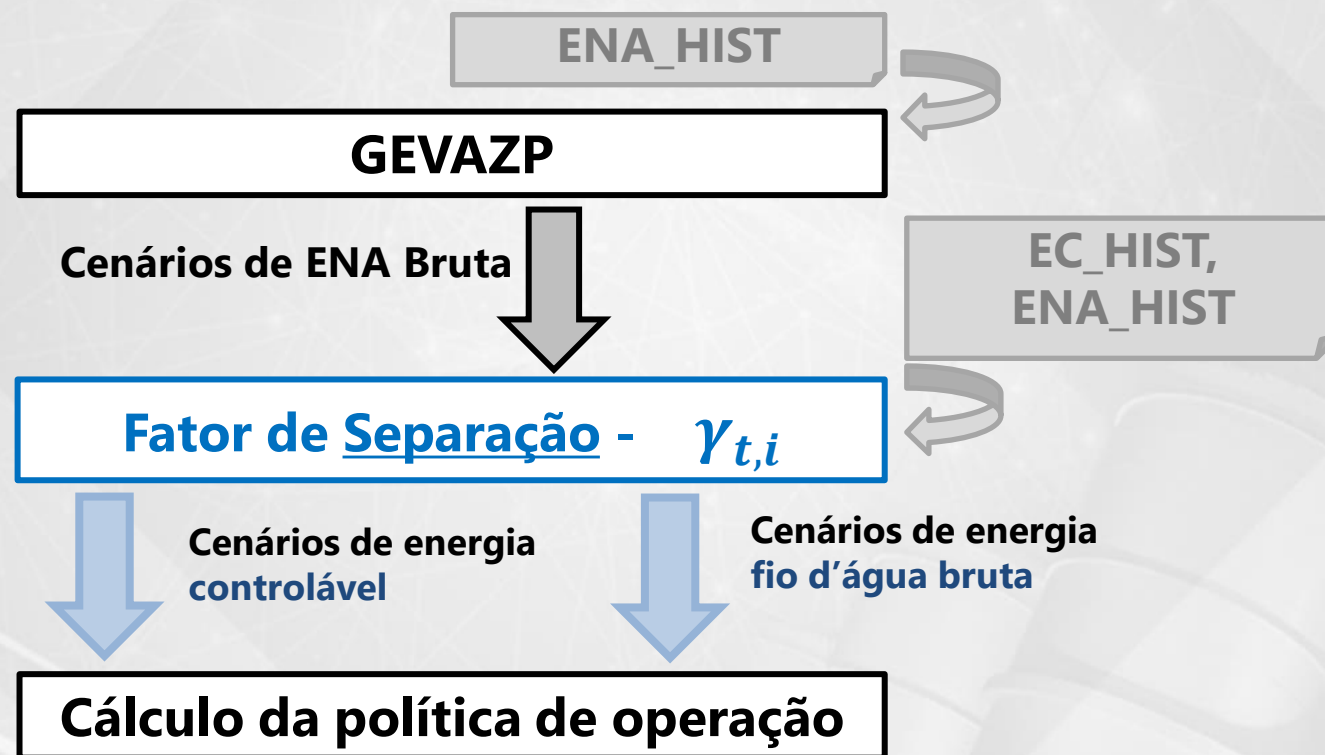
$$\gamma_i = \frac{\sum_{h=1}^n EC\_HIST_{h,i} \cdot ENA\_HIST_{h,i}}{\sum_{h=1}^n (ENA\_HIST_{h,i})^2}$$





# Controlabilidade da Vazão Afluyente (4/6)

## Geração de Cenários de Energias Afluentes (ENAs)



Os fatores  $\gamma_{t,i}$  de energia controlável são aplicados sobre os valores de ENA gerados nos cenários

# Controlabilidade da Vazão Afluente (5/5)

## Aplicação do fator de Energia Controlável nos valores de ENA

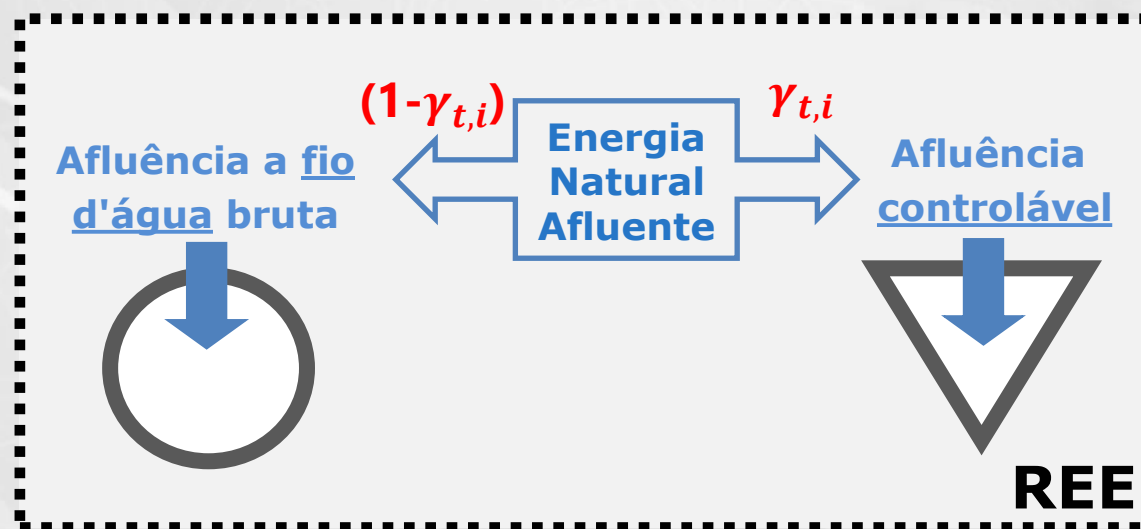
Nos problemas do cálculo da política operativa: [BALANÇO HIDRÍCO CONTROLÁVEL]

$$EARM_{t+1,i} + \sum_{c=1}^{NPMC} GHC_{t,i,c} + EVERT_{t,i} + DSV C_{t,i}$$

$$= fdin_{t,i} \cdot earm_{t,i} + fc_{t,i}(earm_{t,i}) \cdot \gamma_{t,i} \cdot ENA_{t,i} - evap_{t,i}(earm_{t,i}) - EVM_{t,i}$$

Nos problemas do cálculo da política operativa: [BALANÇO HIDRÍCO FIO D'ÁGUA]

$$GFIO L_{t,i} + PFIO_{t,i} = (1 - \gamma_{t,i}) \cdot ENA_{t,i} + DSV F_{t,i}$$



## Produtividade Variável com a altura de queda

- Ao agregar todos os dados e restrições das usinas (em  $hm^3$  ou  $m^3/s$ ) em energia por REE, a consideração da variação da produtividade com a altura de queda parte da **premissa básica** de **operação paralela dos reservatórios** em um mesmo REE
- A operação ótima (individualizada) dentro do REE leva, de certa forma, a uma minimização do **"consumo" de água para se atingir a geração total no REE**, o que leva a uma maior geração / deplecionamento de usinas com armazenamentos elevados (> produtividade, > risco de vertimento)



**Favorecimento a uma operação (razoavelmente) em paralelo\* dos reservatórios**

Sob essa premissa, ajustam-se os valores dos **parâmetros/variáveis** calculados em energia por REE **em função do armazenamento do REE**, para representar a produtividade variável com a altura de queda

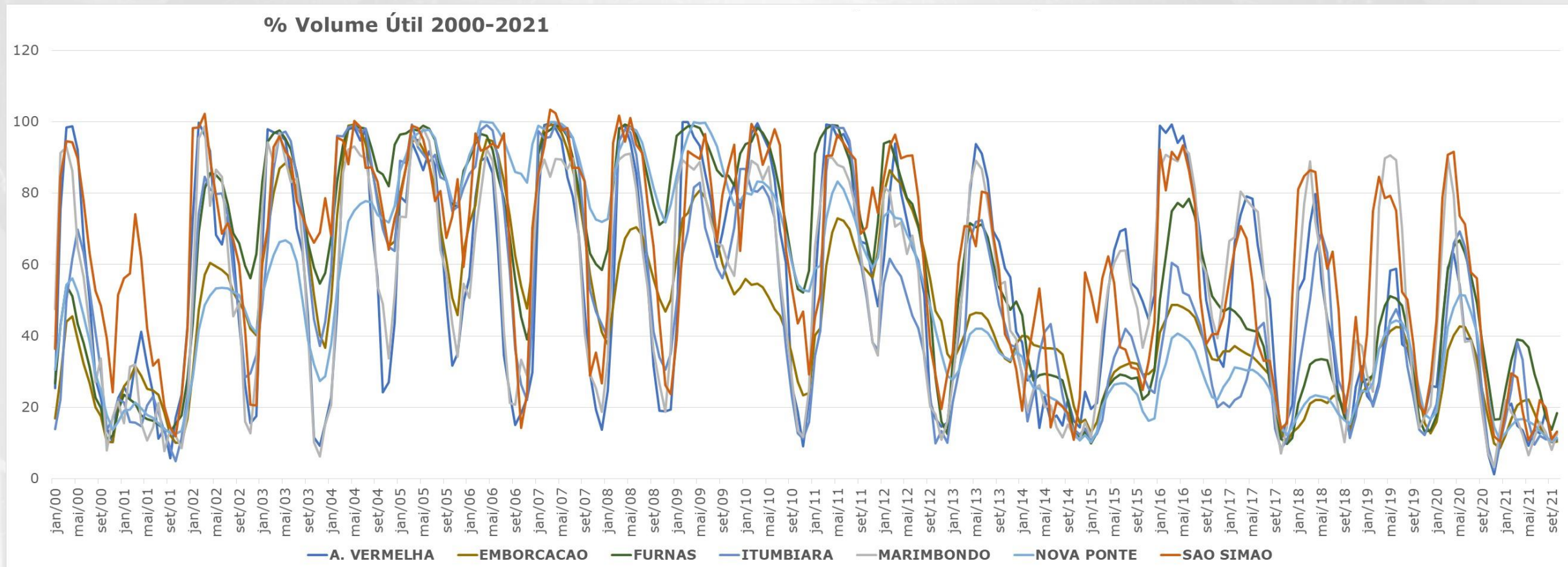
\* Eventuais desvios para cima ou para baixo em alguns reservatórios, não teriam, em princípio, impacto significativo na aproximação

# Produtividade Variável com a altura de queda

## A operação em paralelo se justifica coerente na prática?

REE **Paraná** – Reservatórios com volume útil > 5000 hm<sup>3</sup>

FONTE: Portal SINtegre - ONS



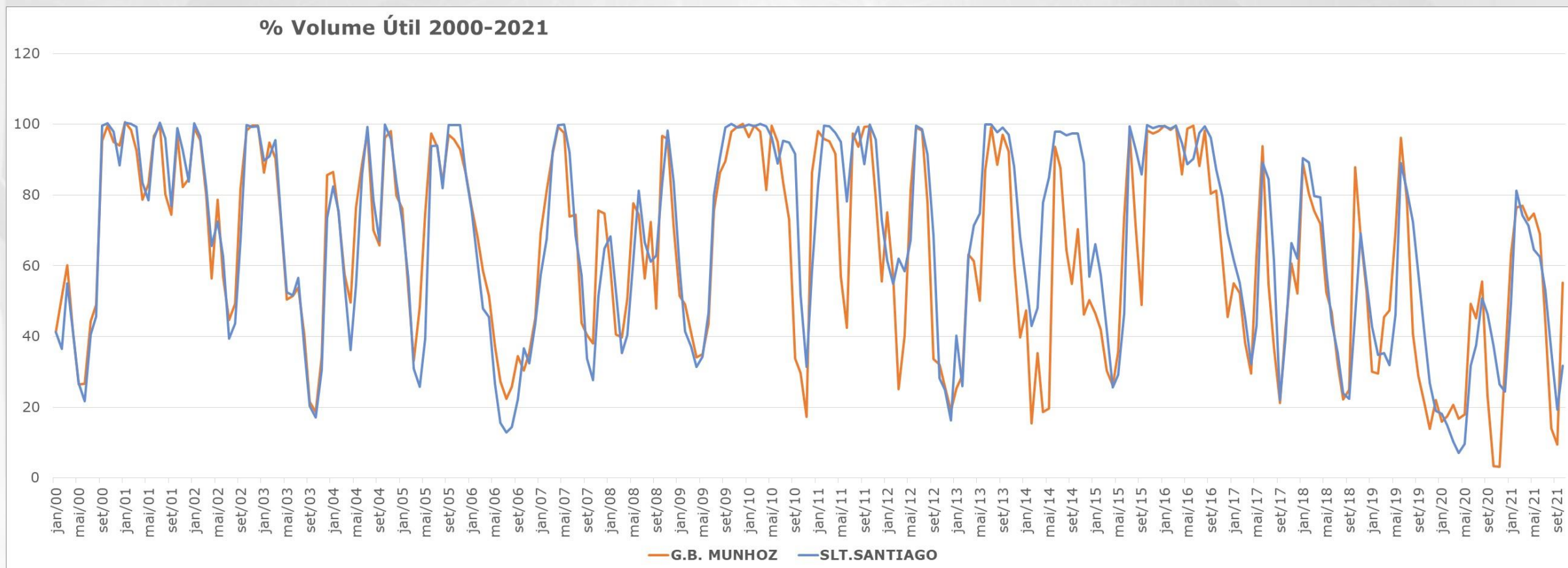


# Produtividade Variável com a altura de queda

## A operação em paralelo se justifica coerente na prática?

REE **Iguaçu** – Reservatórios com volume útil > **1000 hm<sup>3</sup>**

FONTE: Portal SINtegre - ONS

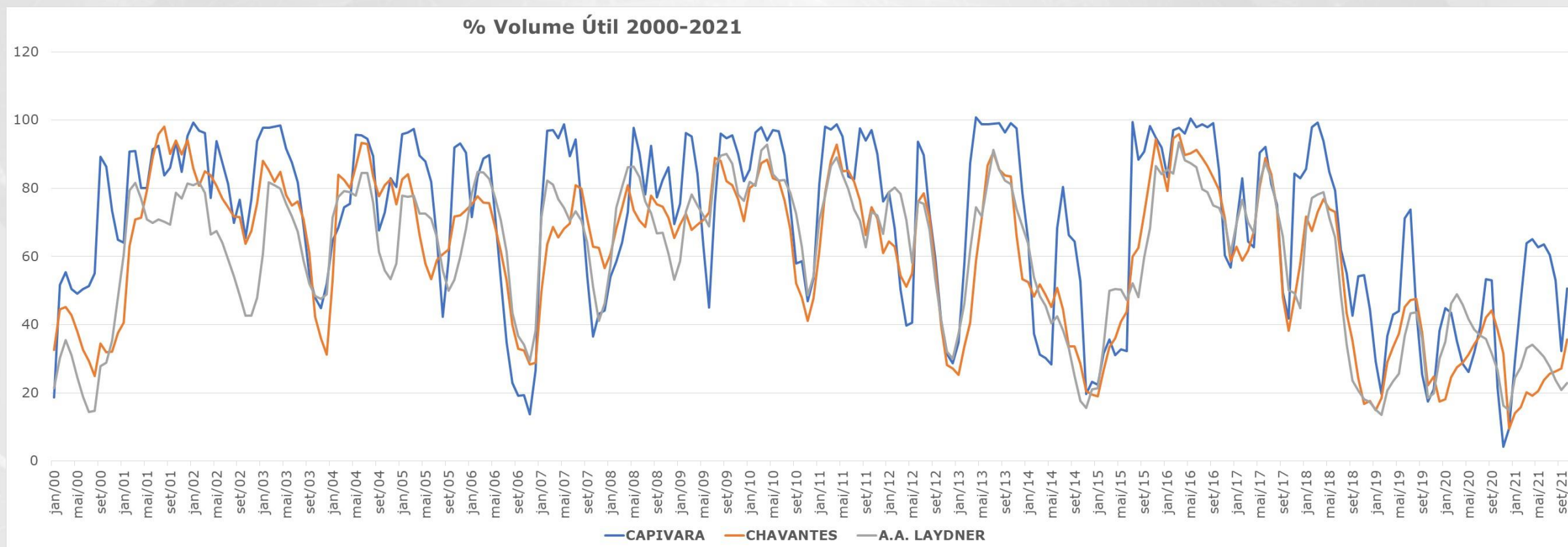


# Produtividade Variável com a altura de queda

## A operação em paralelo se justifica coerente na prática?

### REE Paranapanema – Todos os reservatórios

FONTE: Portal SINtegre - ONS

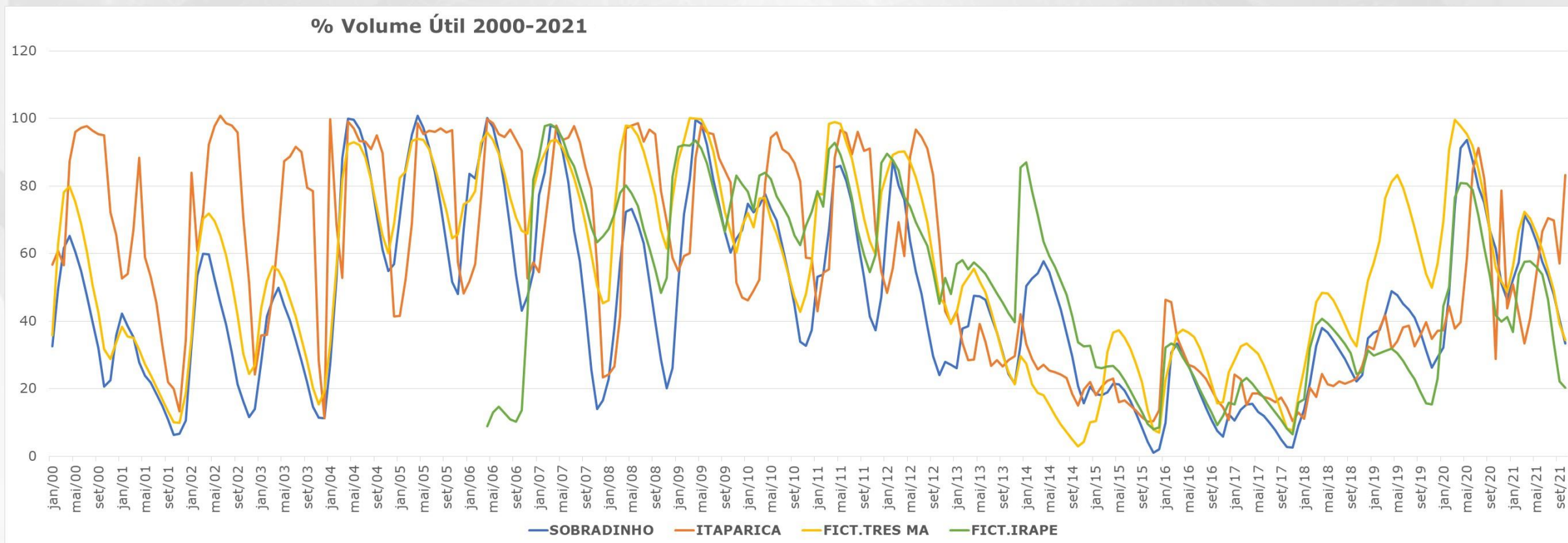


# Produtividade Variável com a altura de queda

## A operação em paralelo se justifica coerente na prática?

REE Nordeste – Reservatórios com volume útil > 2000 hm<sup>3</sup>

FONTE: Portal SINtegre - ONS

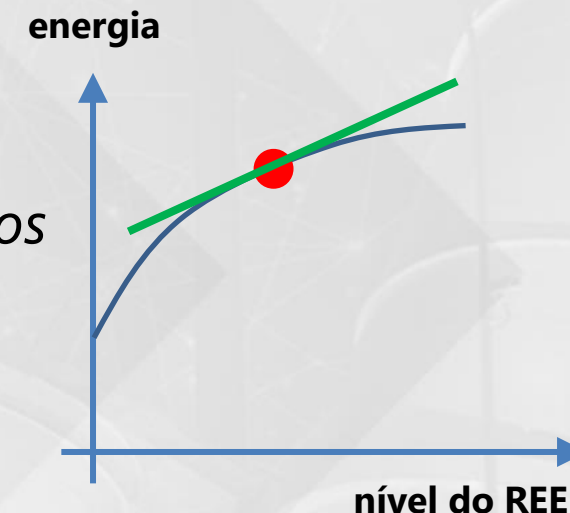




# Produtividade Variável com a altura de queda

## Passo 1: Cálculo de aproximações não lineares

- A variação das características/restrições em energia em função do armazenamento no REE é modelada por **funções quadráticas**
- os **valores em energia para o problema de otimização** são ajustados de acordo com o nível em que o REE, por consulta à parábola
- A **variação da produtividade** também é levada em consideração no cálculo do valor da água (**derivada dos cortes da FCF**)



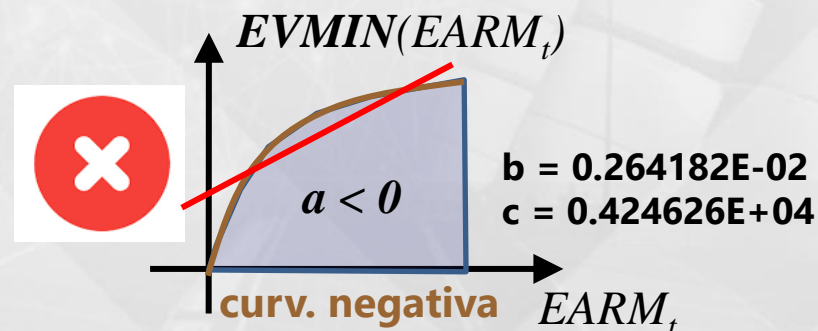
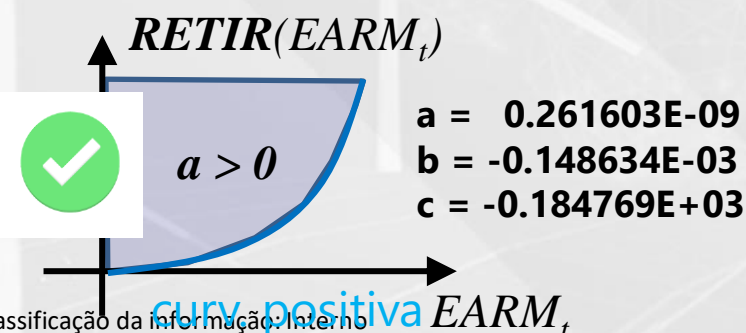
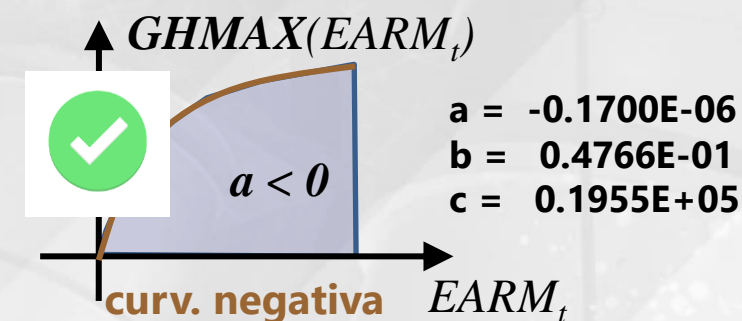
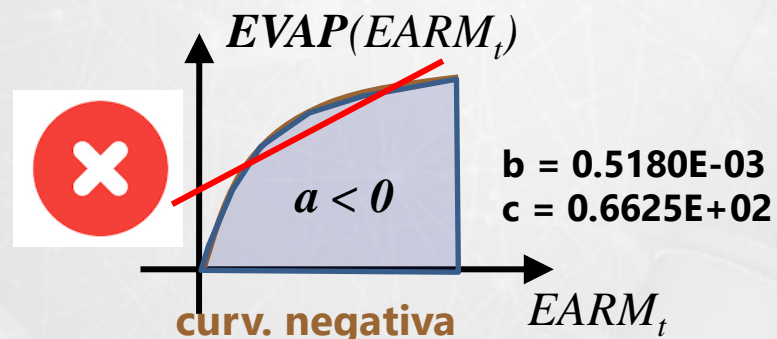
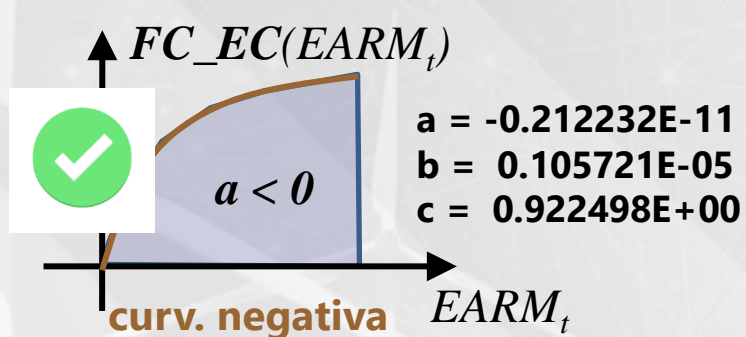
Havendo boa aderência nos armazenamentos (em %) entre diferentes usinas de um REE, pode-se dizer que a produtividade utilizada no cálculo da energia no REE está aderente à soma dos valores em energia calculados por usina, com suas produtividades individuais



# Produtividade Variável com a altura de queda

## Passo 2: Verificação da adequação da curvatura da parábola

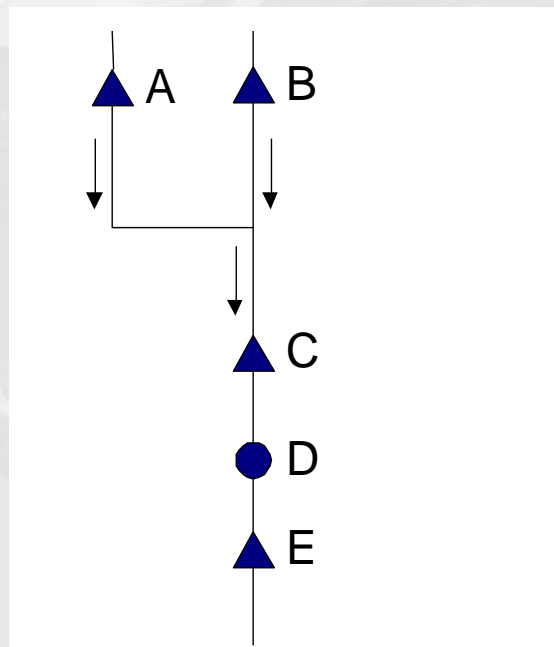
- Para preservar a convexidade do problema de otimização e garantir a aderência do resultado à envoltória das curvas, é feita a seguinte verificação da curvatura das parábolas
  - ✓ se for **negativa** ( $a < 0$ ): deve haver incentivo natural ao **aumento no valor da variável**
  - ✓ se for **positiva** ( $a > 0$ ): deve haver incentivo natural à **redução no valor da variável**




**Recorre-se a uma regressão linear**

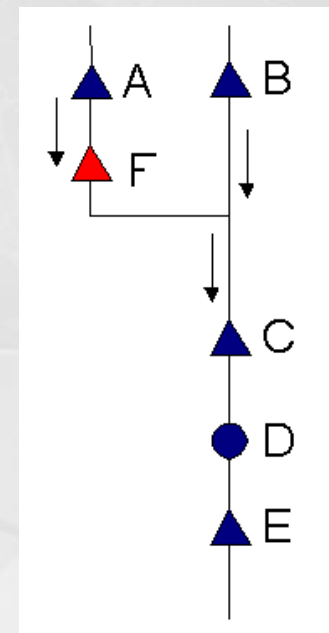
# Mudanças de Configuração ao Longo do Horizonte

## Exemplo de Mudança de Configuração



ESTÁGIO t

Entrada da usina F



ESTÁGIO t+1

$$EA_{\max} = c_1 \{ V_A (\rho_A H_A + \rho_C H_C + \rho_D h_D + \rho_E H_E) + V_B (\rho_B H_B + \rho_C H_C + \rho_D h_D + \rho_E H_E) + V_C (\rho_C H_C + \rho_D h_D + \rho_E H_E) + V_E \rho_E H_E \}$$

$$EA_{\max} = c_1 \{ V_A (\rho_A H_A + \rho_C H_C + \rho_D h_D + \rho_E H_E + \rho_F H_F) + V_B (\rho_B H_B + \rho_C H_C + \rho_D h_D + \rho_E H_E) + V_C (\rho_C H_C + \rho_D h_D + \rho_E H_E) + V_E \rho_E H_E + V_F (\rho_C H_C + \rho_D h_D + \rho_E H_E + \rho_F H_F) \}$$

# Mudanças de Configuração ao Longo do Horizonte

**Dependendo do tipo de mudança de configuração, variam-se os seguintes parâmetros:**

Tipo de Configuração	Variável do Sistema Equivalente de Energia
<b>TIPO 1:</b> Por entrada de reservatório e/ou por potência de base e/ou alteração do canal de fuga	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Energia armazenável máxima</li> <li>• Energia armazenável máxima por restrição de volume de espera</li> <li>• Energia armazenável mínima por restrição de operação</li> <li>• Energia de vazão mínima</li> <li>• Energia evaporada</li> <li>• Energia de desvio de água</li> <li>• Energia natural afluyente bruta</li> <li>• Energia controlável</li> <li>• Energia fio d'água bruta</li> </ul>
<b>TIPO 2:</b> Por alteração de potência e/ou alteração do canal de fuga	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Geração hidráulica máxima</li> </ul>
<b>TIPO 3:</b> Por qualquer modificação na expansão	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Energia natural afluyente líquida</li> <li>• Energia fio d'água líquida</li> </ul>

# Consideração dos dados e características individuais das usinas na modelagem do REE



# Consideração dos aspectos individuais das usinas nas características e Restrições operativas dos REEs

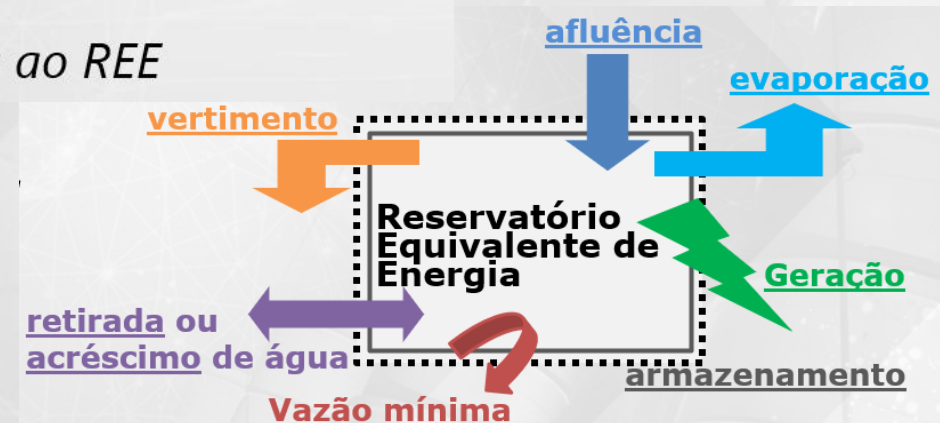
- Os princípios apresentados (localização na cascata, controlabilidade das aflúências, variação da produtividade com a queda e configuração dinâmica ao longo do horizonte) são aplicados a **todos** os aspectos e restrições operativas para os REEs
- Na sequência, iremos detalhar e complementar as informações referentes a cada aspecto

## Características

- Vazões naturais afluentes
- Capacidade de armazenamento
- Vertimentos em usinas a fio d'água
- Geração Hidráulica Máxima
- Evaporação

## Restrições Operativas

- Níveis operativos mínimos para os reservatórios
- Retirada de água para outros usos
- Vazões defluentes mínimas
- geração mínima operativa
- restrições elétricas internas ao REE



# Vazões Naturais Afluentes

## Energia Controlável

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

- 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 no mês k ( $\text{m}^3/\text{s}$ );
- $\rho_j$  - produtibilidade específica da usina j ( $\text{MW}/(\text{m}^3/\text{s})/\text{m}$ );
- $H_{65\%,i}$  - altura a 65% do reservatório i em m;
- $h_j$  - altura líquida para a usina a fio d'água j em m.

Line	Description
13206	
13207	
13208	PRODUTIBILIDADES (MW/m3/s)
13209	
13210	LEGENDA : PRODT - PROD. EQUIVALENTE ( DO VOL. MINIMO AO VOL. MAXIMO )
13211	PRODTM - PROD. EQUIVALENTE ( DO VOL. MINIMO A 65% DO V.U. )
13212	PDTMIN - PROD. ASSOCIADA A ALTURA MINIMA
13213	PDTMED - PROD. ASSOCIADA A ALTURA CORRESPONDENTE A 65% DO V.U.
13214	PDTMAX - PROD. ASSOCIADA A ALTURA MAXIMA
13215	PDTARM - PROD. PARA CALCULO DA ENERGIA ARMAZENADA
13216	PDAMED - PROD. PARA CALCULO DA ENERGIA ARMAZENADA CORRESPONDENTE A
13217	65% DO V.U.
13218	PDTCON - PROD. PARA CALCULO DA ENERGIA CONTROLLEVEL CORRESPONDENTE A
13219	ALTURA EQUIVALENTE
13220	PDCMIN - PROD. PARA CALCULO DA ENERGIA CONTROLLEVEL ASSOCIADA A
13221	ALTURA MINIMA
13222	<b>PDCMED - PROD. PARA CALCULO DA ENERGIA CONTROLLEVEL ASSOCIADA A</b>
13223	<b>ALTURA CORRESPONDENTE A 65% DO V.U.</b>
13224	PDCMAX - PROD. PARA CALCULO DA ENERGIA CONTROLLEVEL ASSOCIADA A

# Vazões Naturais Afluentes

## Aplicação do fator de correção para a Energia Controlável

- A cada mês do horizonte de estudo, são calculados três valores do fator de correção da energia controlável, correspondentes à queda líquida considerando o reservatório no volume mínimo, no volume correspondente a 65% do volume útil e no volume máximo.

$$FC_{*i}^t = \frac{\sum_{n=1}^{NSH} \sum_{i=1}^R Q_{i,n} (\rho_i H_{*,i} + \sum_{j \in F_i} \rho_j h_j)}{\sum_{n=1}^{NSH} \sum_{i=1}^R Q_{i,n} (\rho_i H_{65\%,i} + \sum_{j \in F_i} \rho_j h_j)}$$

$FC\_MIN_i^t$  – altura mínima

$FC\_MED_i^t$  – altura média

$FC\_MAX_i^t$  – altura máxima

EARM	FC
0	$FC\_MIN_i^t$
$EARM\_MED_i^t$	$FC\_MED_i^t$
$EARM\_MAX_i^t$	$FC\_MAX_i^t$

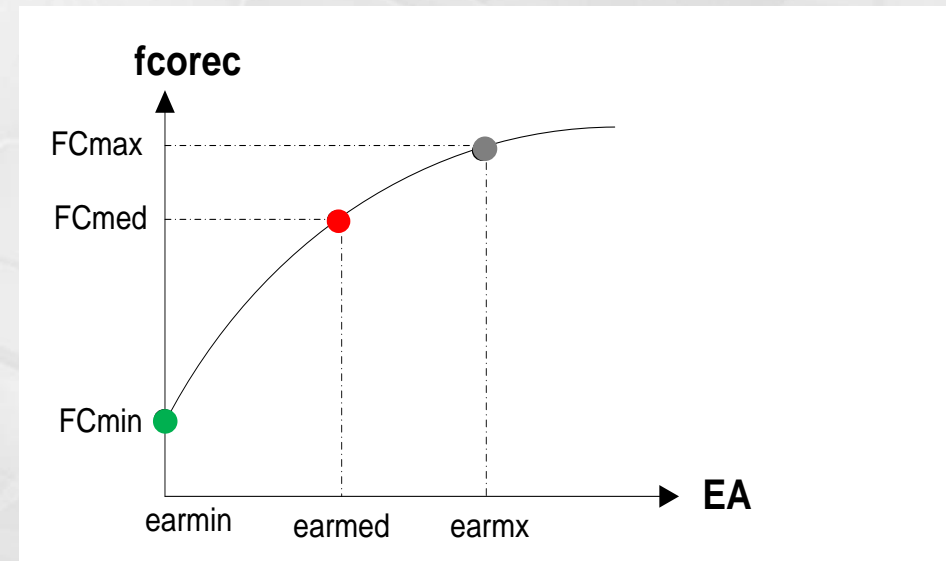
# Vazões Naturais Afluentes

## Aplicação do fator de correção para a Energia Controlável

- A cada mês do horizonte de estudo, são calculados três valores do fator de correção da energia controlável, correspondentes à queda líquida considerando o reservatório no volume mínimo, no volume correspondente a 65% do volume útil e no volume máximo.
- A partir destes três pontos, ajusta-se uma parábola de segundo grau, pela qual obtém-se o fator de correção da energia controlável em função da energia armazenada no mês.

$$fc_{t,i}(earm_{t,i}) = a_{FC}^{t,i} earm_{t,i}^2 + b_{FC}^{t,i} earm_{t,i} + c_{FC}^{t,i}$$

EARM	FC
0	$FC\_MIN_i^t$
$EARM\_MED_i^t$	$FC\_MED_i^t$
$EARM\_MAX_i^t$	$FC\_MAX_i^t$





## Vazões Naturais Afluentes

### Aplicação do fator de correção para a Energia Controlável

Cálculo do valor a ser considerado no PL

$$f_{c,t,i}(e_{arm,t,i}) = a_{FC}^{t,i} e_{arm,t,i}^2 + b_{FC}^{t,i} e_{arm,t,i} + c_{FC}^{t,i}$$

Nos problemas do cálculo da política operativa: [BALANÇO HIDRÍCO CONTROLÁVEL]

$$E_{ARMF_{t+1,i}} + \sum_{c=1}^{NPMC} G_{HC_{t,i,c}} + E_{VERT_{t,i}} + D_{SVC_{t,i}} \\ = f_{din_{t,i}} \cdot e_{armf_{t,i}} + f_{c,t,i}(e_{armf_{t,i}}) \cdot \gamma_{t,i} \cdot E_{NA_{t,i}} - evap_{t,i}(e_{armf_{t,i}}) - E_{VM_{t,i}}$$

# Vazões Naturais Afluentes

## Aplicação do fator de correção para a Energia Controlável

Derivada a ser considerada no corte da FCF

$$\left(\pi_{EARM}^{i,j}\right)_t = \frac{\partial FO_t}{\partial EARM_{t,i}} = \sum_{r=1}^{NRESTR} \frac{\partial FO_t}{\partial RESTR_{t,i}} * \frac{\partial RESTR_{t,i}}{\partial EARM_{t,i}}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial FO_t}{\partial EARM_{t,i}} &= \frac{\partial FO_t}{\partial BH_{t,i}} * \frac{\partial BH_{t,i}}{\partial EARM_{t,i}} + \sum_{c=1}^{NPMC} \frac{\partial FO_t}{\partial GHMAX_{t,i,c}} * \frac{\partial GHMAX_{t,i,c}}{\partial EARM_{t,i}} + \frac{\partial FO_t}{\partial MDSVc_{t,i}} * \frac{\partial MDSVc_{t,i}}{\partial EARM_{t,i}} + \\ &\frac{\partial FO_t}{\partial MVZm_{t,i}} * \frac{\partial MVZm_{t,i}}{\partial EARM_{t,i}} + \frac{\partial FO_t}{\partial \delta vzm_{t,i}} * \frac{\partial \delta vzm_{t,i}}{\partial EARM_{t,i}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial FO_t}{\partial EARM_{t,i}} &= \lambda_{t,i}^{BH} * \left\{ (\gamma_{t,i} * ENA_{t,i}) (2a_{FC}^{t,i} EARM_{t,i} + b_{FC}^{t,i}) - (2a_{t,i}^{EVAP} EARM_{t,i} + b_{t,i}^{EVAP}) \right\} + \\ &\sum_{c=1}^{NPMC} \lambda_{t,c}^{GHMAX} * \sum_{irest=0 \text{ nao ativa}}^{NRE} (2a_{t,i,c,irest}^{GHMAX} EARM_{t,i} + b_{t,i,c,irest}^{GHMAX}) - \lambda_{t,i}^{MDSVc} * (2a_{t,i}^{DSVC} EARM_{t,i} + \\ &b_{t,i}^{DSVC}) + \lambda_{t,i}^{MVZm} * (2a_{t,i}^{VZM} EARM_{t,i} + b_{t,i}^{VZM}) + \lambda_{t,i}^{\delta VZM} * (2a_{t,i}^{VZM} EARM_{t,i} + b_{t,i}^{VZM}) \end{aligned}$$

# Capacidade de Armazenamento

## Energia Armazenável Máxima

$$e_{armx}_{t,i} = c_1 \sum_{r \in i} \left[ V_{\text{útil}r} \sum_{j \in J_r} \rho_j H_{maxj} \right] \quad [\text{MWmês}]$$

**PDTARM**

- $c_1$  - 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  $i$  ( $V_{\text{útil}} = V_{\text{max}} - V_{\text{min}}$ ) em  $\text{hm}^3$ ;
- $\rho_j$  - produtibilidade específica da usina  $j$  em  $\text{MW}/\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$
- $H_{\text{max}j}$  - altura relativa ao volume máximo do reservatório  $j$  ou altura líquida ( $h_j$ ) para as usinas a fio d'água em  $\text{m}$ ;

$$c_1 = \frac{1}{2,63}$$

**Produtibilidade específica: quantidade de energia gerada pelo turbinamento de 1 m<sup>3</sup>/s em 1m de queda líquida.**

# Capacidade de Armazenamento

## Energia Armazenável Máxima

$$e_{armx}_{t,i} = c_1 \sum_{r \in i} \left[ V_{útilr} \sum_{j \in J_r} \rho_j H_{maxj} \right] \quad [\text{MWmês}]$$

**PDTARM**

**PDTARM** - CÁLCULO DA ENERGIA ARMazenADA.

- PERDA HIDRÁULICA DE *iusi* EM metros**

$$PDTARM_{i,iper} = \sum_{iusi \in JUS_i+i} prodesp_{iusi} * \left( \left( \left( \frac{\int_{vmin_{iusi}}^{vmax_{iusi}} PCV_{iusi}}{vmax_{iusi} - vmin_{iusi}} \right), iusi \text{ é reservatório} \right) - cfuga_{iusi,iper} \right) - perdah_{iusi}$$

$$\left( \frac{h_{ref_{iusi}}}{iusi \text{ é fio d'água}} \right)$$

- PERDA HIDRÁULICA DE *iusi* EM %**

$$PDTARM_{i,iper} = \sum_{iusi \in JUS_i+i} prodesp_{iusi} * \left( \left( \left( \frac{\int_{vmin_{iusi}}^{vmax_{iusi}} PCV_{iusi}}{vmax_{iusi} - vmin_{iusi}} \right), iusi \text{ é reservatório} \right) - cfuga_{iusi,iper} \right) * \left( \frac{100 - perdah_{iusi}}{100} \right)$$

$$\left( \frac{h_{ref_{iusi}}}{iusi \text{ é fio d'água}} \right)$$

pmo.dat	
13206	
13207	
13208	PRODUTIBILIDADES (MM/m3/s)
13209	
13210	LEGENDA : PRODT - PROD. EQUIVALENTE ( DO VOL. MINIMO AO VOL. MAXIMO )
13211	PRODTM - PROD. EQUIVALENTE ( DO VOL. MINIMO A 65% DO V.U. )
13212	PDTMIN - PROD. ASSOCIADA A ALTURA MINIMA
13213	PDTMED - PROD. ASSOCIADA A ALTURA CORRESPONDENTE A 65% DO V.U.
13214	PDTMAX - PROD. ASSOCIADA A ALTURA MAXIMA
13215	<b>PDTARM</b> - PROD. PARA CALCULO DA ENERGIA ARMazenADA
13216	PDAMED - PROD. PARA CALCULO DA ENERGIA ARMazenADA CORRESPONDENTE A
13217	65% DO V.U.



# Capacidade de Armazenamento

## [BALANÇO HIDRÍCO CONTROLÁVEL]

$$EARM_{t+1,i} + \sum_{c=1}^{NPMC} GHC_{t,i,c} + EVERT_{t,i} + DSVC_{t,i} \\ = fdin_{t,i} \cdot earm_{t,i} + fc_{t,i}(earm_{t,i}) \cdot \gamma_{t,i} \cdot ENA_{t,i} - evap_{t,i}(earm_{t,i}) - EVM_{t,i}$$

## [LIMITE MÁXIMO DE ARMAZENAMENTO]

$$EARM_{t+1,i} \leq earmx_{t,i}$$

## [LIMITE MÁXIMO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA]

$$\alpha_{t,i}^{ACPL} \cdot GHC_{t,i,c} + GFIO_{t,i} \cdot fpeng_{t,c} \leq ghmax_{t,i}(earm_{t,i}) \cdot fpeng_{t,c}$$

# Vertimentos em função do turbinamento máximo

## USINAS A FIO D'ÁGUA

- *Vertimentos representados por uma função de perdas ajustadas considerando as **vazões incrementais individuais às usinas** e o engolimento máximo das turbinas;*
- *Uma **aproximação linear por partes** é obtida através do algoritmo **MARS** (Multivariate adaptative regression splines)*

$$EFIO\_HIST_{i,t} = \sum_{f \in F_i} Q_{inc_{f,t}} \rho_f h_f$$

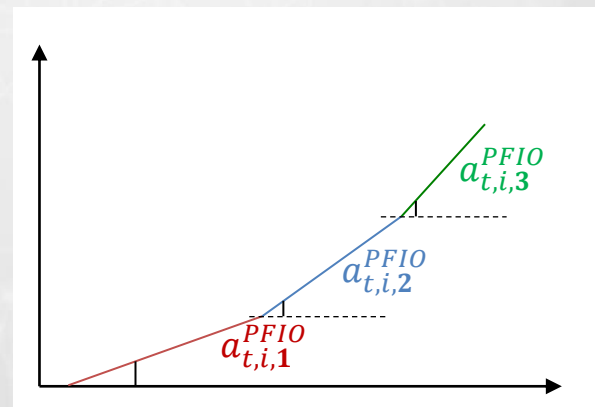
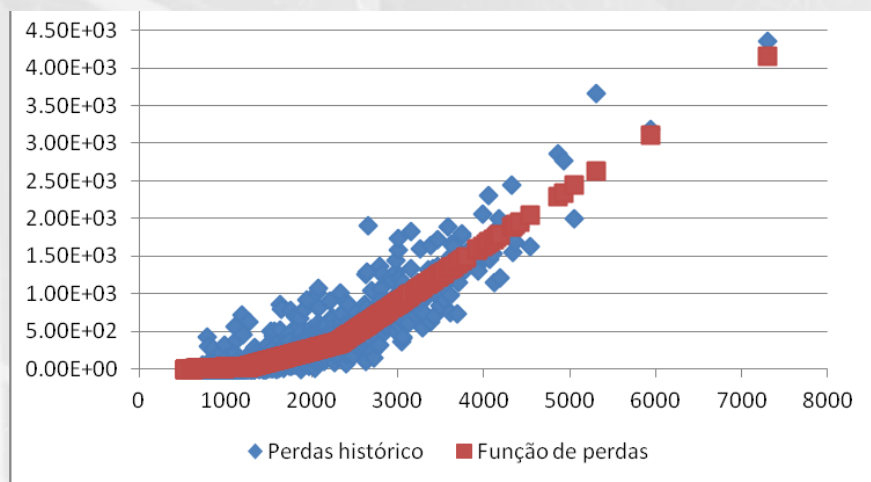
$$EFIOL\_HIST_{i,t} = \sum_{f \in F_i} \min[(Q_{max_{f,t}}), Q_{inc_{f,t}}] \rho_f h_f$$

$$PERDAF\_HIST_{i,t} = EFIO\_HIST_{i,t} - EFIOL\_HIST_{i,t}$$

# Vertimentos em função do turbinamento máximo

## USINAS A FIO D'ÁGUA

- Vertimentos representados por uma função de perdas ajustadas considerando as **vazões incrementais individuais às usinas** e o engolimento máximo das turbinas;
- Uma **aproximação linear por partes** é obtida através do algoritmo **MARS** (Multivariate adaptive regression splines)



em cada reta:  $PERDAF(EFIO_{t,i}) = \alpha_{t,i,r}^{PFIO} \cdot EFIO_{t,i} + b_{t,i,r}^{PFIO}$



XII SEPOE  
May - 20<sup>th</sup> to 23<sup>rd</sup> - 2012  
RIO DE JANEIRO (RJ) -  
BRASIL.

XII SIMPÓSIO DE ESPECIALISTAS EM PLANEJAMENTO DA  
OPERAÇÃO E EXPANSÃO ELÉTRICA

XII SYMPOSIUM OF SPECIALISTS IN ELECTRIC OPERATIONAL  
AND EXPANSION PLANNING

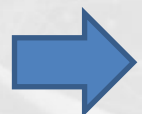
**MODELAGEM DA FUNÇÃO DE PERDAS A FIO D'ÁGUA ATRAVÉS DO MARS  
(MULTIVARIATE ADAPTIVE REGRESSION SPLINES)**

M.P. Tcheou<sup>1</sup>, R.N. Cabral<sup>1</sup>, D.D.J. Penna<sup>1</sup>, V.S. Duarte<sup>1</sup>, M.E.P. Maceira<sup>1,2</sup>

# Vertimentos em função do turbinamento máximo

## USINAS A FIO D'ÁGUA

- Vertimentos representados por uma função de perdas ajustadas considerando as **vazões incrementais individuais às usinas** e o engolimento máximo das turbinas;
- Uma **aproximação linear por partes é obtida através do algoritmo MARS** (Multivariate adaptive regression splines)



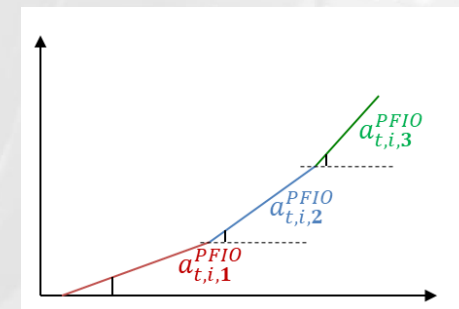
Representa-se explicitamente as perdas devido a vertimentos nessas usinas (MARS) no problema de otimização:

### [BALANÇO HIDRÍCO FIO D'ÁGUA]

$$GFIO L_{t,i} + \mathbf{PERDAFIO}_{t,i} = (1 - \gamma_{t,i}) \cdot ENA_{t,i} + DSVF_{t,i}$$

### [PERDAS A FIO D'ÁGUA – REPRESENTADA POR APROX. LINEARES DADA PELO MARS]

$$\mathbf{PERDAFIO}_{t,i} \geq a_{t,i,r}^{PFIO} \cdot \left( (1 - \gamma_{t,i}) \cdot ENA_{t,i} - DSVF_{t,i,c} \right) + b_{t,i,r}^{PFIO}, \quad r = 1, \dots, 3$$





# Geração Hidráulica Máxima

## Cálculo e Variação com a Altura de Queda

A geração máxima das usinas que pertencem ao REE dependem do nível de armazenamento, em função do engolimento máximo das turbinas

$$GHMAX_{IREE}^{iper} = \sum_{i \in IREE} \left\{ \begin{array}{l} \left( \sum_{ic \in NCONJ_{iusi}} nmaq_{iusi,ic} * pef_{iusi,ic} * \text{MIN} \left\{ \left( 1, \left( \frac{h_{iusi}}{href_{iusi,ic}} \right)^{kturb_{iusi}} \right) * (1 - TEIF_{iusi}) * (1 - IP_{iusi}) \right. \right. \\ \left. \left. \sum_{ic=1}^{nconj_{iusi}} \text{MIN} \left( qturbina_{iusi,ic}^{iper}; qgerador_{iusi,ic}^{iper} \right) * prod_{iusi}^{iper} * (1 - TEIF_{iusi}) * (1 - IP_{iusi}), \right. \right. \end{array} \right. \left. \begin{array}{l} \textit{iusi reservatório} \\ \textit{iusi fio d'água} \end{array} \right\}$$

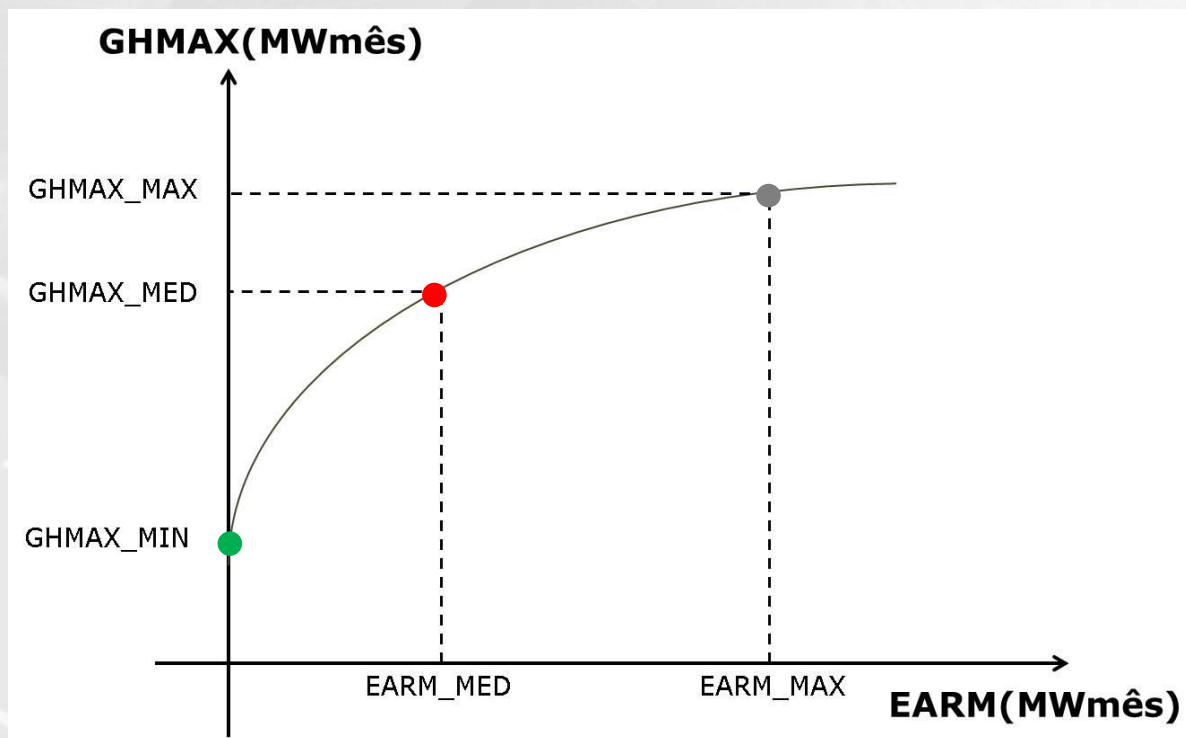
- $GHMAX\_MIN_i^t$  – altura mínima
- $GHMAX\_MED_i^t$  – altura média
- $GHMAX\_MAX_i^t$  – altura máxima

EARM	GHMAX
0	$GHMAX\_MIN_i^t$
$EARM\_MED_i^t$	$GHMAX\_MED_i^t$
$EARM\_MAX_i^t$	$GHMAX\_MAX_i^t$

# Geração Hidráulica Máxima

**Ajuste em função da altura de queda:**

$$ghmax_{t,i}(earm_{t,i}) = a_{GHM}^{t,i} earm_{t,i}^2 + b_{GHM}^{t,i} earm_{t,i} + c_{GHM}^{t,i}$$



EARM	GHMAX
0	$GHMAX\_MIN_i^t$
$EARM\_MED_i^t$	$GHMAX\_MED_i^t$
$EARM\_MAX_i^t$	$GHMAX\_MAX_i^t$

## Geração Hidráulica Máxima

**Valor a ser considerado no problema de otimização:**

**Cálculo do valor a ser considerado no PL**

$$ghmax_{t,i}(earm_{t,i}) = a_{GHM}^{t,i} earm_{t,i}^2 + b_{GHM}^{t,i} earm_{t,i} + c_{GHM}^{t,i}$$

**Nos problemas do cálculo da política operativa: [GERAÇÃO HIDRÁULICA MÁXIMA]**

$$GHC_{t,i,c} + GFIO L_{t,i} \cdot fpeng_{t,c} \leq ghmax_{t,i}(earm_{t,i}) \cdot fpeng_{t,c}$$

# Geração Hidráulica Máxima

## Derivada a ser considerada no corte da FCF

$$\left(\pi_{EARM}^{i,j}\right)_t = \frac{\partial FO_t}{\partial EARM_{t,i}} = \sum_{r=1}^{NRESTR} \frac{\partial FO_t}{\partial RESTR_{t,i}} * \frac{\partial RESTR_{t,i}}{\partial EARM_{t,i}}$$

$$\frac{\partial FO_t}{\partial EARM_{t,i}} = \frac{\partial FO_t}{\partial BH_{t,i}} * \frac{\partial BH_{t,i}}{\partial EARM_{t,i}} + \sum_{c=1}^{NPMC} \frac{\partial FO_t}{\partial GHMAX_{t,i,c}} * \frac{\partial GHMAX_{t,i,c}}{\partial EARM_{t,i}} + \frac{\partial FO_t}{\partial MDSVC_{t,i}} * \frac{\partial MDSVC_{t,i}}{\partial EARM_{t,i}} + \frac{\partial FO_t}{\partial MVZm_{t,i}} * \frac{\partial MVZm_{t,i}}{\partial EARM_{t,i}} + \frac{\partial FO_t}{\partial \delta vzm_{t,i}} * \frac{\partial \delta vzm_{t,i}}{\partial EARM_{t,i}}$$

$$\frac{\partial FO_t}{\partial EARM_{t,i}} = \lambda_{t,i}^{BH} * \left\{ (\gamma_{t,i} * ENA_{t,i}) (2a_{t,i}^{FC} EARM_{t,i} + b_{t,i}^{FC}) - (2a_{t,i}^{EVAP} EARM_{t,i} + b_{t,i}^{EVAP}) \right\} + \sum_{c=1}^{NPMC} \lambda_{t,c}^{GHMAX} * \sum_{i_{rest}=0 \text{ nao ativa}}^{NRE} (2a_{GHM}^{t,i,irest} EARM_{t,i} + b_{GHM}^{t,i,irest}) - \lambda_{t,i}^{MDSVC} * (2a_{t,i}^{DSVC} EARM_{t,i} + b_{t,i}^{DSVC}) + \lambda_{t,i}^{MVZm} * (2a_{t,i}^{VZM} EARM_{t,i} + b_{t,i}^{VZM}) + \lambda_{t,i}^{\delta VZM} * (2a_{t,i}^{VZM} EARM_{t,i} + b_{t,i}^{VZM})$$



# Evaporação

## Cálculo e Variação com a Altura de Queda

- Parcela da água armazenada nos reservatórios que é perdida por causa do processo de evaporação
- O coeficiente de evaporação varia mensalmente
- Para algumas usinas e em alguns meses, o coeficiente de evaporação pode ter valores negativos
  - ✓ Há mais água chegando por vias subterrâneas do que sendo evaporada

$$EVAP_{-} *_{t,i} = c_2 \sum_{r \in i} e_i A_{-} *_{i} \sum_{j \in J_r} \rho_j H_{-} *_{j} \quad [\text{MWmês}]$$

$c_2$  - constante que depende do sistema de unidades adotado;

R - conjunto de reservatórios do sistema;

$J_i$  - conjunto de usinas a jusante do reservatório  $r$ , inclusive;

$A_i$  - área do reservatório  $r$  em  $\text{km}^2$ ;

$e_i$  - coeficiente de evaporação do reservatório  $r$  em  $\text{mm/mês}$ ;

$\rho_i$  - produtibilidade específica da usina  $r$  em  $\text{MW/m}^3/\text{s/m}$ ;

$H_{-} *_{j}$  - altura equivalente do reservatório  $j$  ou altura líquida para as usinas a fio d'água;

$$c_2 = \frac{1}{2,63 * 10^3}$$

# Evaporação

## Cálculo e Variação com a Altura de Queda

- Parcela da água armazenada nos reservatórios que é perdida por causa do processo de evaporação
- O coeficiente de evaporação varia mensalmente
- Para algumas usinas e em alguns meses, o coeficiente de evaporação pode ter valores negativos
  - ✓ Há mais água chegando por vias subterrâneas do que sendo evaporada

$$EVAP_{-}^{*t,i} = c_2 \sum_{r \in i} e_i A_{-}^{*i} \sum_{j \in J_r} \rho_j H_{-}^{*j}$$

EARM	GHMAX
0	$EVAP\_MIN_i^t$
$EARM\_MED_i^t$	$EVAP\_MED_i^t$
$EARM\_MAX_i^t$	$EVAP\_MAX_i^t$

$GHMAX\_MIN_i^t$  – altura e área correspondente a altura mínima

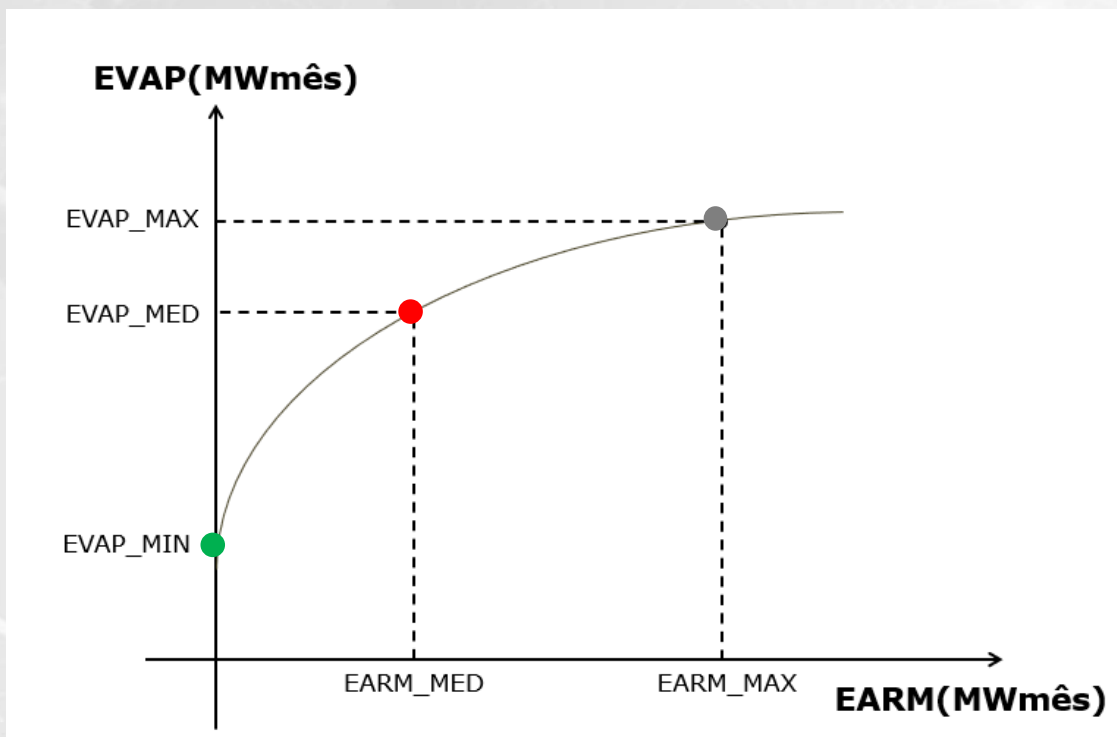
$GHMAX\_MED_i^t$  – altura e área correspondente a altura média

$GHMAX\_MAX_i^t$  – altura e área correspondente a altura máxima

# Evaporação

## Cálculo e Variação com a Altura de Queda

- Parcela da água armazenada nos reservatórios que é perdida por causa do processo de evaporação
- O coeficiente de evaporação varia mensalmente
- Para algumas usinas e em alguns meses, o coeficiente de evaporação pode ter valores negativos
  - ✓ Há mais água chegando por vias subterrâneas do que sendo evaporada



EARM	GHMAX
0	$EVAP\_MIN_i^t$
$EARM\_MED_i^t$	$EVAP\_MED_i^t$
$EARM\_MAX_i^t$	$EVAP\_MAX_i^t$

$$\begin{aligned}
 & evap_{t,i}(earm_{t,i}) \\
 & = a_{EVAP}^{t,i} earm_{t,i}^2 + b_{EVAP}^{t,i} earm_{t,i} + c_{EVAP}^{t,i}
 \end{aligned}$$

# Evaporação

## Aplicação do fator de correção para a Evaporação

Cálculo do valor a ser considerado no PL

$$evap_{t,i}(earm_{t,i}) = a_{EVAP}^{t,i} earm_{t,i}^2 + b_{EVAP}^{t,i} earm_{t,i} + c_{EVAP}^{t,i}$$

Nos problemas do cálculo da política operativa: [BALANÇO HIDRÍCO CONTROLÁVEL]

$$\begin{aligned} EARM_{t+1,i} + \sum_{c=1}^{NPMC} GHC_{t,i,c} + EVERT_{t,i} + DSVC_{t,i} \\ = fdin_{t,i} \cdot earm_{t,i} + fc_{t,i}(earm_{t,i}) \cdot \gamma_{t,i} \cdot ENA_{t,i} - evap_{t,i}(earm_{t,i}) - EVM_{t,i} \end{aligned}$$



# Consideração das restrições individuais para as usinas na modelagem do REE

# Consideração dos aspectos individuais das usinas nas características e Restrições operativas dos REEs

- Os princípios apresentados (localização na cascata, controlabilidade das aflúências, variação da produtividade com a queda e configuração dinâmica ao longo do horizonte) são aplicados a **todos** os aspectos e restrições operativas para os REEs
- Na sequência, iremos detalhar e complementar as informações referentes a cada aspecto

## Características

- Vazões naturais afluentes
- Capacidade de armazenamento
- Vertimentos em usinas a fio d'água
- Geração Hidráulica Máxima
- Evaporação

## Restrições Operativas

- Níveis operativos mínimos para os reservatórios
- Retirada de água para outros usos
- Vazões defluentes mínimas
- geração mínima operativa
- restrições elétricas internas ao REE



# Modelagem por REE

Quais **restrições operativas individuais** das usinas hidrelétricas devem ser representados de maneira equivalente através do REE?

- *Geração Hidráulica Mínima*
- *Níveis operativos mínimos para os reservatórios*
- *Retirada de água para outros usos*
- *Vazões defluentes mínimas*
- *geração mínima operativa*
- *restrições elétricas internas ao REE*



- Todos os dados das restrições são **informados de forma individualizada**
- o NEWAVE modela essas restrições em termos de energia, de forma variável com o estado do sistema (nível de armazenamento)

# Geração Hidráulica Mínima

## Cálculo

- A partir das metas de geração mínima fornecidas pelo usuário por usina hidroelétrica, é calculada a meta de geração hidráulica mínima por REE.
- Considerando que a geração hidráulica mínima não é uma limitação física, mas elétrica, esta não será função da energia armazenada, assim como é feito com a geração hidráulica máxima.

$$ghmin_{t,i} = \sum_{u \in R} GMIN_u \quad [\text{MWmédio}]$$

- $R$  - Conjunto de usinas do reservatório do reservatório equivalente de energia  $i$  que possuam meta de geração hidráulica mínima;
- $GMIN_u$  – geração mínima da usina  $u$  em MWmédio;  
Metas somente para usinas com reservatório ou fio d'água com reservatório a montante.



## Geração Hidráulica Mínima

### Cálculo

- A partir das metas de geração mínima fornecidas pelo usuário por usina hidroelétrica, é calculada a meta de geração hidráulica mínima por REE.
- Considerando que a geração hidráulica mínima não é uma limitação física, mas elétrica, esta não será função da energia armazenada, assim como é feito com a geração hidráulica máxima.

### Nos problemas do cálculo da política operativa: [GERAÇÃO HIDRÁULICA MÍNIMA]

$$\alpha_{t,i}^{ACPL} \cdot GHC_{t,i,c} + GFIO L_{t,i} \cdot f_{peng_{t,c}} + \delta_{t,j,c}^{GHMIN} \geq ghmin_{t,i} \cdot f_{peng_{t,c}}$$

# Níveis operativos mínimos para os reservatórios

## Cálculo

### Fornecido por usina

- Arquivo de modificação com Palavra-chave: VMINP(hm ou %vu);

**VMINP**

$$earmnu_t^{iree} = \frac{1}{2.63} \sum_{\substack{iusi \in iree \\ iusi \in \mathcal{E}t}} (VMINP_t^{iusi} - VMIN^{iusi}) * \sum_{i \in JUS_{iusi+iusi}} prodesp_i * \left( \int_{VMIN}^{VMINP_t^i} PCV - cfuga_t^{iusi} - perdah^{iusi} \right)$$

### Fornecido por REE

- Arquivo curva.dat.

**curva.dat**

$$earmnree_t^{iree} = CG_t^{iree} \left( \frac{1}{2.63} \sum_{\substack{iusi \in iree \\ iusi \in \mathcal{E}t}} vutil^{iusi} * \sum_{i \in JUS_{iusi+iusi}} prodesp_i * \left( \int_{VMIN}^{VMAX} PCV - cfuga_t^{iusi} - perdah^{iusi} \right) \right)$$

$$car_{t,i} = \max \{ earmnu_t^{iree}, earmnree_t^{iree} \}$$

# Níveis operativos mínimos para os reservatórios

$$car_{t,i} = \max \{ earmnu_t^{iree}, earmnree_t^{iree} \}$$

**Nos problemas do cálculo da política operativa: [BALANÇO HIDRÍCO CONTROLÁVEL]**

$$EARM_{t+1,i} + \delta_{t,i}^{EARM} \geq car_{t,i}$$

## Retirada de água para outros usos

### *Cálculo e Variação com a Altura de Queda*

- Energia associada à afluência desviada ou adicionada imediatamente a montante de uma usina hidroelétrica
- Atendimento aos usos múltiplos da água, como por exemplo, irrigação, saneamento etc
- Parcela controlável e a fio d'água
- $Q_{dsv}$  – vazão desviada/adicionada imediatamente a montante de uma usina
  - Vazão desviada – valores negativos
  - Vazão adicionada – valores positivos



# Retirada de água para outros usos

## Cálculo e Variação com a Altura de Queda

- Energia associada à afluência desviada ou adicionada imediatamente a montante de uma usina hidroelétrica

### PARCELA CONTROLÁVEL

$$DESVC_{*,i} = \left( \sum_{r \in R} (Qdsv_{r,k} \sum_{j \in J_r} \rho_j H_{*,i}) + \sum_{f \in F} (Qdsv_{f,k} \sum_{j \in N_f} \rho_j H_{*,j}) \right)$$

*DESVC\_MIN*<sub>t,i</sub> – altura mínima

*DESVC\_MED*<sub>t,i</sub> – altura média

*DESVC\_MAX*<sub>t,i</sub> – altura máxima

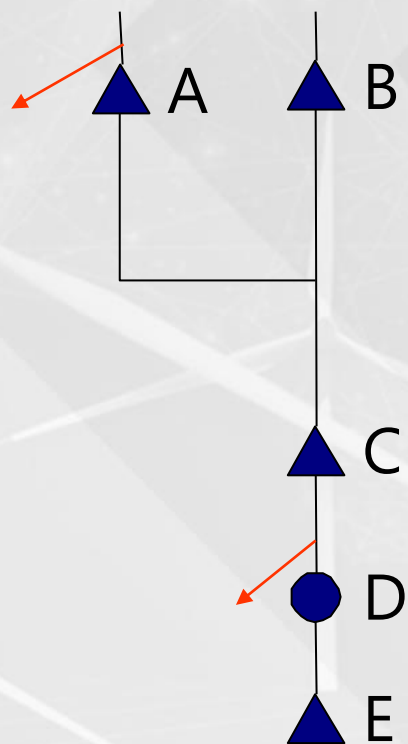
- R - conjunto de reservatórios do sistema *i*;
- J<sub>r</sub> - conjunto de usinas a jusante do reservatório *r* inclusive;
- F - conjunto de usinas a fio d'água;
- N<sub>f</sub> - conjunto de usinas a jusante do primeiro reservatório, inclusive, a jusante da usina fio d'água *f*;
- ρ<sub>j</sub> – produtividade específica da usina *j* em MW/m<sup>3</sup>/s/m;
- H<sub>65%,j</sub> - altura a 65% do reservatório *j* ou altura líquida para as usinas a fio d'água;

EARM	DESVC
0	<i>DESVC_MIN</i> <sub>t,i</sub>
<i>EARM_MED</i> <sub>i</sub> <sup>t</sup>	<i>DESVC_MED</i> <sub>t,i</sub>
<i>EARM_MAX</i> <sub>i</sub> <sup>t</sup>	<i>DESVC_MAX</i> <sub>t,i</sub>

## Retirada de água para outros usos

### Cálculo e Variação com a Altura de Queda

$$m_{t,i}^{DSVC} = \left( \sum_{r \in R} (Qdsv_{r,k} \sum_{j \in J_r} \rho_j H_{65\%,i}) + \sum_{f \in F} (Qdsv_{f,k} \sum_{j \in N_f} \rho_j H_{65\%,j}) \right)$$



$$m_{t,i}^{DSVC} = Qdsv_A (\rho_A H_A + \rho_C H_C + \rho_D h_D + \rho_E H_E) + Qdsv_D (\rho_E H_E)$$

- $N_f$  - conjunto de usinas a jusante do primeiro reservatório, inclusive, a jusante da usina fio d'água  $f$ ;

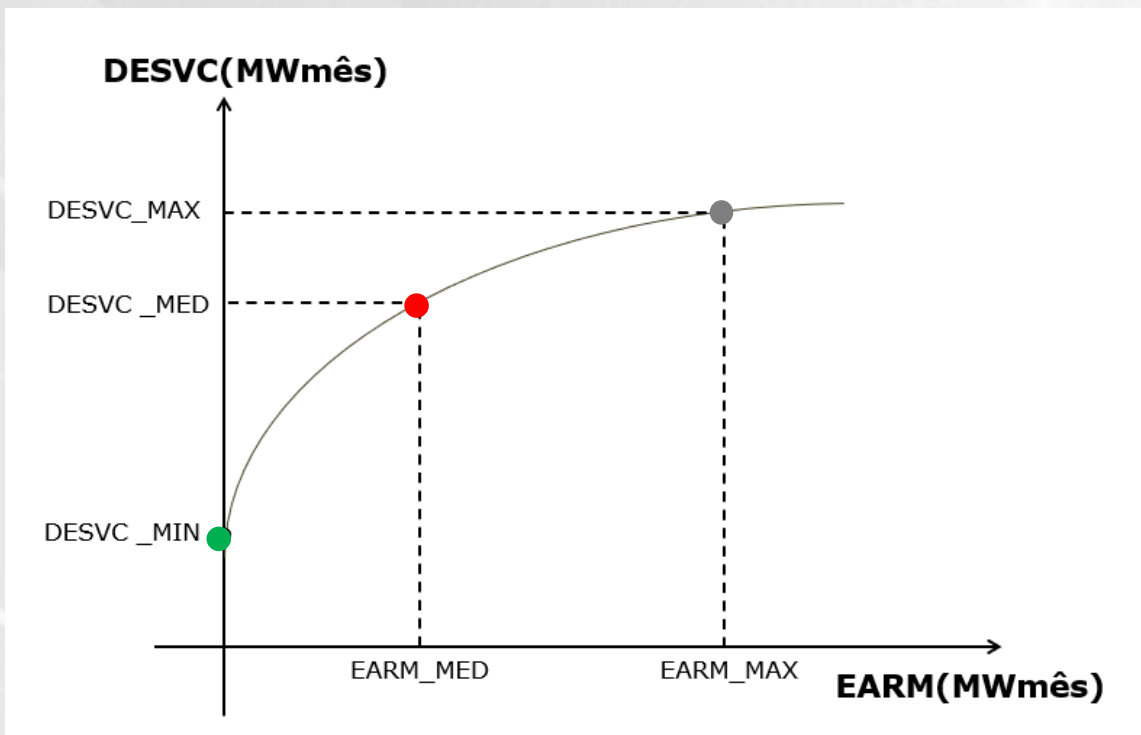
# Retirada de água para outros usos

## Cálculo e Variação com a Altura de Queda

- Energia associada à afluência desviada ou adicionada imediatamente a montante de uma usina hidroelétrica

### PARCELA CONTROLÁVEL

$$m_{desvc_{t,i}}(e_{arm_{t,i}}) = a_{DESVC}^{t,i} e_{arm_{t,i}}^2 + b_{DESVC}^{t,i} e_{arm_{t,i}} + c_{DESVC}^{t,i}$$



EARM	DESVC
0	$DESVC_{MIN_{t,i}}$
$EARM_{MED}_i^t$	$DESVC_{MED_{t,i}}$
$EARM_{MAX}_i^t$	$DESVC_{MAX_{t,i}}$

## Retirada de água para outros usos

### ***Aplicação do fator de correção para a meta de retirada de água controlável***

**Cálculo do valor a ser considerado no PL**

$$mdesvc_{t,i}(earm_{t,i}) = a_{DESVC}^{t,i} earm_{t,i}^2 + b_{DESVC}^{t,i} earm_{t,i} + c_{DESVC}^{t,i}$$

**Nos problemas do cálculo da política operativa: [RETIRADA/ACRÉSCIMO DE ÁGUA CONTROL.]**

$$DSVC_{t,i} + \delta_{t,i}^{DSVC} = mdesvc_{t,i}(earm_{t,i})$$



# Retirada de água para outros usos

## Aplicação do fator de correção para a meta de retirada de água controlável

Derivada a ser considerada no corte da FCF

$$\left(\pi_{EARM}^{i,j}\right)_t = \frac{\partial FO_t}{\partial EARM_{t,i}} = \sum_{r=1}^{NRESTR} \frac{\partial FO_t}{\partial RESTR_{t,i}} * \frac{\partial RESTR_{t,i}}{\partial EARM_{t,i}}$$

$$\frac{\partial FO_t}{\partial EARM_{t,i}} = \frac{\partial FO_t}{\partial BH_{t,i}} * \frac{\partial BH_{t,i}}{\partial EARM_{t,i}} + \sum_{c=1}^{NPMC} \frac{\partial FO_t}{\partial GHMAX_{t,i,c}} * \frac{\partial GHMAX_{t,i,c}}{\partial EARM_{t,i}} + \frac{\partial FO_t}{\partial MDSV_{t,i}} * \frac{\partial MDSV_{t,i}}{\partial EARM_{t,i}} +$$

$$\frac{\partial FO_t}{\partial MVZ_{t,i}} * \frac{\partial MVZ_{t,i}}{\partial EARM_{t,i}} + \frac{\partial FO_t}{\partial \delta vzm_{t,i}} * \frac{\partial \delta vzm_{t,i}}{\partial EARM_{t,i}}$$

$$\frac{\partial FO_t}{\partial EARM_{t,i}} = \lambda_{t,i}^{BH} * \left\{ (\gamma_{t,i} * ENA_{t,i}) (2a_{FC}^{t,i} EARM_{t,i} + b_{FC}^{t,i}) - (2a_{t,i}^{EVAP} EARM_{t,i} + b_{t,i}^{EVAP}) \right\} +$$

$$\sum_{c=1}^{NPMC} \lambda_{t,c}^{GHMAX} * \sum_{irest=0 \text{ nao ativa}}^{NRE} (2a_{t,i,c,irest}^{GHMAX} EARM_{t,i} + b_{t,i,c,irest}^{GHMAX}) - \lambda_{t,i}^{MDSVc} * (2a_{t,i}^{DSVC} EARM_{t,i} +$$

$$b_{t,i}^{DSVC}) + \lambda_{t,i}^{MVZm} * (2a_{t,i}^{VZM} EARM_{t,i} + b_{t,i}^{VZM}) + \lambda_{t,i}^{\delta VZM} * (2a_{t,i}^{VZM} EARM_{t,i} + b_{t,i}^{VZM})$$

## Retirada de água para outros usos

### *Cálculo e Variação com a Altura de Queda*

- Energia associada à afluência desviada ou adicionada imediatamente a montante de uma usina hidroelétrica

#### PARCELA A FIO D'ÁGUA

$$mdesvf_{t,i} = \sum_{f \in F} (Qdsvf_{f,k} \sum_{j \in J_f} \rho_j h_j)$$

- F - conjunto de usinas a fio d'água;
- $J_f$  - conjunto de usinas a fio d'água a jusante da usina  $f$ , inclusive, até o próximo reservatório;
- $\rho_j$  - produtibilidade específica da usina  $j$  em MW/m<sup>3</sup>/s/m;
- $h_j$  - altura líquida para as usinas a fio d'água;

**Nos problemas do cálculo da política operativa: [RETIRADA/ACRÉSCIMO DE ÁGUA FIO D'ÁGUA]**

$$DSVF_{t,i} + \delta_{t,i}^{DSVF} = mdesvf_{t,i}$$

## Vazões defluentes mínimas

### Cálculo e Variação com a Altura de Queda

- Energia gerada pela descarga mínima obrigatória dos reservatórios (navegação, controle de poluição etc);
- Montantes de descarga mínima são dados fornecidos pelo usuário.

$$EVAZMIN_{-}* = \sum_{i \in R} [Q \min_{i,k} (\rho_i H_{*,i} + \sum_{j \in J_i} \rho_j h_j)]$$

- 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;
- $Q \min_{i,k}$  - descarga mínima obrigatória do reservatório  $i$  durante o mês  $k$  em  $m^3/s$ ;
- $\rho_j$  - produtibilidade específica da usina  $j$  em  $MW/m^3/s/m$ ;
- $H_{65\%,i}$  - altura equivalente do reservatório  $i$  em m;

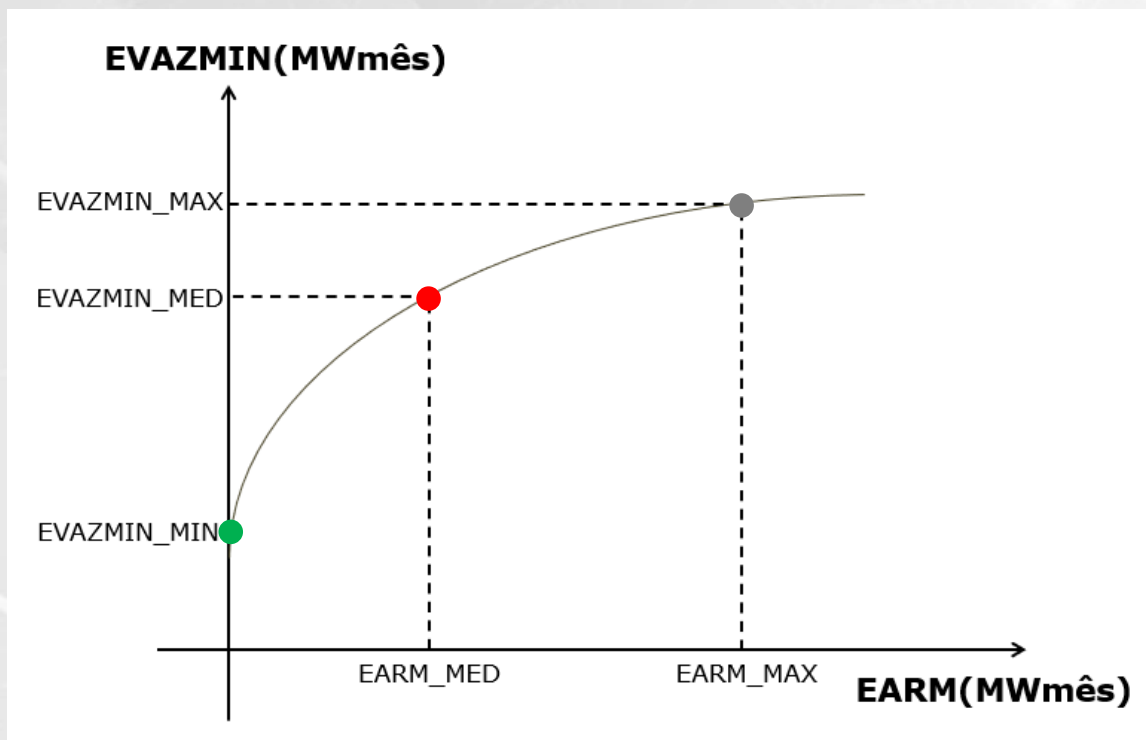
$EVAZMIN\_MIN_{t,i}$  - altura mínima  
 $EVAZMIN\_MED_{t,i}$  - altura média  
 $EVAZMIN\_MAX_{t,i}$  - altura máxima

EARM	EVAZMIN
0	$EVAZMIN\_MIN_{t,i}$
$EARM\_MED_i^t$	$EVAZMIN\_MED_{t,i}$
$EARM\_MAX_i^t$	$EVAZMIN\_MAX_{t,i}$

# Vazões defluentes mínimas

## Cálculo e Variação com a Altura de Queda

- Energia gerada pela descarga mínima obrigatória dos reservatórios (navegação, controle de poluição etc);
- Montantes de descarga mínima são dados fornecidos pelo usuário.



$$mevmin_{t,i,1}(earm_{t,i}) = a_{EVMIN,1}^{t,i} earm_{t,i}^2 + b_{EVMIN,1}^{t,i} earm_{t,i} + c_{EVMIN,1}^{t,i}$$

$$mevmin_{t,i,2}(earm_{t,i}) = a_{EVMIN,2}^{t,i} earm_{t,i}^2 + b_{EVMIN,2}^{t,i} earm_{t,i} + c_{EVMIN,2}^{t,i}$$

EARM	EVAZMIN
0	$EVAZMIN\_MIN_{t,i}$
$EARM\_MED_i^t$	$EVAZMIN\_MED_{t,i}$
$EARM\_MAX_i^t$	$EVAZMIN\_MAX_{t,i}$



## Vazões defluentes mínimas

### Aplicação do fator de correção para as metas de vazão mínima

#### Cálculo do valor a ser considerado no PL

$$mevmin_{t,i,r}(earm_{t,i}) = a_{EVMIN,1}^{t,i} earm_{t,i}^2 + b_{EVMIN,1}^{t,i} earm_{t,i} + c_{EVMIN,1}^{t,i} \quad , r = 1 \text{ e } 2$$

#### Nos problemas do cálculo da política operativa: [BALANÇO HIDRÍCO CONTROLÁVEL]

$$\sum_{c=1}^{NPMC} GHC_{t,i,c} + EVERT_{t,i} + \delta_{t,i,1}^{EVMIN} + \delta_{t,i,2}^{EVMIN} \geq mevmin_{t,i,1}(earm_{t,i})$$

$$0 \leq \delta_{t,i,1}^{EVMIN} \leq (1 - \phi) \cdot mevmin_{t,i,2}(earm_{t,i})$$

$$\delta_{t,i,2}^{EVMIN} \geq 0$$

# Vazões defluentes mínimas

## Cálculo e Variação com a Altura de Queda

Derivada a ser considerada no corte da FCF

$$\left(\pi_{EARM}^{i,j}\right)_t = \frac{\partial FO_t}{\partial EARM_{t,i}} = \sum_{r=1}^{NRESTR} \frac{\partial FO_t}{\partial RESTR_{t,i}} * \frac{\partial RESTR_{t,i}}{\partial EARM_{t,i}}$$

$$\frac{\partial FO_t}{\partial EARM_{t,i}} = \frac{\partial FO_t}{\partial BH_{t,i}} * \frac{\partial BH_{t,i}}{\partial EARM_{t,i}} + \sum_{c=1}^{NPMC} \frac{\partial FO_t}{\partial GHMAX_{t,i,c}} * \frac{\partial GHMAX_{t,i,c}}{\partial EARM_{t,i}} + \frac{\partial FO_t}{\partial MDSVC_{t,i}} * \frac{\partial MDSVC_{t,i}}{\partial EARM_{t,i}} +$$

$$\frac{\partial FO_t}{\partial MVZm_{t,i}} * \frac{\partial MVZm_{t,i}}{\partial EARM_{t,i}} + \frac{\partial FO_t}{\partial \delta vzm_{t,i}} * \frac{\partial \delta vzm_{t,i}}{\partial EARM_{t,i}}$$

$$\frac{\partial FO_t}{\partial EARM_{t,i}} = \lambda_{t,i}^{BH} * \{(\gamma_{t,i} * ENA_{t,i})(2a_{FC}^{t,i} EARM_{t,i} + b_{FC}^{t,i}) - (2a_{t,i}^{EVAP} EARM_{t,i} + b_{t,i}^{EVAP})\} +$$

$$\sum_{c=1}^{NPMC} \lambda_{t,c}^{GHMAX} * \sum_{irest=0 \text{ nao ativa}}^{NRE} (2a_{t,i,c,irest}^{GHMAX} EARM_{t,i} + b_{t,i,c,irest}^{GHMAX}) - \lambda_{t,i}^{MDSVC} * (2a_{t,i}^{DSVC} EARM_{t,i} + b_{t,i}^{DSVC}) +$$

$$\lambda_{t,i}^{MVZm} * (2a_{t,i}^{VZM} EARM_{t,i} + b_{t,i}^{VZM}) + \lambda_{t,i}^{\delta VZM} * (2a_{t,i}^{\delta VZM} EARM_{t,i} + b_{t,i}^{\delta VZM})$$

## Restrições Elétricas Internas ao REE

São tratadas ajustando-se a geração máxima do REE

Utilização das parábolas em cada estágio do cálculo da política e também da simulação final

$$GHMAX \left( EARM_{IREE}^{iper} \right)_{IREE}^{iper} = a_{GHM}^{iper,IREE} \left( EARM_{IREE}^{iper} \right)^2 + b_{GHM}^{iper,IREE} EARM_{IREE}^{iper} + c_{GHM}^{iper,IREE}$$

- $a_{GHM}^{iper,IREE}$ ,  $b_{GHM}^{iper,IREE}$  e  $c_{GHM}^{iper,IREE}$ : são os parâmetros da parábola de correção de GHMAX do REE *IREE* para o período *iper*;
- $EARM_{IREE}^{iper}$ : é o armazenamento do REE *IREE* no início do período *iper*.

Geração hidráulica máxima em um PL sem restrição elétrica interna ao REE

$$GHC_{iper,IREE,c} + GFIO L_{iper,IREE} \cdot FPENG_{iper,c} \leq GHMAX \left( EARM_{IREE}^{iper} \right)_{IREE}^{iper} \cdot FPENG_{iper,c}$$

**IREE = 1, NREE**  
**c = 1, NPMC**

# Restrições Elétricas Internas ao REE

- Uma parábola para cada restrição elétrica;
- Uma parábola para as usinas que não estão restritas a uma RE;

$$GHMAX \left( EARM_{IREE}^{iper,irest} \right)_{IREE}^{iper,irest} = a_{GHM}^{iper,IREE,irest} \left( EARM_{IREE}^{iper,irest} \right)^2 + b_{GHM}^{iper,IREE,irest} EARM_{IREE}^{iper,irest} + c_{GHM}^{iper,IREE,irest}$$

- O armazenamento para consulta a parábola é dado proporcionalmente a capacidade do conjunto de usinas em questão.

$$EARM_{IREE}^{iper,irest} = \left( \frac{EARM\_MAX_{IREE}^{iper,irest}}{EARM\_MAX_{IREE}^{iper}} \right) * EARM_{IREE}^{iper}$$

## Geração hidráulica máxima num PL com restrição elétrica interna ao REE

$$GHC_{iper,IREE,c} + GFIO L_{iper,IREE} \cdot FPENG_{iper,c} \leq CAPMAX_{IREE,c}^{iper}$$

IREE = 1, NREE  
c = 1, NPMC

$$CAPMAX_{IREE,c}^{iper} = GHMAX \left( EARM_{IREE}^{iper,irest=0} \right)_{IREE}^{iper,irest=0} + \sum_{irest=1}^{NRE} MIN \left( RE_{iper,c}^{iree,irest}, GHMAX \left( EARM_{IREE}^{iper,irest} \right)_{IREE}^{iper,irest} \right)$$



**OBRIGADO**

---

[newave@cepel.br](mailto:newave@cepel.br)

---



**Eletrobras**  
Cepel



MINISTÉRIO DE  
MINAS E ENERGIA

