



# **Desafios da Individualização Hidrelétrica**

Projeto SPARHTACUS II

Paulo Vitor Larroyd

## Projeto SPARHTACUS II

- Início
  - PD-0403-0035/2014 (Engie e associadas, Norus e LabPlan)
  - Viabilidade de resolução de problema com alta dimensionalidade

**SPARHTACUS - Stochastic Programming Algorithm for HydroThermal Allocation via CUTs and Sampling**

# Projeto SPARHTACUS II

- Desenvolvimento Atual
  - PD-7427-0318/2018 (Norte Energia S.A., Norus e LabPlan)
  - Objetivos
    - Desenvolver um modelo computacional de alto desempenho e grande porte de programação estocástica multiestágio linear inteira-mista, em que decisões eletroenergéticas sejam tomadas ao se tratar todas as etapas de planejamento do ONS de maneira integrada
      - Individualização da operação hidrelétrica em todo o horizonte
      - Acoplamento estático ou dinâmico entre modelos
      - Inclusão de todas restrições do DECOMP
      - Inclusão das principais restrições operativas do DESSEM
      - Integração nativa dos Decks oficiais
      - Robustez, confiabilidade e auditabilidade dos cálculos
      - Modelo acadêmico de pré-despacho com unit commitment hidráulico
      - Utilização de solvers comerciais e gratuitos
    - Aprimorar
      - A sinalização econômica de curto e médio prazo
      - A resposta operacional de curtíssimo prazo
      - A transparência das decisões dos modelos

## Projeto SPARHTACUS II

- Desenvolvimento Atual
  - PD-7427-0318/2018 (Norte Energia S.A., Norus e LabPlan)
  - Desafios
    - Reprodutibilidade das soluções primais e duais
    - Problemas de alta dimensionalidade ainda são difíceis e demorados de se resolver
    - Como escalonar o paralelismo nos algoritmos de solução para uso massivo de processamento *on demand*
    - Algumas informações não são detalhadas da documentação oficial
    - Alguns dados dos modelos oficiais não podem ser lidos (por exemplo: cortes)
    - Modelos com operações hidráulicas individualizadas e agregadas (REEs) possuem dinâmicas bastante distintas
      - Alguns dados fornecidos para operação agregada não fazem muito sentido na operação individualizada
    - Ausência de informações de restrições hidráulicas e elétricas no médio prazo
    - **Geração sintética de vazões afluentes incrementais de médio prazo possui algumas limitações**

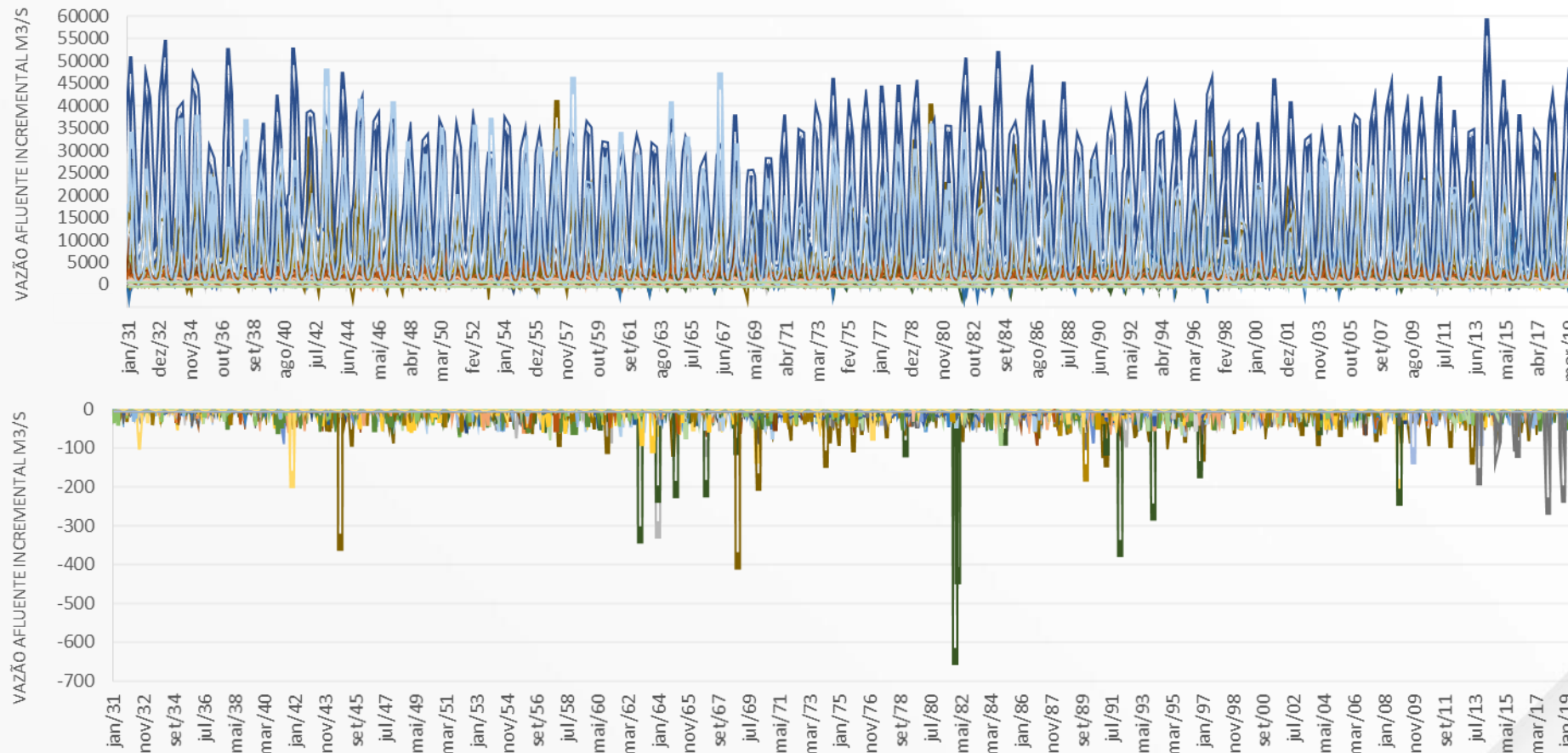
## Projeto SPARHTACUS II

- Desenvolvimento Atual
  - PD-7427-0318/2018 (Norte Energia S.A., Norus e LabPlan)
  - Abordagem SPARHTACUS
    - Um único modelo que pode ser instanciado em diferentes horizontes e configurações
    - Não garante reprodutibilidade de soluções primais e duais
    - Etapa de médio prazo com revisão anual e revisões mensais ou semanais
    - Etapa de médio prazo possui a configuração hidráulica do DECOMP
- Artigos técnicos voltados ao setor serão disponibilizados em [sparhtacus.com/blog](http://sparhtacus.com/blog)

# Desafios da Individualização Hidrelétrica

- Geração de vazão afluente incremental

Observações do Histórico



## Desafios da Individualização Hidrelétrica

- Geração de vazão afluente incremental
  - Modelo PAR Lognormal (Ordem 1)

$$y_p = f_p \cdot y_{p-1} + r_p$$

## Desafios da Individualização Hidrelétrica

- Geração de vazão afluente incremental
  - Modelo PAR Lognormal (Ordem 1)

$$\text{Afluência processo estocástico} \leftarrow \mathit{yp} = \mathit{fp} \cdot \mathit{yp}_{-1} + \mathit{rp} \longrightarrow \text{Realização do Resíduo Lognormal}$$

Coeficiente Linear Autocorrelação  $\uparrow$  Afluência **passada** processo estocástico  $\uparrow$



## Desafios da Individualização Hidrelétrica

- Geração de vazão afluente incremental
  - Modelo PAR Lognormal (Ordem 1)

$$\text{Afluência processo estocástico} \leftarrow y_p = f_p \cdot y_{p-1} + r_p \longrightarrow \text{Realização do Resíduo Lognormal}$$

Coeficiente Linear Autocorrelação  $\uparrow$  Afluência **passada** processo estocástico  $\uparrow$

Componente autorregressiva      Componente aleatória

## Desafios da Individualização Hidrelétrica

- Geração de vazão afluente incremental
  - Modelo PAR Lognormal (Ordem 1)

$$y_p = f_p \cdot y_{p-1} + r_p$$

$$y_h = r_h \cdot y_p - dh$$

## Desafios da Individualização Hidrelétrica

- Geração de vazão afluente incremental
  - Modelo PAR Lognormal (Ordem 1)

$$y_p = f_p \cdot y_{p-1} + r_p$$

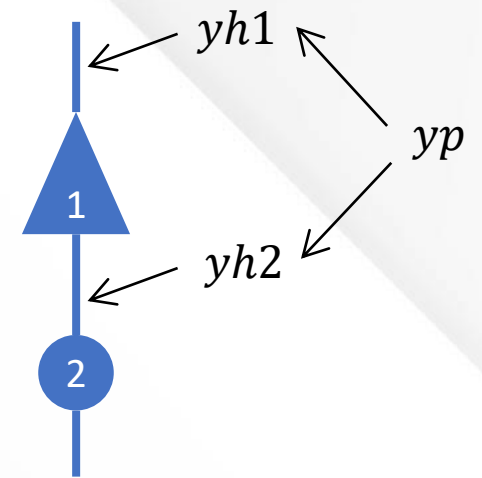
Afluência incremental  $\leftarrow$   $y_h = r_h \cdot y_p - d_h$   $\longrightarrow$  Grau de liberdade (Série  $\geq 1$ )



Fator de participação no processo estocástico

## Desafios da Individualização Hidrelétrica

- Exemplo **Truncamento**: Processo Estocástico por Bacia, PAR (0)



## Desafios da Individualização Hidrelétrica

- Exemplo **Truncamento**: Processo Estocástico por Bacia, PAR (0)

$$z_t(\mathbf{vi}) = \min ct_1 \cdot pt_1 + ct_2 \cdot pt_2 + ct_3 \cdot pt_3 + ct_4 \cdot pt_4$$

s.a:

$$0 \leq ptx \leq \overline{ptx},$$

$$0 \leq qhx \leq \overline{qhx},$$

$$0 \leq vf \leq \overline{vf},$$

$$pt_1 + pt_2 + pt_3 + pt_4 + qh_1 + qh_2 = pl,$$

$$vf + qh_1 + sh_1 - yh_1 - yhf_1 = vi,$$

$$qh_2 + sh_2 - yh_2 - yhf_2 - qh_1 - sh_1 = 0,$$

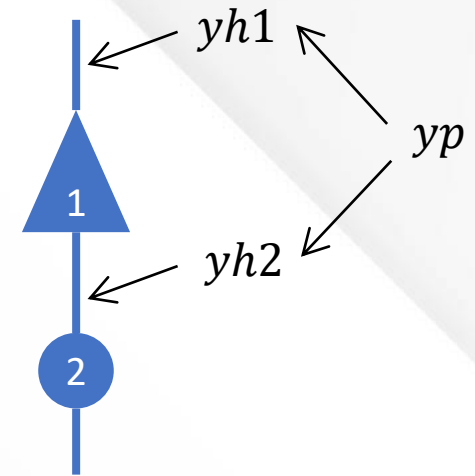
$$yh_1 - rh_1 \cdot yp = -dh_1,$$

$$yhf_1 = yhf_1^*,$$

$$yh_2 - rh_2 \cdot yp = -dh_2,$$

$$yhf_2 = yhf_2^*,$$

$$yp = rp.$$



## Desafios da Individualização Hidrelétrica

- Exemplo **Truncamento**: Processo Estocástico por Bacia, PAR (0)

$$z_t(\mathbf{vi}) = \min ct1 \cdot pt1 + ct2 \cdot pt2 + ct3 \cdot pt3 + ct4 \cdot pt4$$

s.a:

$$0 \leq ptx \leq \overline{ptx},$$

$$0 \leq qhx \leq \overline{qhx},$$

$$0 \leq vf \leq \overline{vf},$$

Atendimento Demanda

$$pt1 + pt2 + pt3 + pt4 + qh1 + qh2 = pl,$$

Balço Hídrico em 1

$$vf + qh1 + sh1 - yh1 - yhf1 = \mathbf{vi},$$

Balço Hídrico em 2

$$qh2 + sh2 - yh2 - yhf2 - qh1 - sh1 = 0,$$

Afluência em 1

$$yh1 - rh1 \cdot yp = -dh1,$$

Afluência Folga em 1

$$yhf1 = \mathbf{yhf1}^*,$$

Afluência em 2

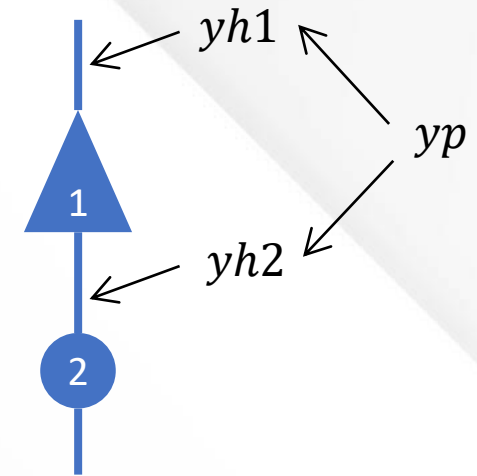
$$yh2 - rh2 \cdot yp = -dh2,$$

Afluência Folga em 2

$$yhf2 = \mathbf{yhf2}^*,$$

Afluência Proc. Estocástico

$$yp = rp.$$



## Desafios da Individualização Hidrelétrica

- Exemplo **Truncamento**: Processo Estocástico por Bacia, PAR (0)

$$z_t(\mathbf{vi}) = \min ct_1 \cdot pt_1 + ct_2 \cdot pt_2 + ct_3 \cdot pt_3 + ct_4 \cdot pt_4$$

s.a:

$$0 \leq ptx \leq \overline{ptx},$$

$$0 \leq qhx \leq \overline{qhx},$$

$$0 \leq vf \leq \overline{vf},$$

$yhf1^*, yhf2^*$  ← Problema de Viabilidade Hidráulica

$$VH(\mathbf{vi}) = \min c \cdot yhf1 + c \cdot yhf2$$

s.a:

$$0 \leq qhx \leq \overline{qhx},$$

$$vf + qh1 + sh1 - yh1 - yhf1 = \mathbf{vi},$$

$$qh2 + sh2 - yh2 - yhf2 - qh1 - sh1 = 0,$$

$$yh1 - rh1 \cdot yp = -dh1,$$

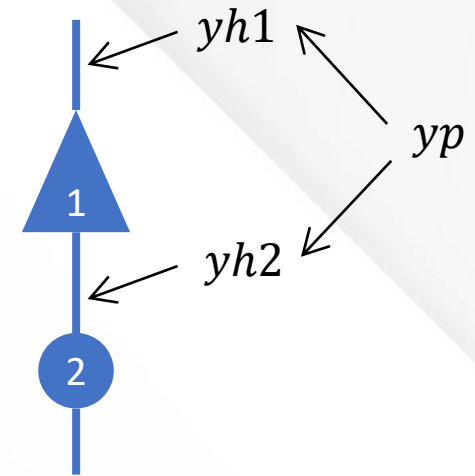
$$yh2 - rh2 \cdot yp = -dh2,$$

$$yp = rp,$$

$$vf = 0,$$

$$0 \leq yhf1 \leq -\min(yh1^*, 0),$$

$$0 \leq yhf2 \leq -\min(yh2^*, 0).$$



Atendimento Demanda

$$pt_1 + pt_2 + pt_3 + pt_4 + qh_1 + qh_2 = pl,$$

Balço Hídrico em 1

$$vf + qh_1 + sh_1 - yh_1 - yhf_1 = \mathbf{vi},$$

Balço Hídrico em 2

$$qh_2 + sh_2 - yh_2 - yhf_2 - qh_1 - sh_1 = 0,$$

Afluência em 1

$$yh_1 - rh_1 \cdot yp = -dh_1,$$

Afluência Folga em 1

$$yhf_1 = yhf_1^*,$$

Afluência em 2

$$yh_2 - rh_2 \cdot yp = -dh_2,$$

Afluência Folga em 2

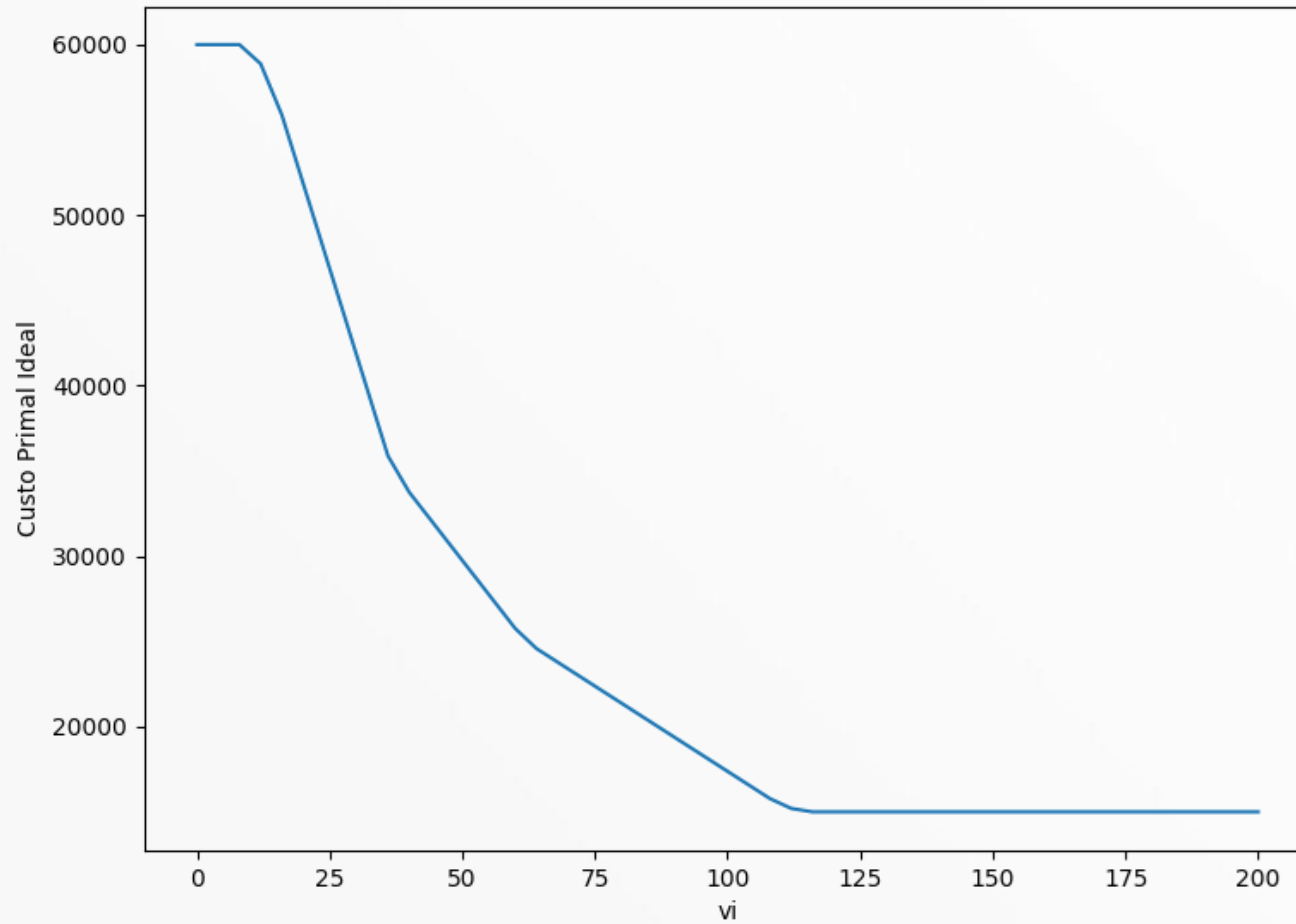
$$yhf_2 = yhf_2^*,$$

Afluência Proc. Estocástico

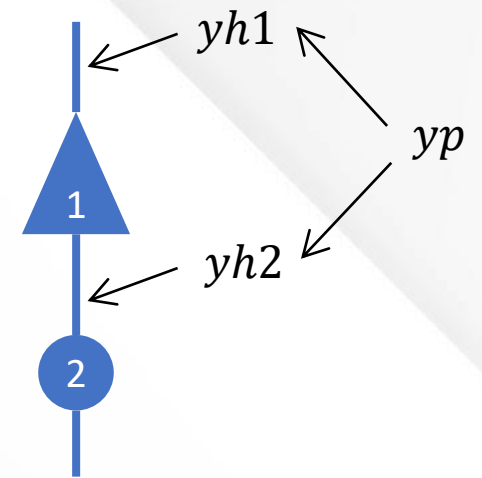
$$yp = rp.$$

## Desafios da Individualização Hidrelétrica

- Exemplo **Truncamento**: Processo Estocástico por Bacia, PAR (0)



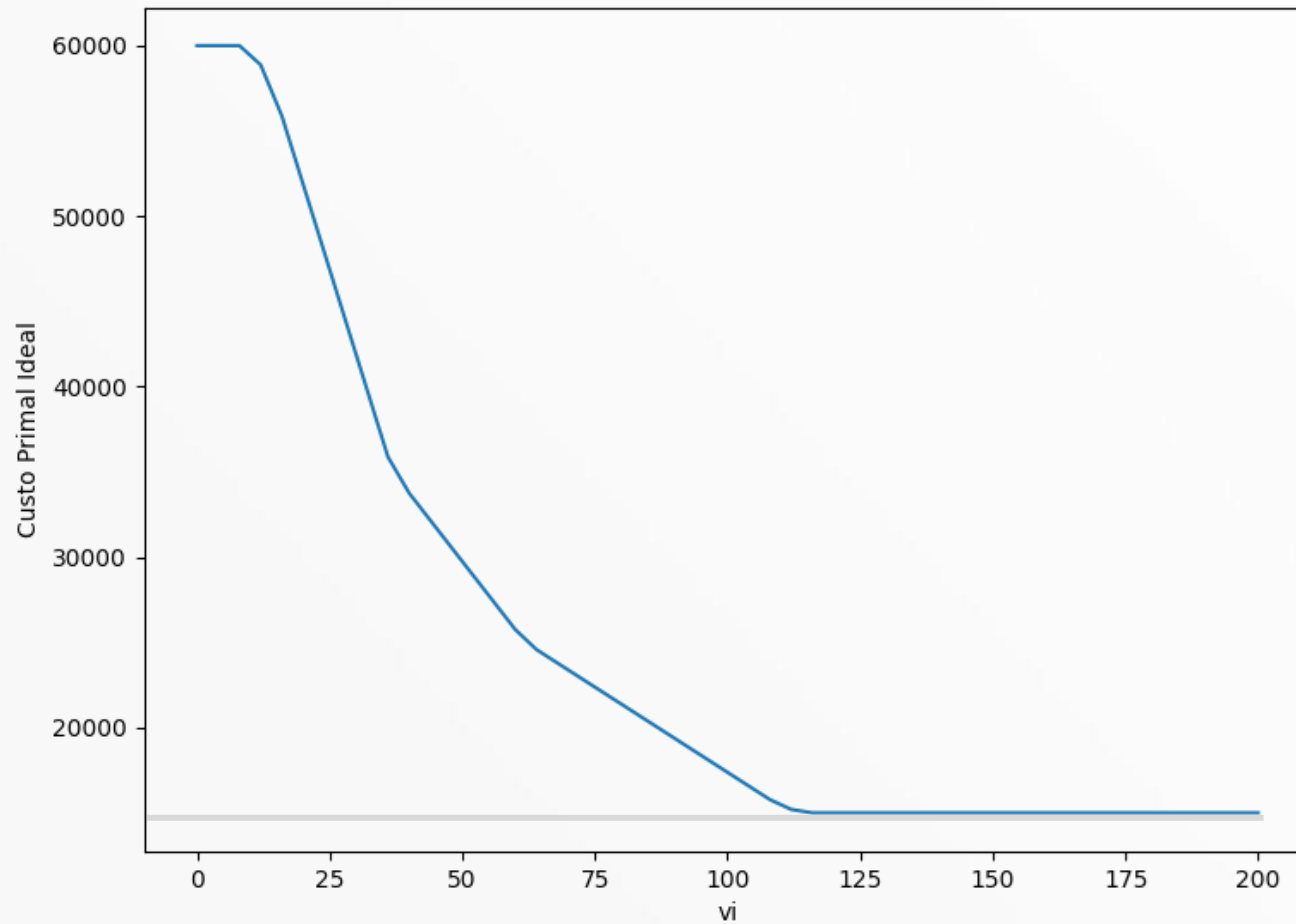
[www.sparhtacus.com](http://www.sparhtacus.com)



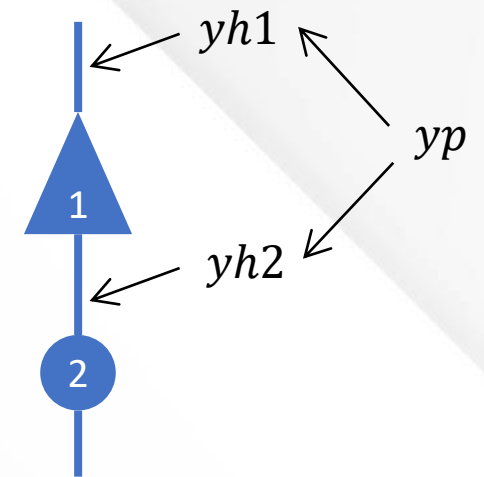


## Desafios da Individualização Hidrelétrica

- Exemplo **Truncamento**: Processo Estocástico por Bacia, PAR (0)

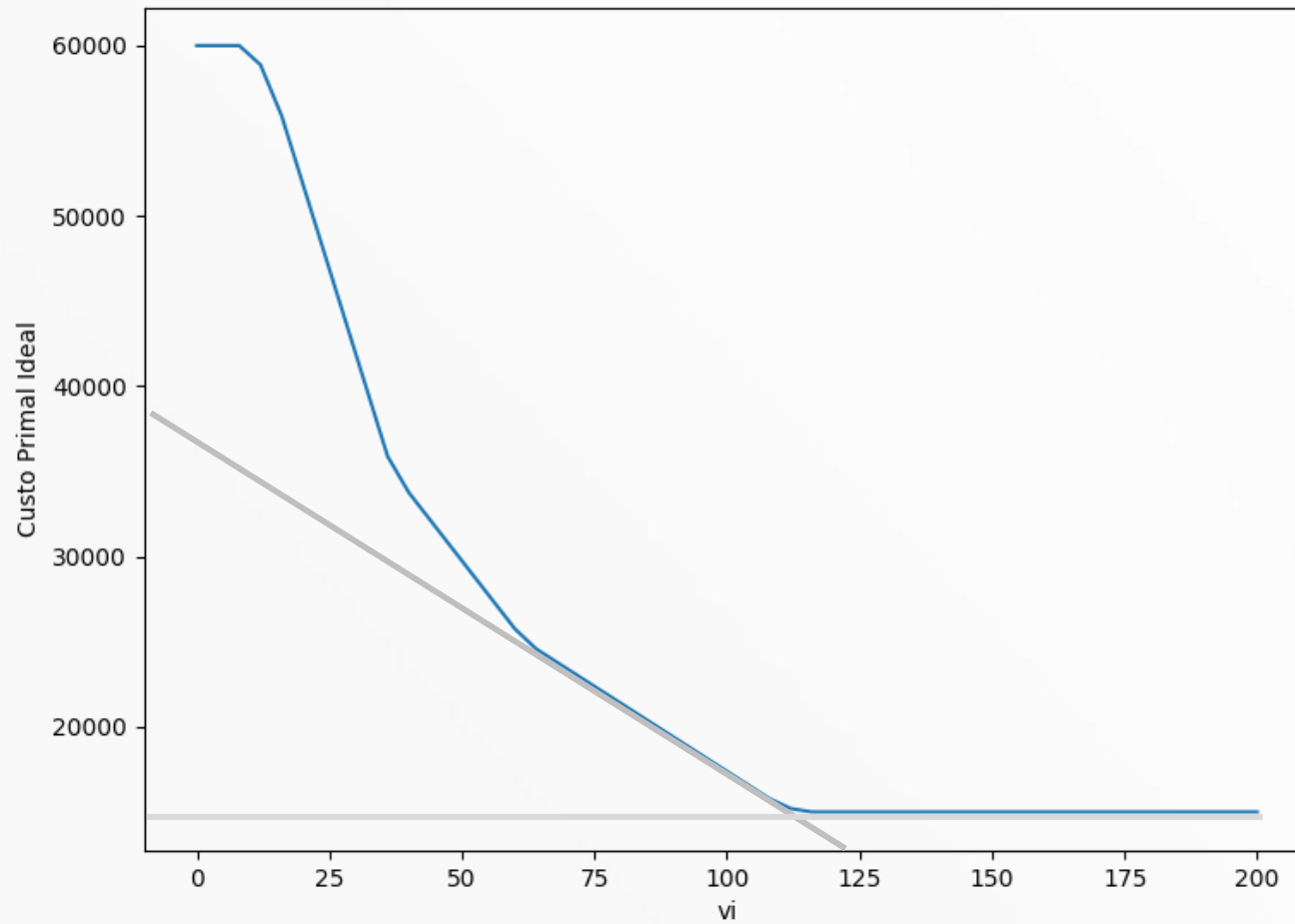


[www.sparhtacus.com](http://www.sparhtacus.com)

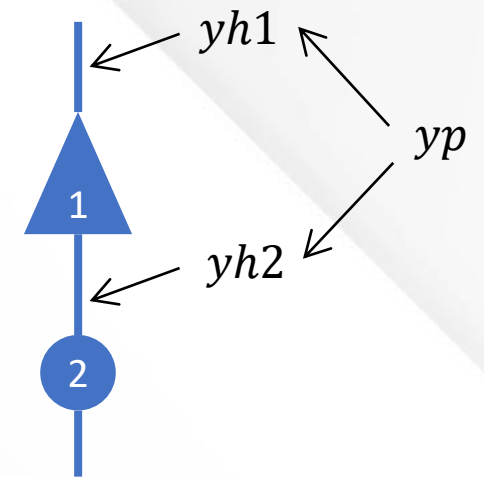


## Desafios da Individualização Hidrelétrica

- Exemplo **Truncamento**: Processo Estocástico por Bacia, PAR (0)

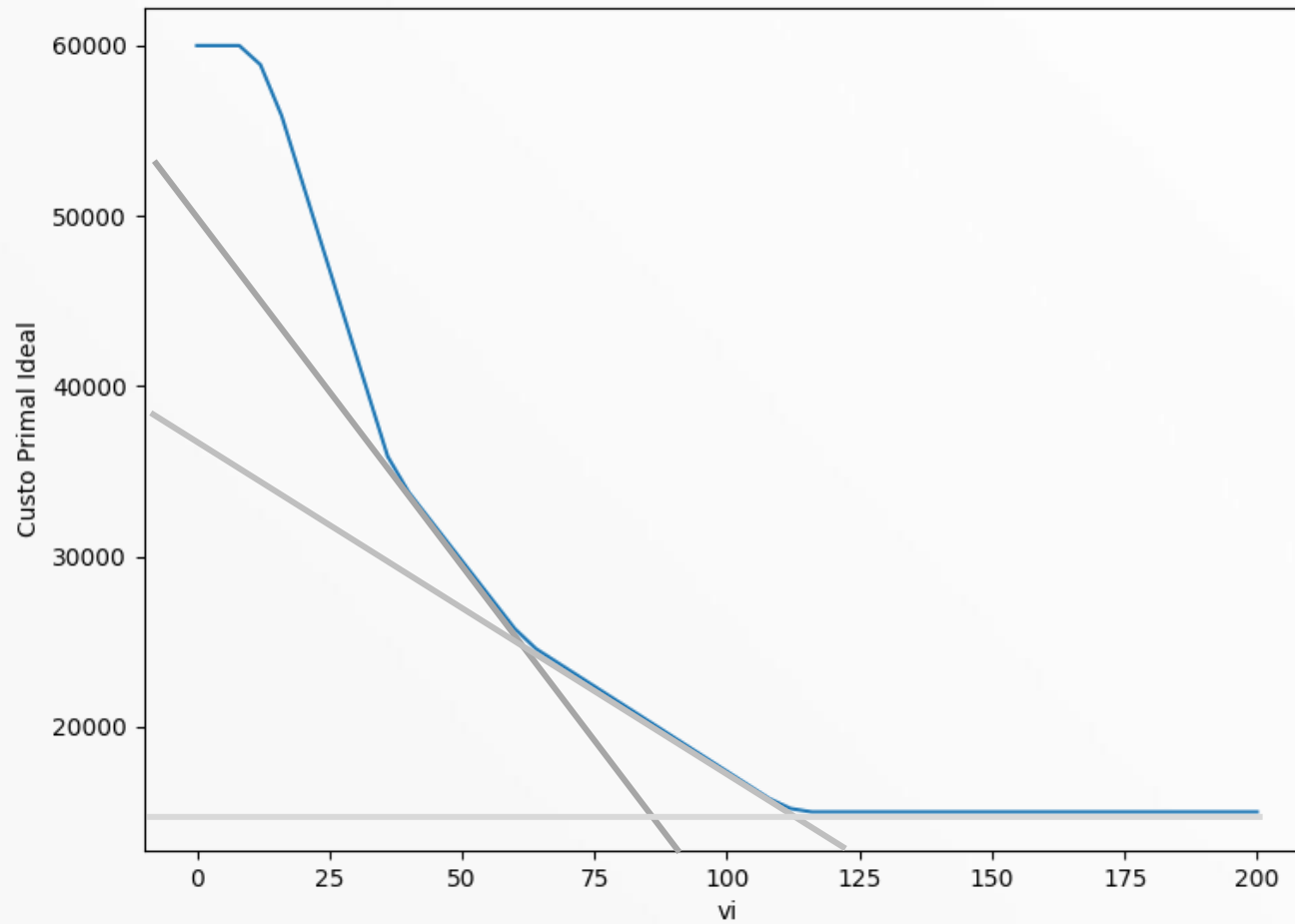


[www.sparhtacus.com](http://www.sparhtacus.com)

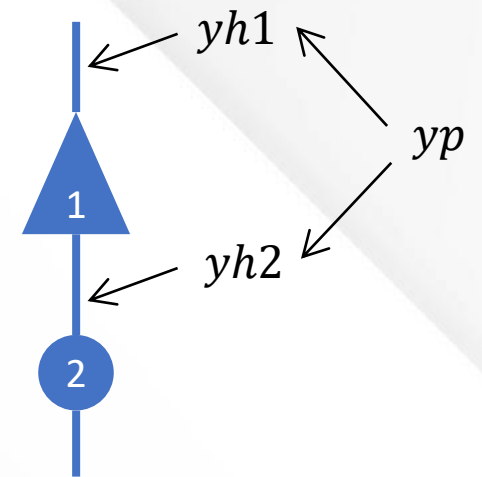


## Desafios da Individualização Hidrelétrica

- Exemplo **Truncamento**: Processo Estocástico por Bacia, PAR (0)

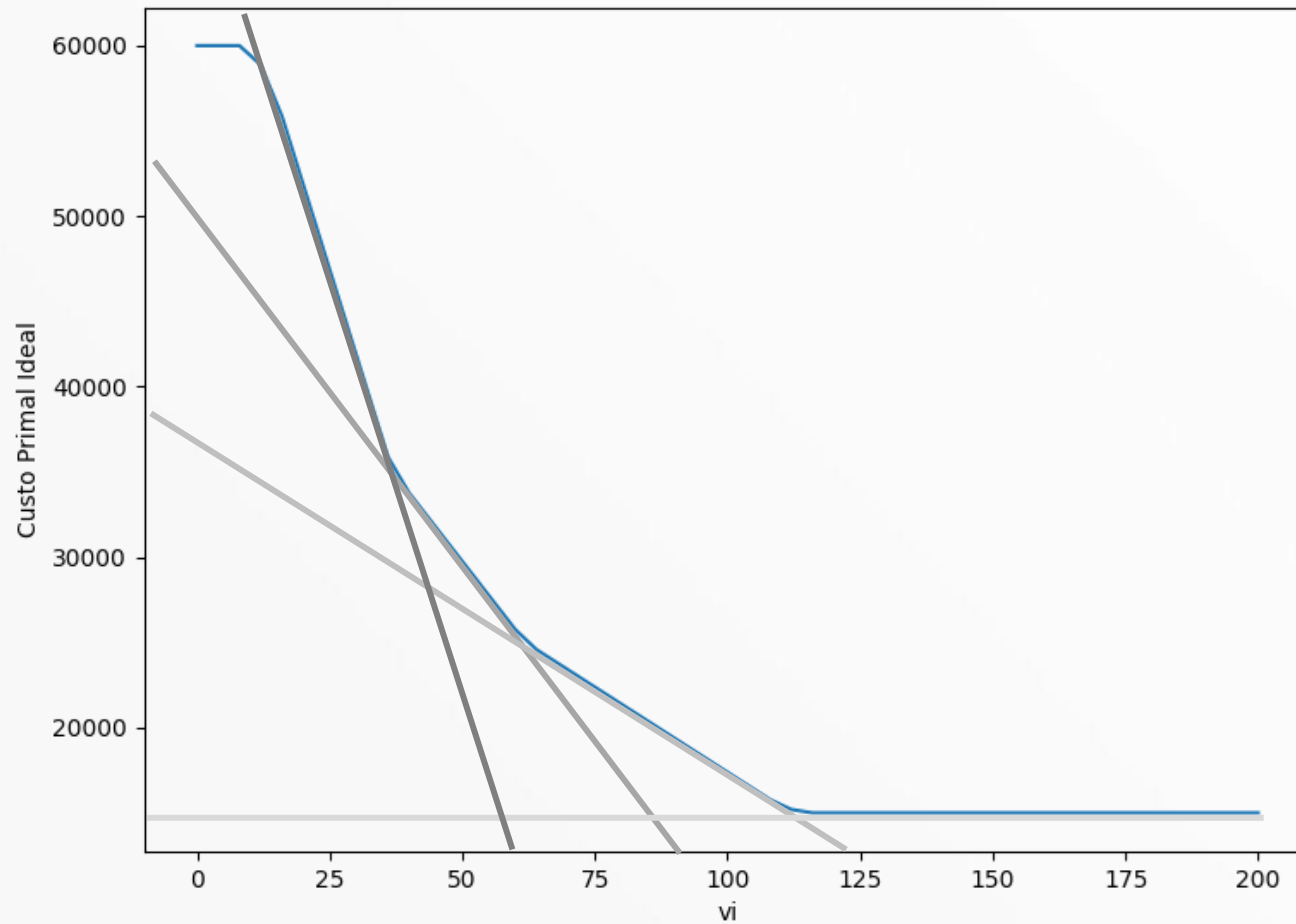


[www.sparhtacus.com](http://www.sparhtacus.com)

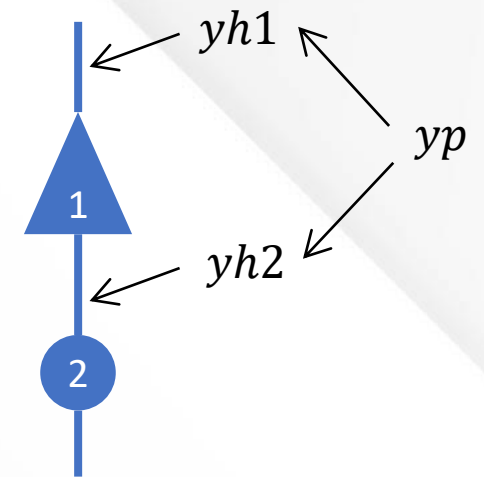


## Desafios da Individualização Hidrelétrica

- Exemplo **Truncamento**: Processo Estocástico por Bacia, PAR (0)

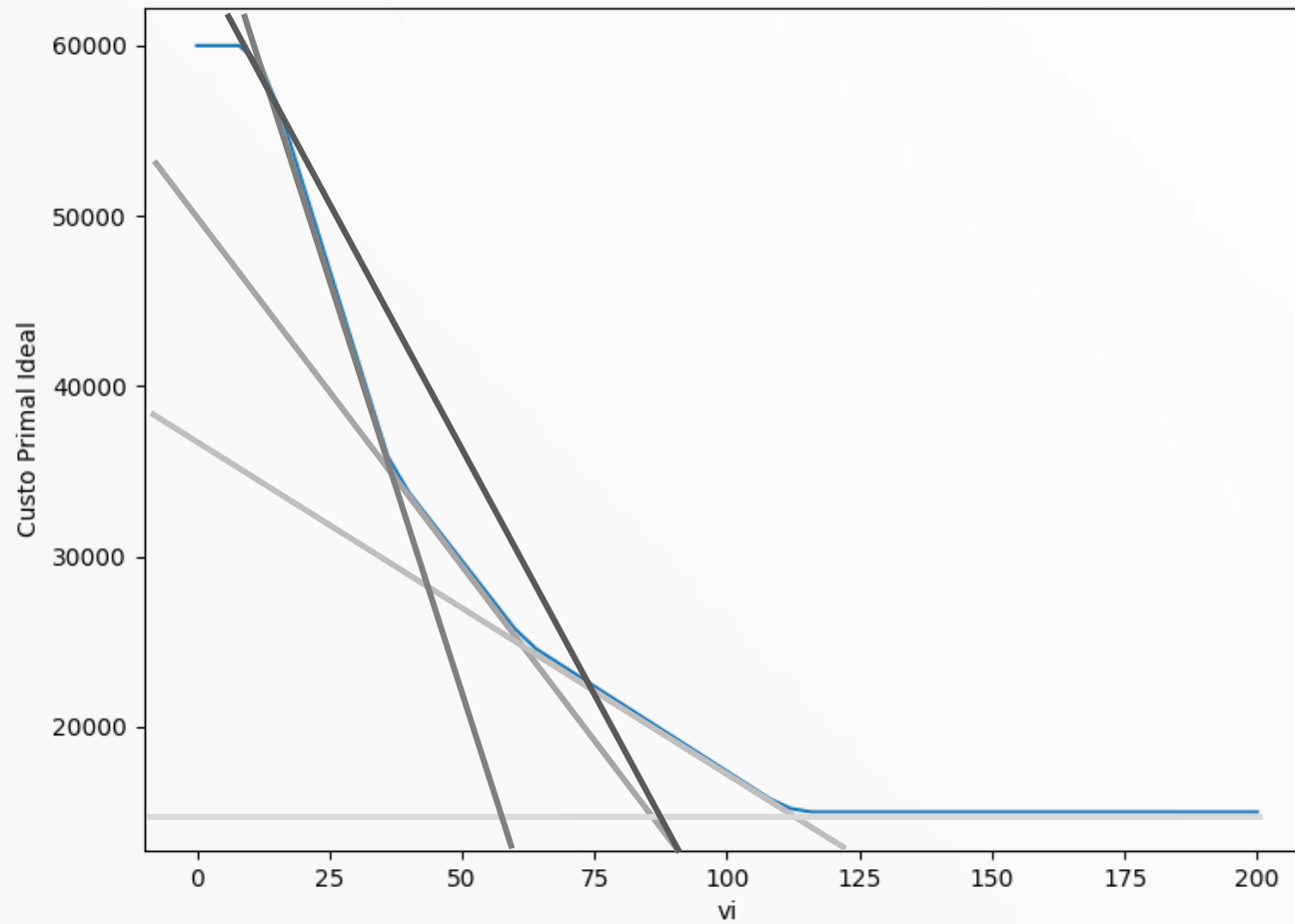


[www.sparhtacus.com](http://www.sparhtacus.com)

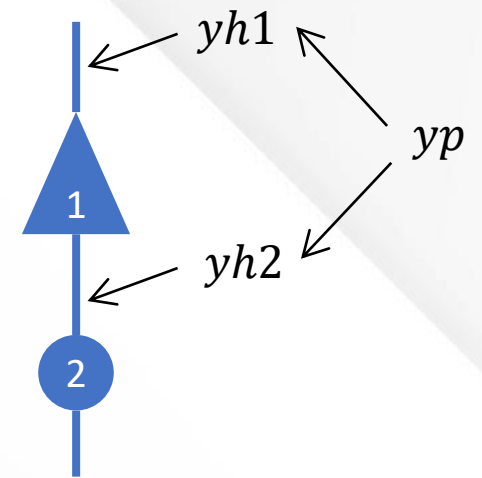


## Desafios da Individualização Hidrelétrica

- Exemplo **Truncamento**: Processo Estocástico por Bacia, PAR (0)



[www.sparhtacus.com](http://www.sparhtacus.com)



## Desafios da Individualização Hidrelétrica

- Exemplo **Truncamento**: Processo Estocástico por Bacia, PAR (0)

$$z_t(\mathbf{vi}) = \min ct_1 \cdot pt_1 + ct_2 \cdot pt_2 + ct_3 \cdot pt_3 + ct_4 \cdot pt_4$$

s.a:

$$0 \leq ptx \leq \overline{ptx}$$

$$0 \leq qhx \leq \overline{qhx}$$

$$0 \leq vf \leq \overline{vf}$$

$$pt_1 + pt_2 + pt_3 + pt_4 + qh_1 + qh_2 = pl$$

$$vf + qh_1 + sh_1 - yh_1 - yhf_1 = \mathbf{vi}$$

$$qh_2 + sh_2 - yh_2 - yhf_2 - qh_1 - sh_1 = 0$$

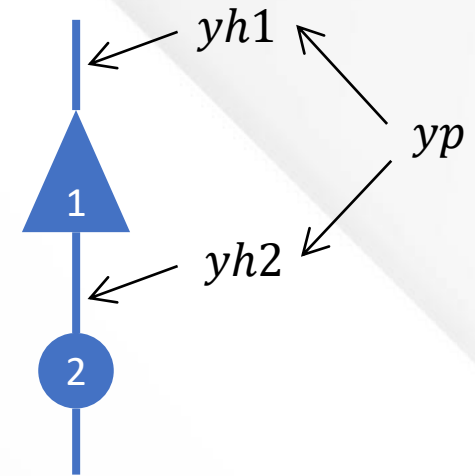
$$yh_1 - rh_1 \cdot yp = -dh_1$$

$$\begin{cases} yhf_1 = 0, & yh_1^* \geq 0 \\ yhf_1 = -yh_1^*, & yh_1^* < 0 \end{cases}$$

$$yh_2 - rh_2 \cdot yp = -dh_2$$

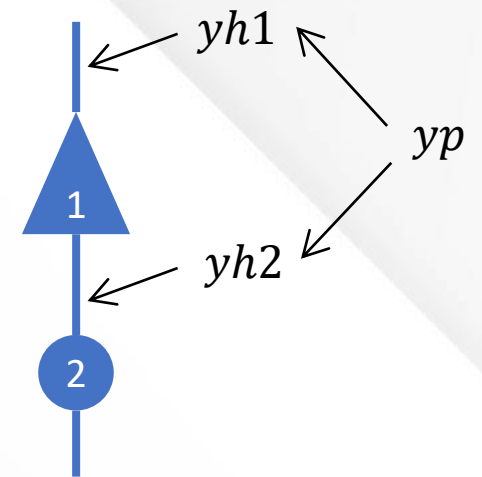
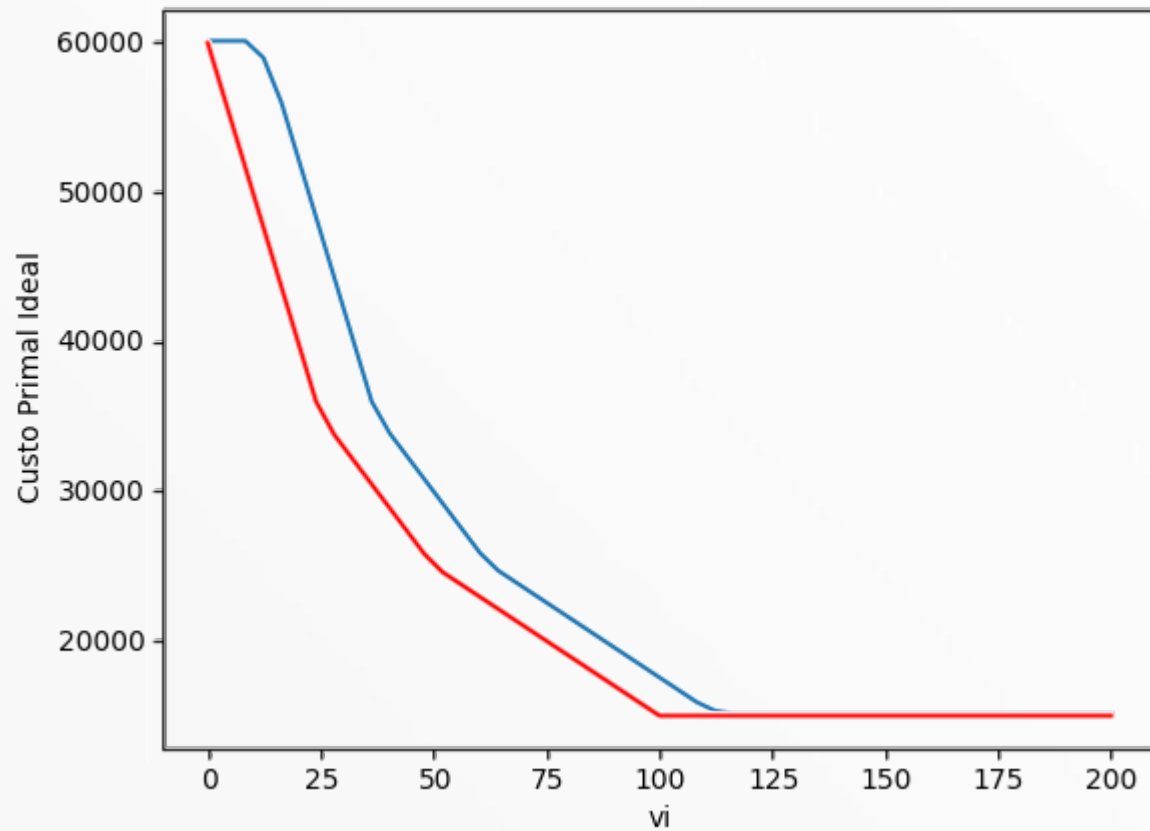
$$\begin{cases} yhf_2 = 0, & yh_2^* \geq 0 \\ yhf_2 = -yh_2^*, & yh_2^* < 0 \end{cases}$$

$$yp = rp$$



## Desafios da Individualização Hidrelétrica

- Exemplo **Truncamento**: Processo Estocástico por Bacia, PAR (0)



## Desafios da Individualização Hidrelétrica

- Exemplo **Truncamento**: Processo Estocástico por Bacia, **PAR (1)**

$$zt(\mathbf{vi}, \mathbf{yp}_{-1}) = \min ct1 \cdot pt1 + ct2 \cdot pt2 + ct3 \cdot pt3 + ct4 \cdot pt4$$

s.a:

$$0 \leq ptx \leq \overline{ptx}$$

$$0 \leq qhx \leq \overline{qhx}$$

$$0 \leq vf \leq \overline{vf}$$

$$pt1 + pt2 + pt3 + pt4 + qh1 + qh2 = \mathbf{pl}$$

$$vf + qh1 + sh1 - yh1 - yhf1 = \mathbf{vi}$$

$$qh2 + sh2 - yh2 - yhf2 - qh1 - sh1 = 0$$

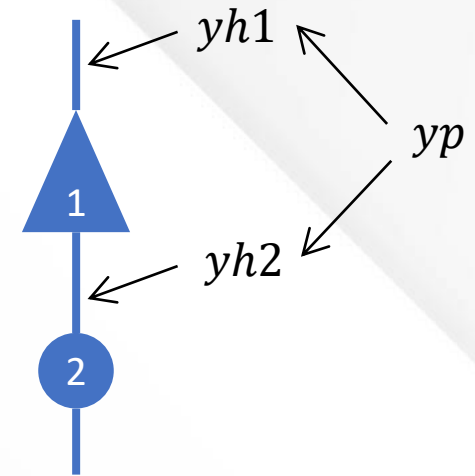
$$yh1 - rh1 \cdot yp = -\mathbf{dh1}$$

$$\begin{cases} yhf1 = 0, & \mathbf{yh1}^* \geq 0 \\ yhf1 = -\mathbf{yh1}^*, & \mathbf{yh1}^* < 0 \end{cases}$$

$$yh2 - rh2 \cdot yp = -\mathbf{dh2}$$

$$\begin{cases} yhf2 = 0, & \mathbf{yh2}^* \geq 0 \\ yhf2 = -\mathbf{yh2}^*, & \mathbf{yh2}^* < 0 \end{cases}$$

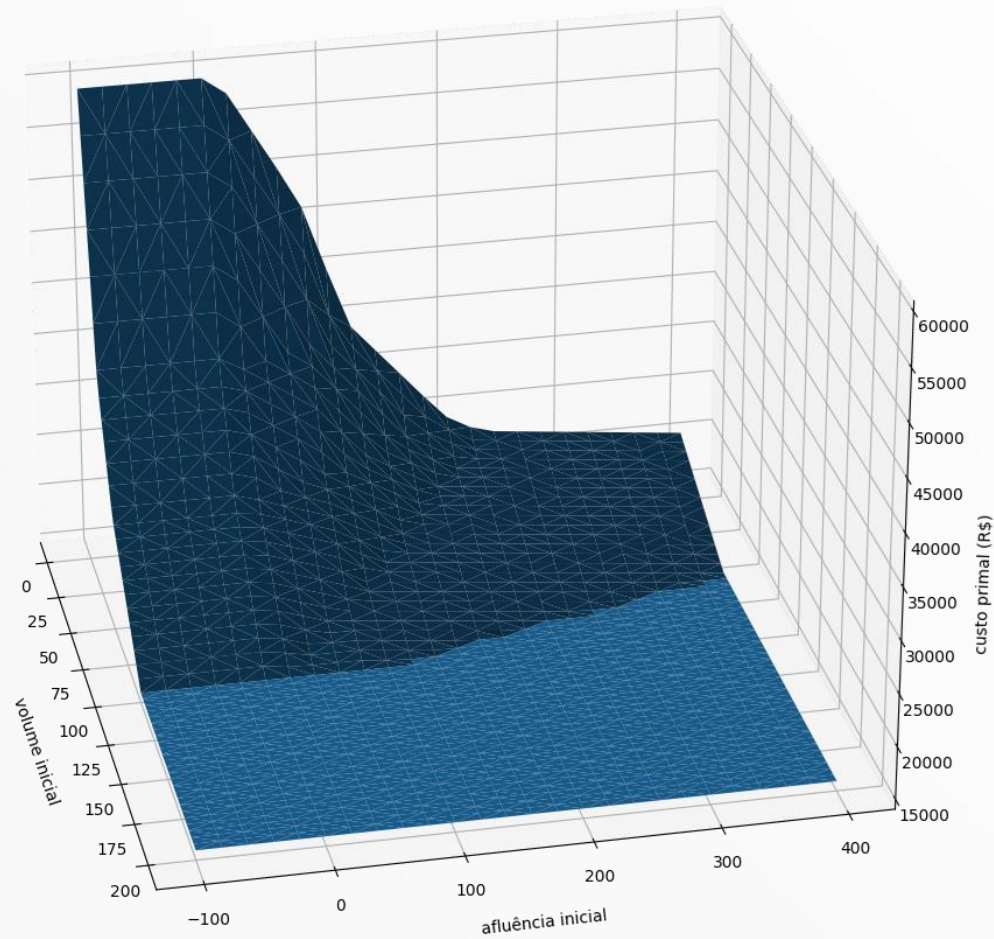
$$yp - fp \cdot \mathbf{yp}_{-1} = \mathbf{rp}$$



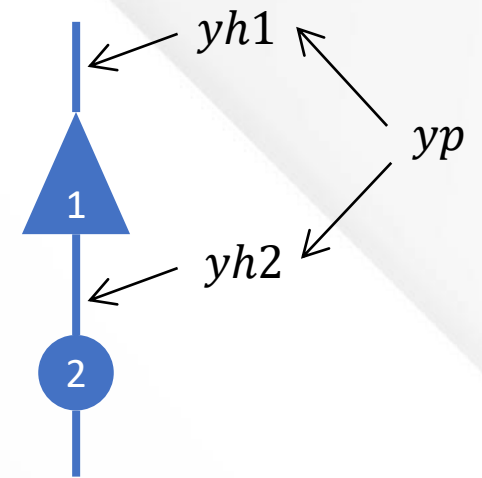


## Desafios da Individualização Hidrelétrica

- Exemplo **Truncamento**: Processo Estocástico por Bacia, **PAR (1)**



[www.sparhtacus.com](http://www.sparhtacus.com)



## Desafios da Individualização Hidrelétrica

- Exemplo **Truncamento**: Processo Estocástico por Bacia, **PAR (1)**

$$z_t(\mathbf{vi}, \mathbf{yp}_{-1}) = \min ct_1 \cdot pt_1 + ct_2 \cdot pt_2 + ct_3 \cdot pt_3 + ct_4 \cdot pt_4$$

s.a:

$$0 \leq ptx \leq \overline{ptx}$$

$$0 \leq qhx \leq \overline{qhx}$$

$$0 \leq v_f \leq \overline{v_f}$$

$$pt_1 + pt_2 + pt_3 + pt_4 + qh_1 + qh_2 = pl$$

$$v_f + qh_1 + sh_1 - yh_1 = \mathbf{vi}$$

$$qh_2 + sh_2 - yh_2 - qh_1 - sh_1 = 0$$

$$yh_1 - rh_1 \cdot ypr = -dh_1$$

$$yh_2 - rh_2 \cdot ypr = -dh_2$$

$$yp - fp \cdot \mathbf{yp}_{-1} = rp$$

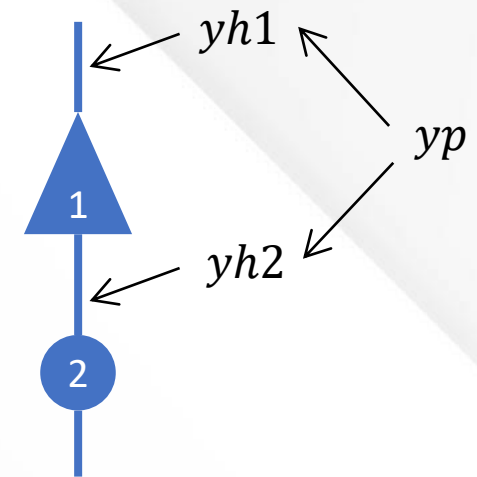
$$ypr - yp - ypf = 0$$

$$ypf = \mathbf{ypf}^*$$

$$\mathbf{ypf}^* = \max(\max(\mathbf{ypf}1, \mathbf{ypf}2) - \mathbf{yp}^*, 0)$$

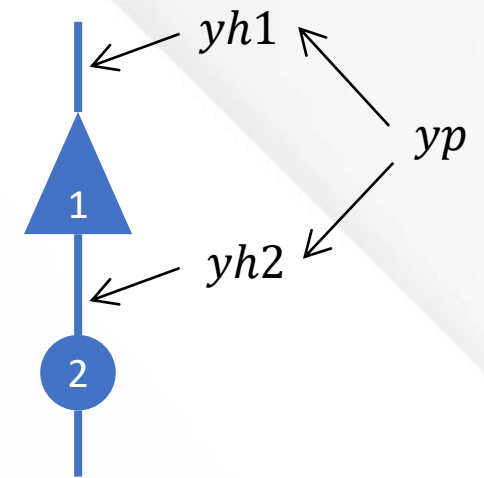
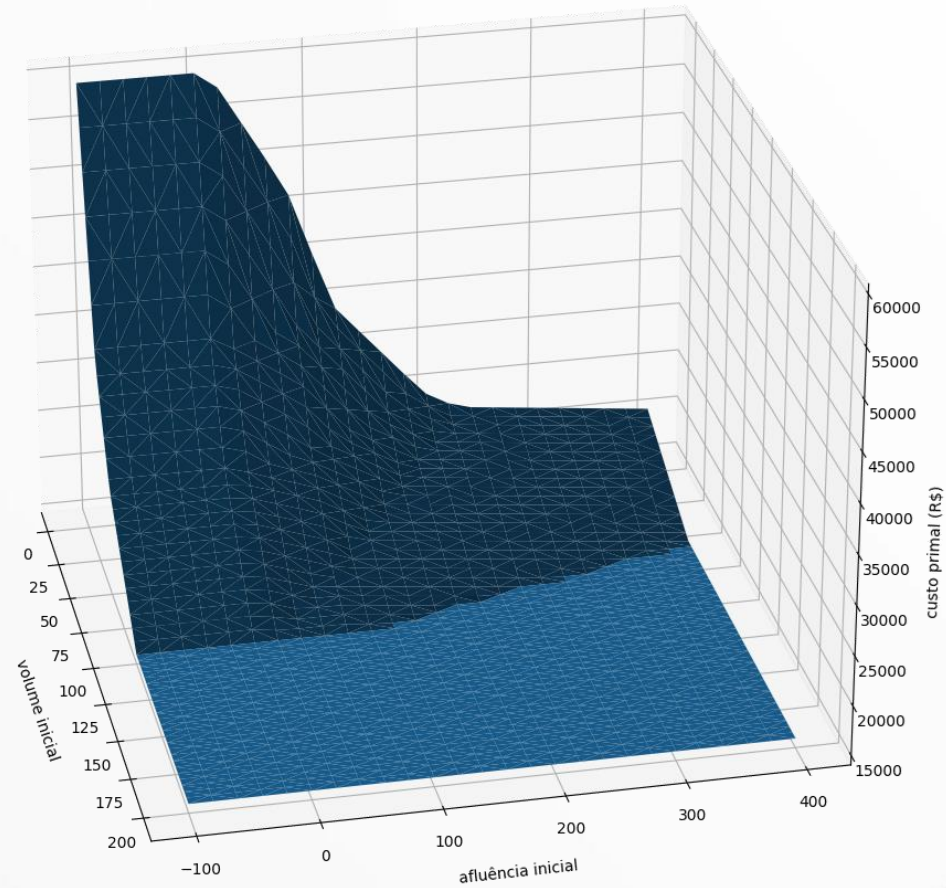
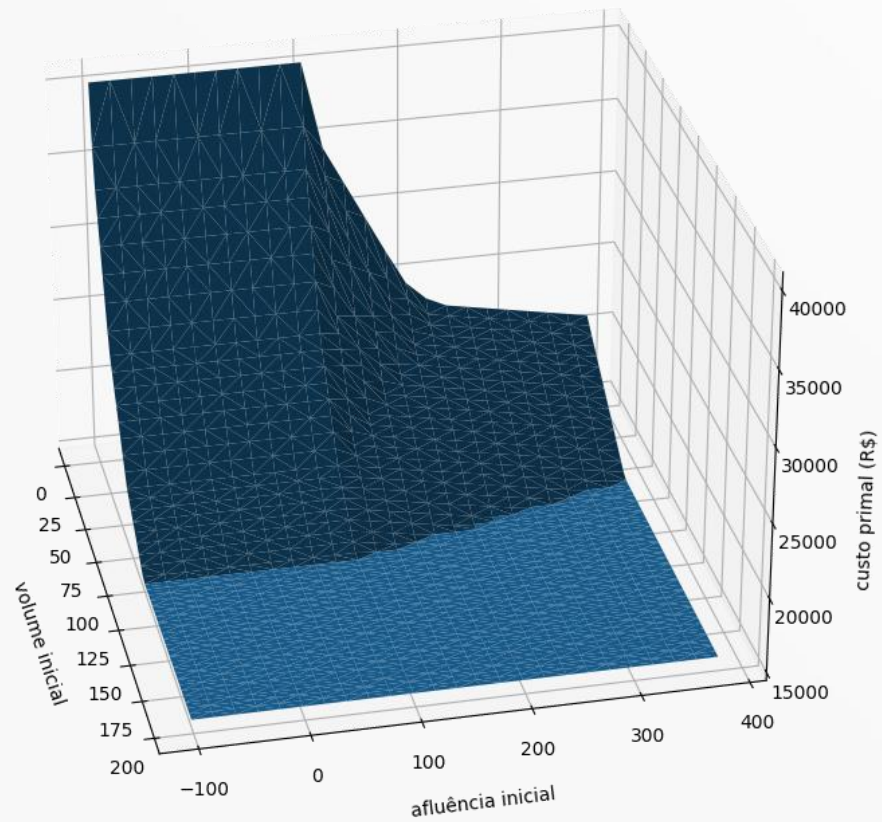
$$\mathbf{ypf}1 = dh_1 / rh_1$$

$$\mathbf{ypf}2 = dh_2 / rh_2$$



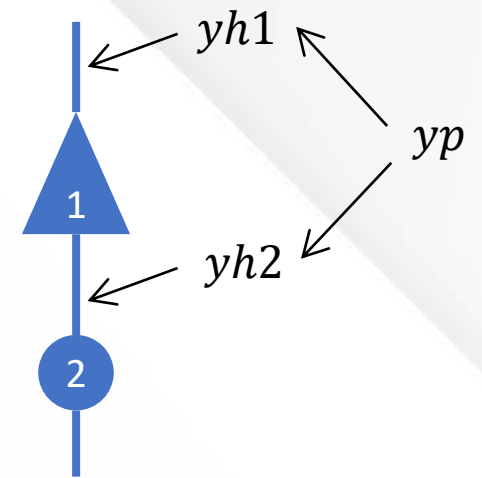
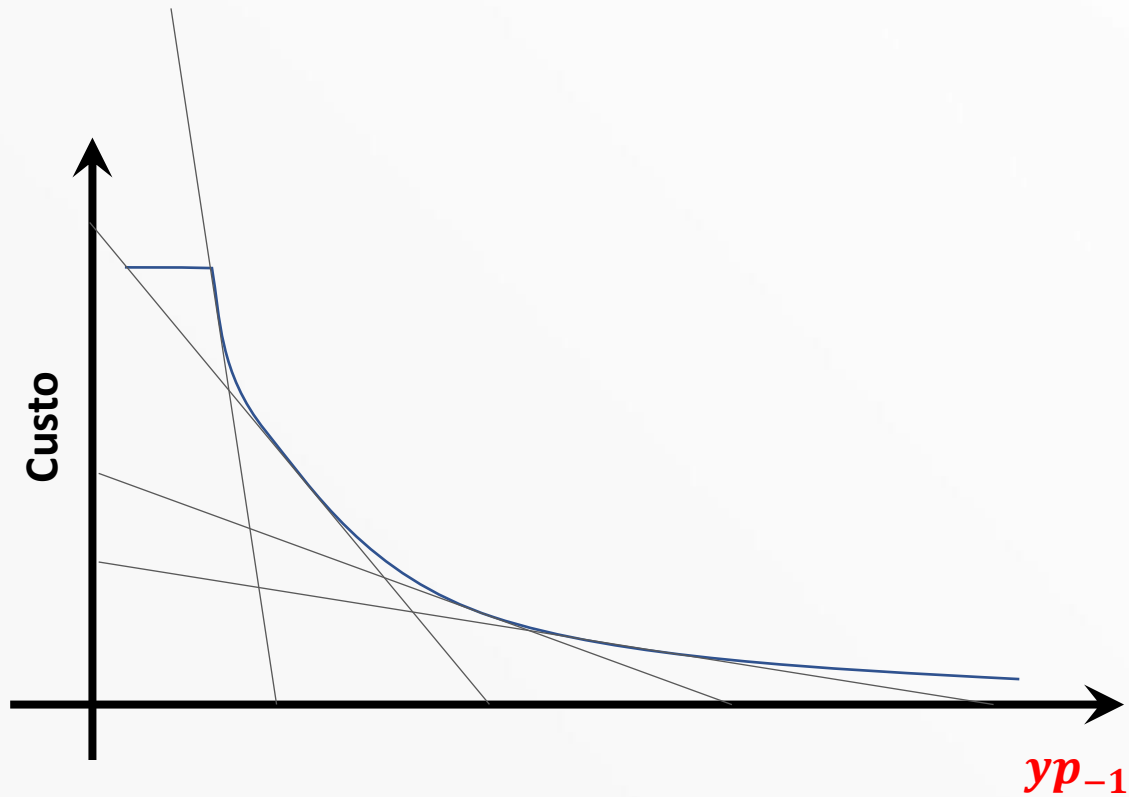
## Desafios da Individualização Hidrelétrica

- Exemplo **Truncamento**: Processo Estocástico por Bacia, **PAR (1)**



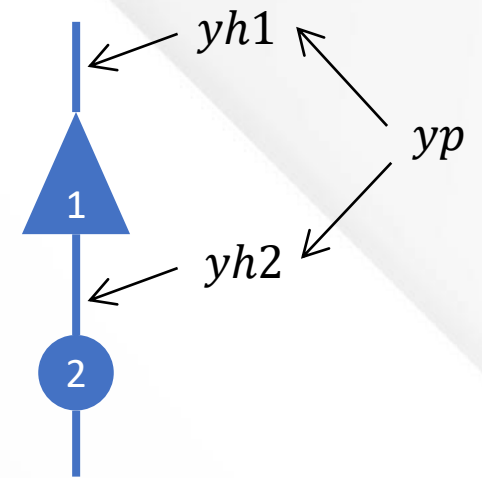
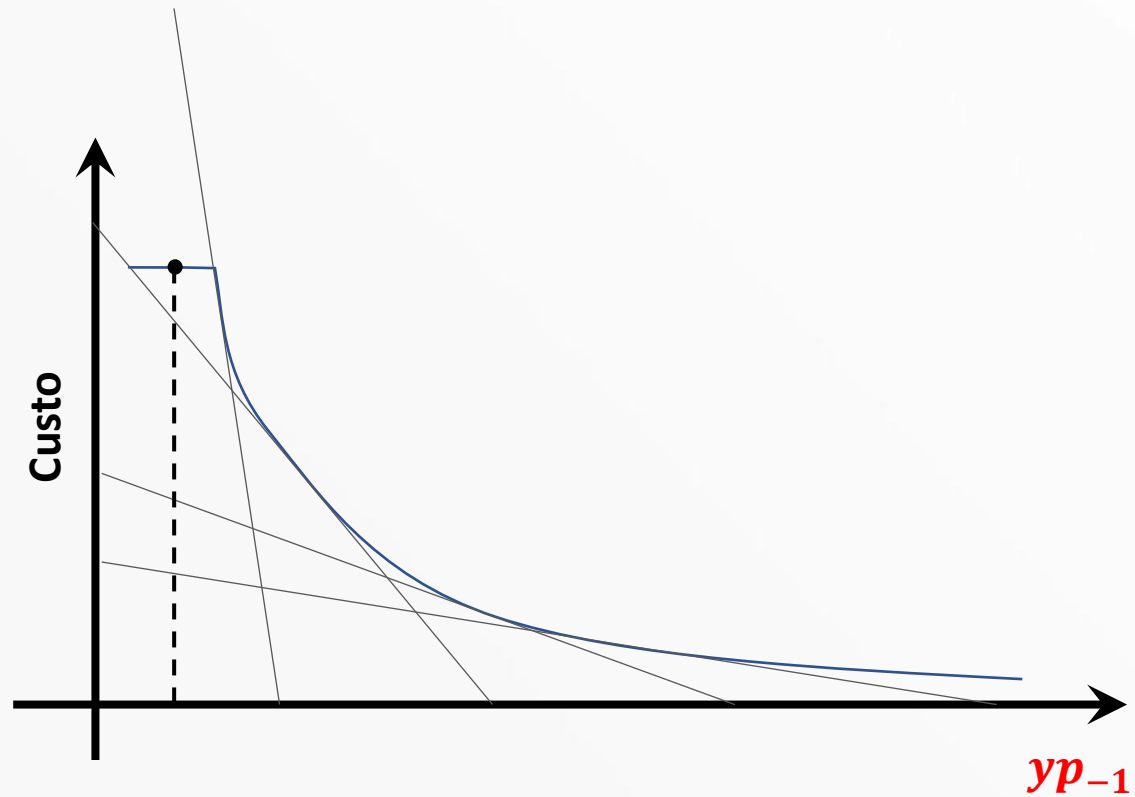
## Desafios da Individualização Hidrelétrica

- Exemplo **Truncamento**: Processo Estocástico por Bacia, **PAR (1)**



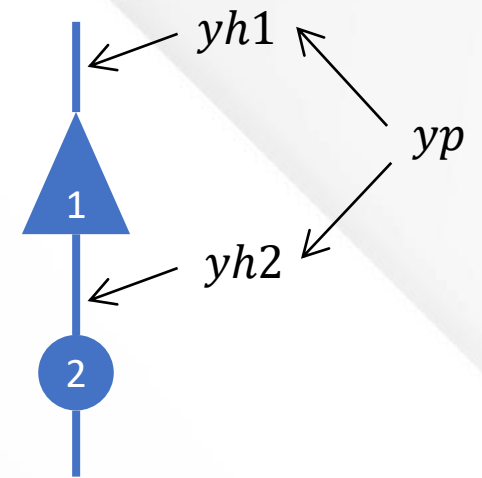
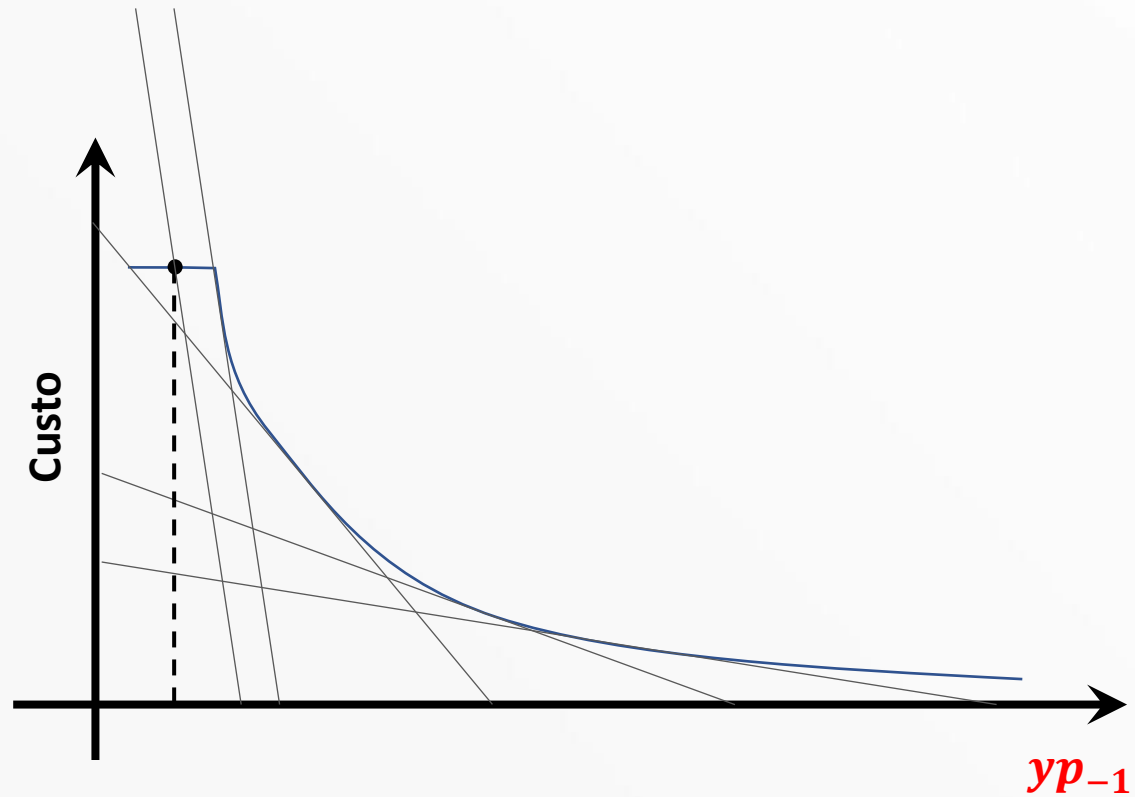
## Desafios da Individualização Hidrelétrica

- Exemplo **Truncamento**: Processo Estocástico por Bacia, **PAR (1)**



## Desafios da Individualização Hidrelétrica

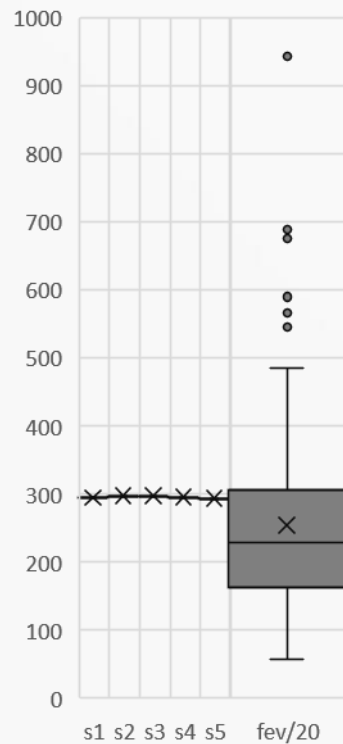
- Exemplo **Truncamento**: Processo Estocástico por Bacia, **PAR (1)**



## Desafios da Individualização Hidrelétrica

- CMO SE Jan/2020 rev0

### DECOMP

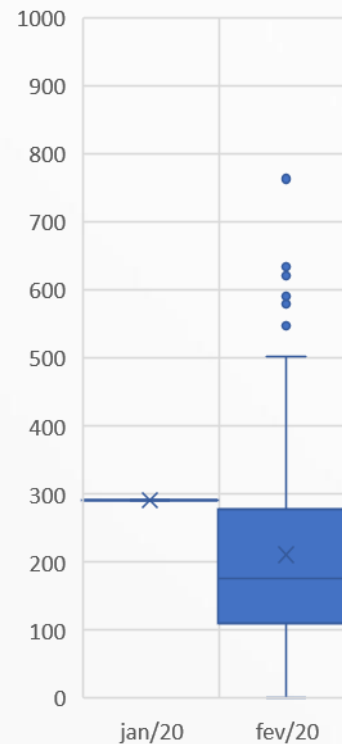


### SPT-MP

YP por UHE

Forward: Viabilidade Hidráulica

Backward: **Truncamento**

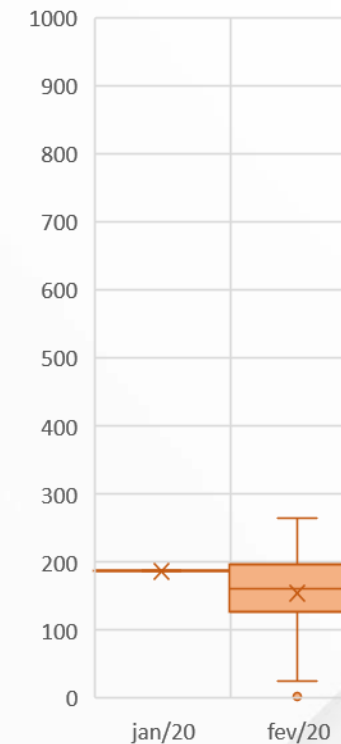


### SPT-MP

YP por UHE

Forward: Viabilidade Hidráulica

Backward: **Penalização**



**Norus**

**Obrigado!**