Série dos Seminários de Acompanhamento à Pesquisa

DEI
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA INDUSTRIAL

Número 42 | 09 2022

Otimização de bid de gerador hidroelétrico usando Regras de Decisão Linear

Autor:

Ana Beatriz Carvalho Werlang

PUC RIO

Motivação

- Um problema conhecido do setor elétrico é estimar o valor futuro da água e decidir se deve gerar com os recursos hídricos ou armazenar a água.
- Em um ambiente competitivo de mercados por oferta, os geradores devem desenvolver estratégias de bid (oferta) que maximizem suas receitas.

Objetivo e premissas de modelagem

Objetivo

- Definir um modelo para encontrar a oferta ideal de energia para uma usina hidrelétrica, de modo a:
    - **Maximizar o lucro esperado**
    - Garantir que a oferta é tecnicamente viável
- As **incertezas de preços e hidrologia** são introduzidas através de cenários.

Premissas

- O gerador é ***price taker*** e, portanto, seu bid não modifica os preços do mercado
    - Os preços de mercado são considerados variáveis exógenas
- O nível de produtividade não muda com o nível do reservatório

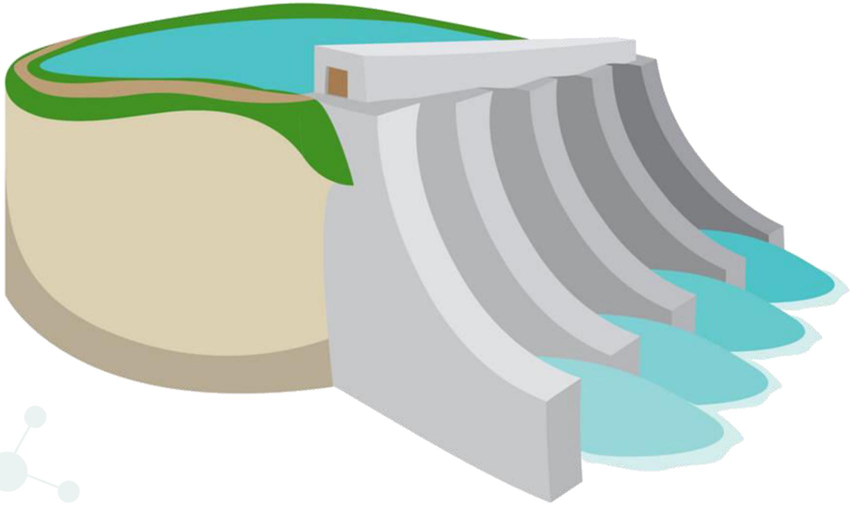
Modelagem

Cenários combinados

Vazão

Preços

Características do gerador



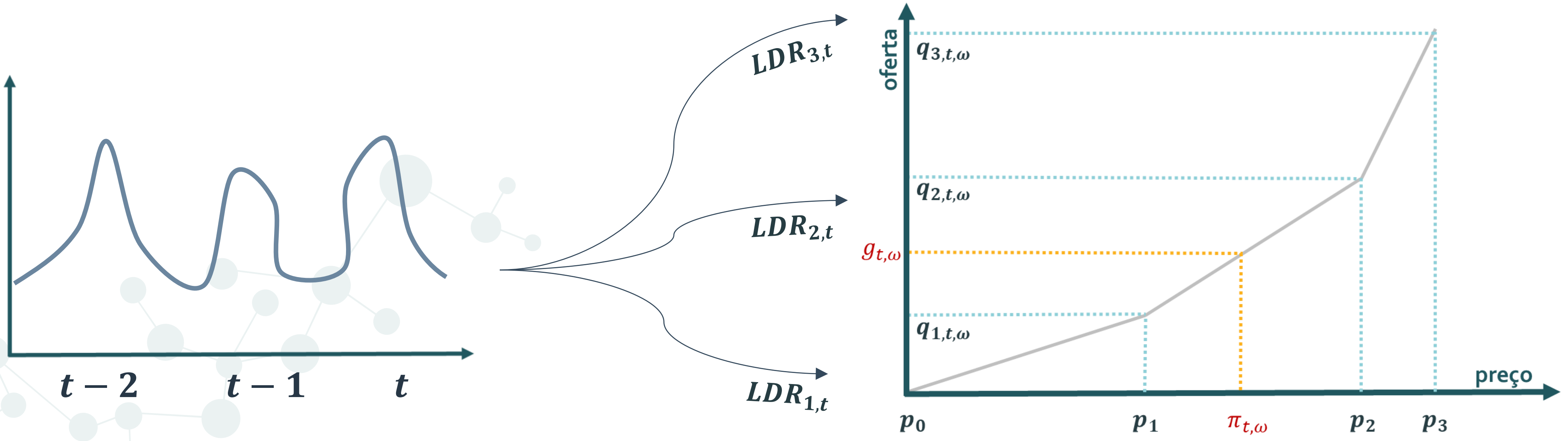
Bid ideal (quantidade)

Bids

Modelagem

- Para cada tempo t e cenário ω, estimamos uma curva de oferta q_i em função de uma LDR nos preços e afluências passadas. Então, para cada preço sorteado $\pi_{t,\omega}$ calculamos a geração $g_{t,\omega}$ em função da seguinte curva:

$$g_{t,\omega} = q_{i(\omega),t,\omega} + \frac{q_{i(\omega)+1,t,\omega} - q_{i(\omega),t,\omega}}{p_{i(\omega)+1} - p_{i(\omega)}} \left(\pi_{t,\omega} - p_{i(\omega)}\right)$$



Modelagem

Modelagem não regularizada

Estima benchmarks para normalização

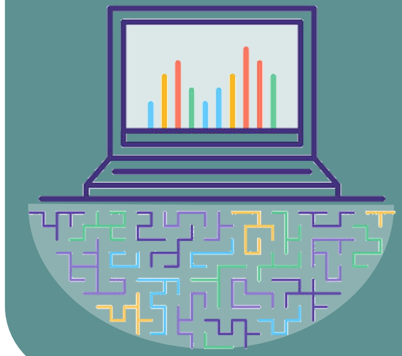
Política

500

cenários

Define a regra de decisão

Simulação



2,000

cenários

Testa a regra de decisão

Modelagem – Passo 1: Não-Regularizado

Função Objetivo

$$\max_{\Theta} \sum_{\omega \in \Omega} \sum_{t \in T} \pi_{t,\omega} * g_{t,\omega}$$

Modelagem – Passo 1: Não-Regularizado

Função Objetivo

$$\max_{\Theta} \sum_{\omega \in \Omega} \sum_{t \in T} \pi_{t,\omega} * g_{t,\omega}$$

Variáveis de Decisão em Θ

$g_{t,\omega} \geq 0$ é a geração/bid no tempo t e cenário ω

$v_{t,\omega} \geq 0$ é o volume de água no reservatório no tempo t e cenário ω

$u_{t,\omega} \geq 0$ é a liberação de água do reservatório para o gerador (turbinamento) no tempo t e cenário ω

$q_{i,t,\omega} \geq 0$ é a quantidade ofertada no tempo t e cenário ωpara a discretização *i*

$s_{t,\omega} \geq 0$ é o vertimento de água do reservatório no tempo t e cenário ω

$rev_{t,\omega} \geq 0$ é a receita do gerador no tempo t e cenário ω

$\alpha_{i,t}$ é a variável auxiliar LDR de intercepto para a discretização *i*

$\beta_{i,t,j}$ é a variável auxiliar LDR para o preço para a discretização *i*

$\gamma_{i,t,j}$ é a variável auxiliar LDR para a vazão para a discretização *i*

$\forall t \in \mathrm{T}, \forall \omega \in \Omega$

Modelagem – Passo 1: Não-Regularizado

Função Objetivo

$$\max_{\Theta} \sum_{\omega \,\epsilon\, \Omega} \sum_{t \,\epsilon\, T} \pi_{t,\omega} * g_{t,\omega}$$

Variáveis Auxiliares

ρ é a produtividade do gerador

V_{+} é o limite máximo de capacidade do reservatório

V_{-} é o limite mínimo de capacidade do reservatório

V_{i} é o nível inicial do reservatório

V_{f} é o nível final do reservatório

G_{+} é o limite máximo de geração

G_{-} é o limite mínimo de geração

U_{+} é o limite máximo de turbinamento

U_{-} é o limite mínimo de turbinamento

$\forall t \,\epsilon\, \mathrm{T}, \forall \omega \,\epsilon\, \Omega$

Modelagem – Passo 1: Não-Regularizado

Função Objetivo

$$\max_{\Theta} \sum_{\omega \in \Omega} \sum_{t \in T} \pi_{t,\omega} * g_{t,\omega}$$

Incerteza

P_ω é a probabilidade de cenário ω

$\pi_{t,\omega}$ é o preço do cenário ω no tempo t

$w_{t,\omega}$ é a vazão do cenário ω no tempo t

$\forall t \in \mathrm{T}, \forall \omega \in \Omega$

Modelagem – Passo 1: Não-Regularizado

Função Objetivo

$$\max_{\Theta} \sum_{\omega \,\epsilon\, \Omega} \sum_{t \,\epsilon\, T} \pi_{t,\omega} * g_{t,\omega}$$

Restrições

Volume inicial$(\boldsymbol{t}, \omega)$: $v_{0,\omega} = V_0$

Volume final$(\boldsymbol{t}, \omega)$: $v_{T,\omega} = V_f$

Volume máximo$(\boldsymbol{t}, \omega)$: $v_{t,\omega} \leq V_+$

Volume mínimo$(\boldsymbol{t}, \omega)$: $v_{t,\omega} \geq V_-$

Descarga máxima$(\boldsymbol{t}, \omega)$: $u_{t,\omega} \leq U_+$

Descarga mínima$(\boldsymbol{t}, \omega)$: $u_{t,\omega} \geq U_-$

Geração máxima$(\boldsymbol{t}, \omega)$: $g_{t,\omega} \leq G_+$

Geração mínima $(\boldsymbol{t}, \omega)$: $g_{t,\omega} \geq G_-$

$\forall t \,\epsilon\, \mathrm{T}, \forall \omega \,\epsilon\, \Omega$

Modelagem – Passo 1: Não-Regularizado

Função Objetivo

$$\max_{\Theta} \sum_{\omega \in \Omega} \sum_{t \in T} \pi_{t,\omega} * g_{t,\omega}$$

Restrições

Balanço hídrico(t,ω): $v_{t,\omega} = v_{t-1,\omega} + w_{t,\omega} - (u_{t,\omega} + s_{t,\omega})$

Linear Decision Rule$(\mathrm{i},\mathrm{t},\omega)$: $q_{i,t,\omega} = \alpha_{i,t} + \sum_{j\in[L]} (\beta_{i,t,j}\, \pi_{t-j,\omega} + \gamma_{i,t,j}\, w_{t-j,\omega})$

Geração hidro$(\boldsymbol{t},\omega)$: $g_{t,\omega} = q_{i(\omega),t,\omega} + \frac{q_{i(\omega)+1,t,\omega} - q_{i(\omega),t,\omega}}{p_{i(\omega)+1} - p_{i(\omega)}} (\pi_{t,\omega} - p_{i(\omega)})$

Geração hidro 2$(\boldsymbol{t},\omega)$: $g_{t,\omega} = \rho\, u_{t,\omega}$

Oferta crescente: $q_{i+1,t,\omega} \geq q_{i,t,\omega}$

Oferta inicial: $q_{1,t,\omega} = 0$

Oferta máxima: $q_{N,t,\omega} \leq G_{+}$

$\forall t \in \mathrm{T}, \forall \omega \in \Omega$

Modelagem – Passo 2: Política

Função Objetivo

$$\max_{\Theta} \frac{\sum_{\omega \in \Omega} \sum_{t \in T} \; \pi_{t,\omega} * g_{t,\omega}}{\Omega \, \overline{Rev_{nr}}} - \lambda_1 * (\lambda_2 \; * \; \sum_{i,t,j} aux\beta + \frac{1}{1+|\beta_{nr}|} + aux\gamma + (1-\lambda_2) * 0.5 \; * \sum_{i,t,j} aux\beta^2 + \frac{1}{1+|\beta_{nr}^2|} + aux\gamma^2)$$

Restrições

$\mathbf{Aux}\boldsymbol{\beta}(i,t,j)\text{:}\;\; aux\beta_{i,t,j} = |\beta_{i,t,j}|$

$\mathbf{Aux}\boldsymbol{\gamma}(i,t,j)\text{:}\;\; aux\gamma_{i,t,j} = |\gamma_{i,t,j}|$

$\forall t \in \mathrm{T}, \forall \omega \in \Omega$

Modelagem – Passo 3: Simulação

Função Objetivo

$$\max_{\Theta} \pi * g \; - \lambda_1 * \sum_i folga_i \; - \lambda_s \; * spill$$

Restrições

Para cada tempo t e cenário ω temos:

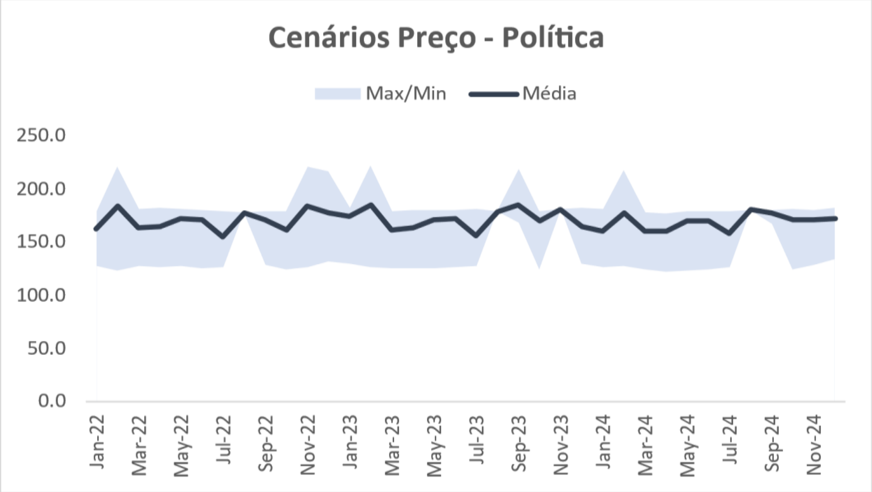
$\mathbf{Folga}(i)$: $folga_i = q_i \; - \alpha \; * \; \sum_{i,t,j} \beta_{opt} \; * \pi_{t-j,s} + \gamma_{opt} * ws_{t-j,s}$

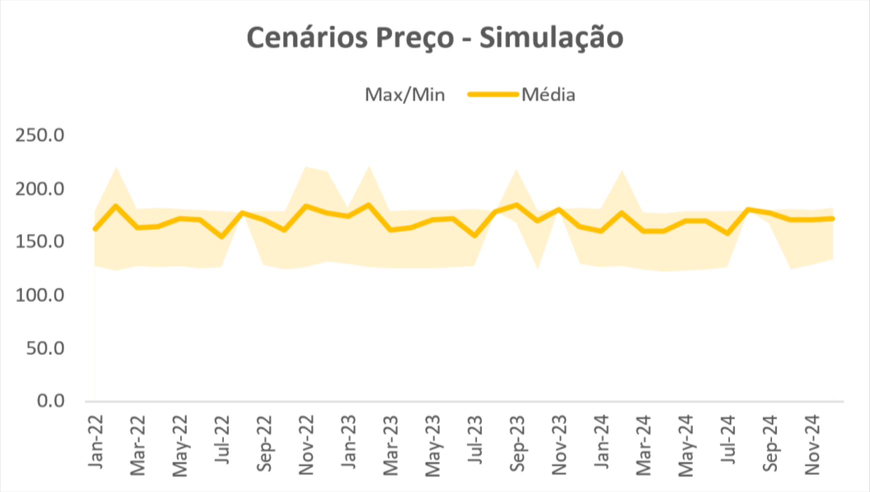
$\forall t \in \mathrm{T}, \forall \omega \in \Omega$

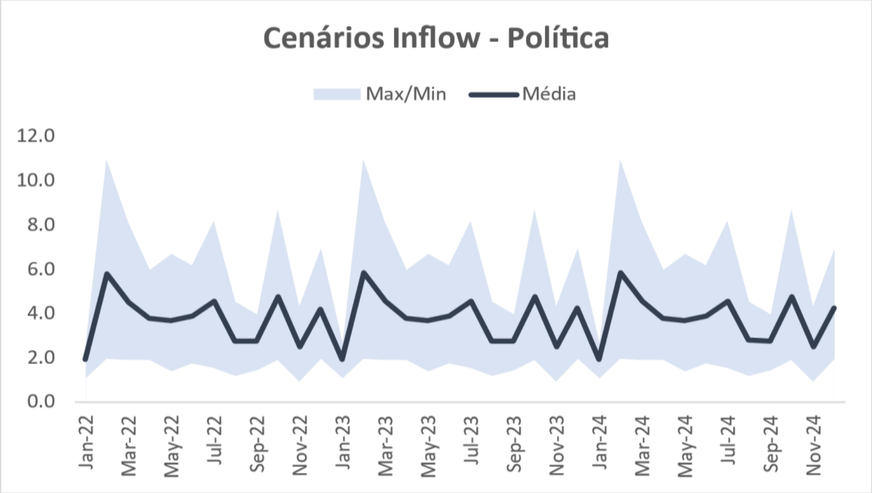
Modelagem – Exemplo

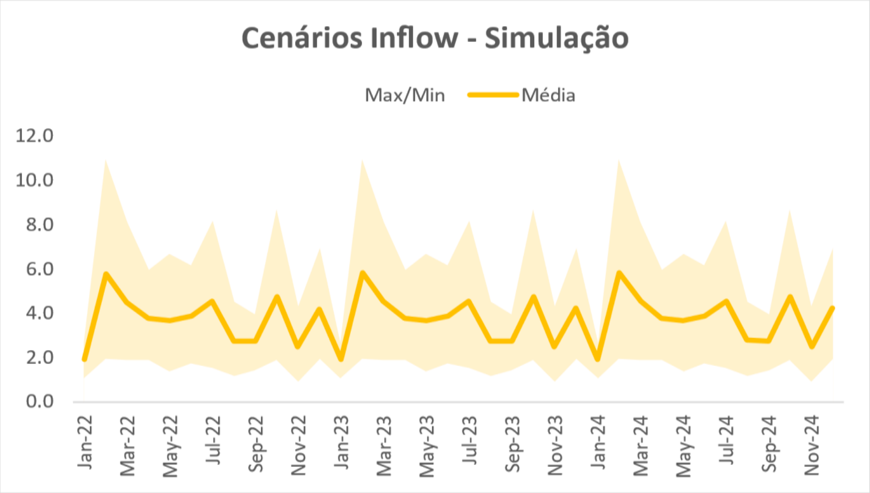
- Hidroelétrica 14 de Julho no Sul do Brazil
    - Capacidade instalada = 100 MW
    - V_+ = 55 h^3
    - V_- = 0 h^3
    - ρ = 1
    - Q_+ = G_+ = Capacidade instalada
    - V_0 = V_f = $\text{média}(V_-, V_+)$ = 22,5 h^3
- Análise do período de 3 ano em etapas mensais

Dados de entrada





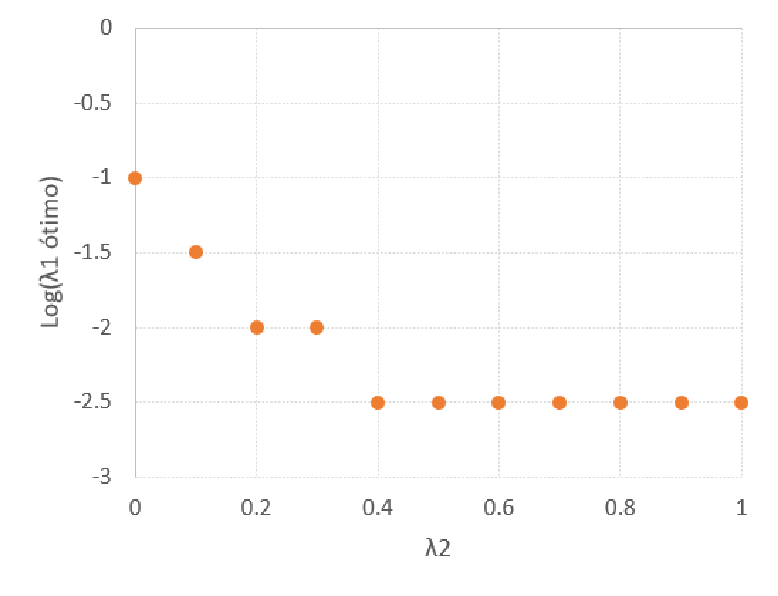


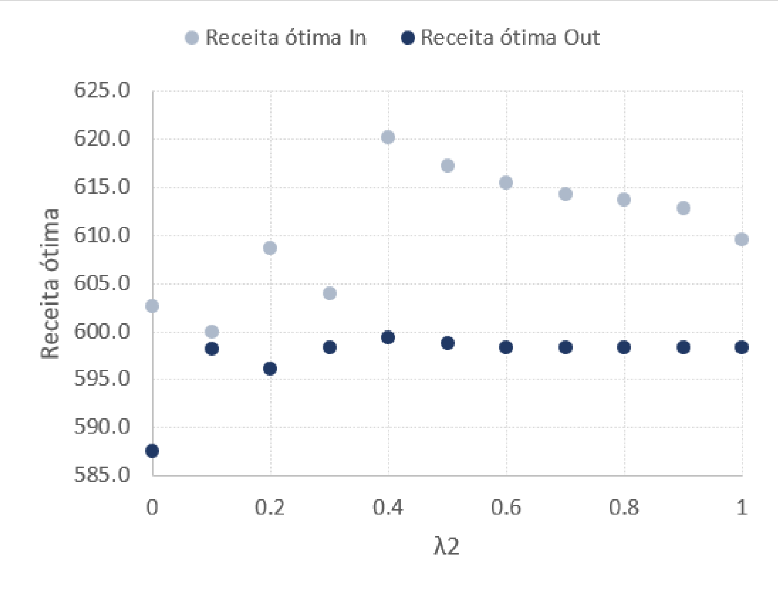


Testamos diferentes valores de λ_2

Testamos diferentes valores de λ_2 (ponderação da componente linear na fórmula de regularização quadrática) e encontramos o λ_1 (peso do componente de regularização) ótimo para ele:

λ_2	Log(λ_1 ótimo)	Receita ótima In	Receita ótima Out
0	-1	602.6	587.6
0.1	-1.5	599.9	598.3
0.2	-2	608.7	596.1
0.3	-2	604.0	598.3
0.4	-2.5	620.3	599.4
0.5	-2.5	617.3	598.8
0.6	-2.5	615.5	598.4
0.7	-2.5	614.3	598.4
0.8	-2.5	613.8	598.4
0.9	-2.5	612.8	598.4
1	-2.5	609.6	598.3

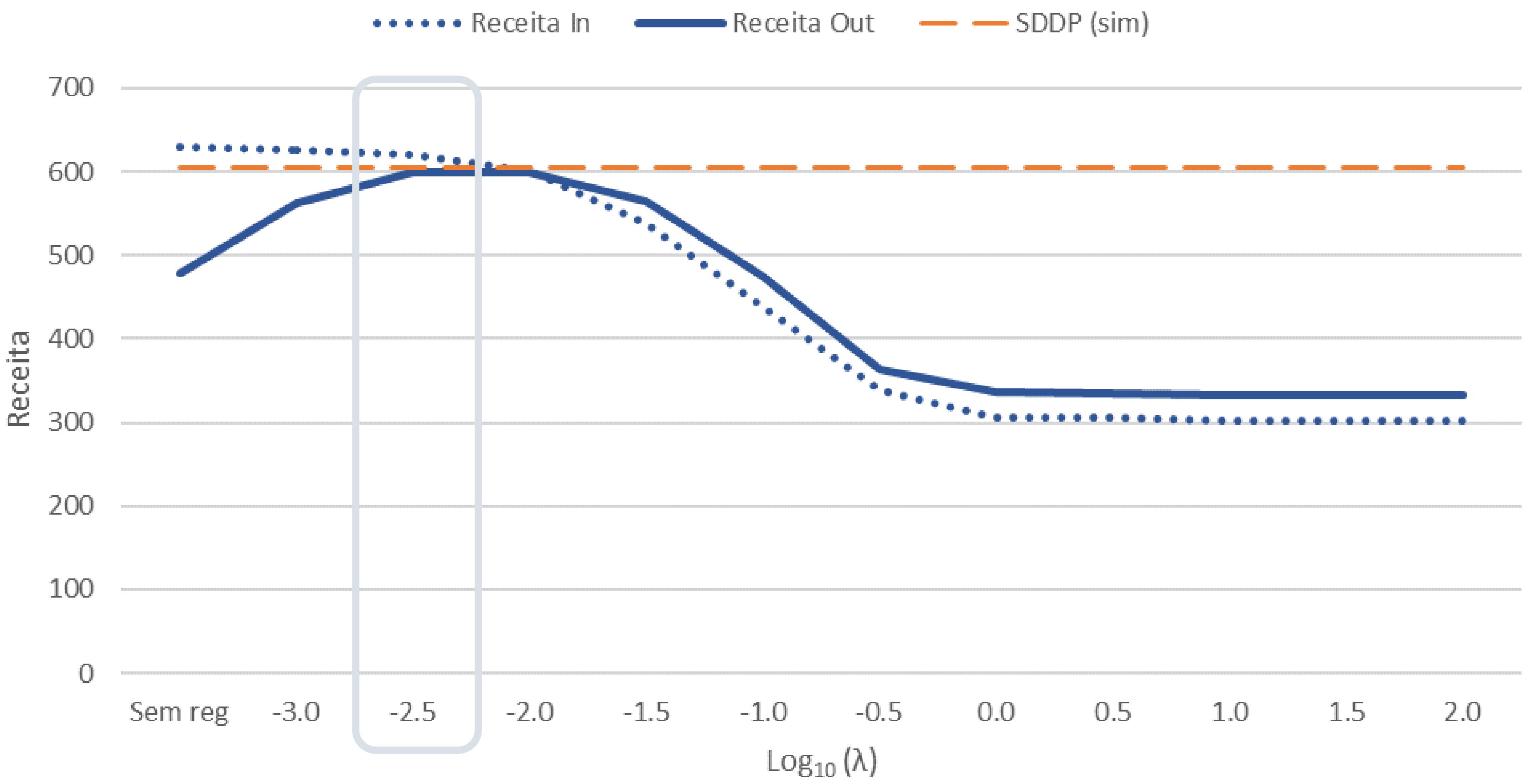




A combinação que maximiza a receita (in sample e out sample) é $\lambda 2 = 0.4$ e $\log(\lambda 1) = -2.5$

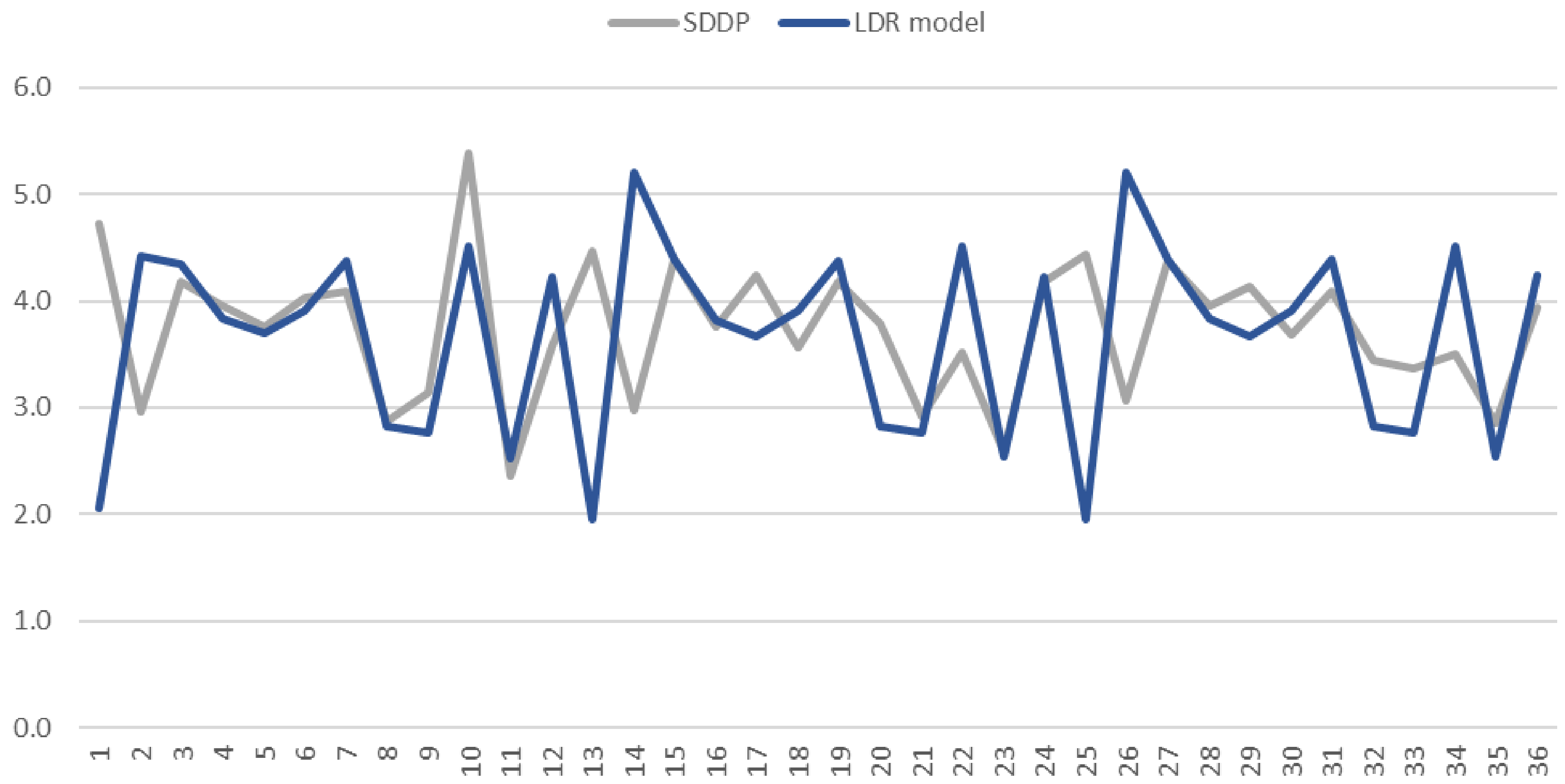
Resultados - Receita

Receita para diferentes λ_1 e $\lambda_2 = 0.4$ versus receita na simulação do sistema:



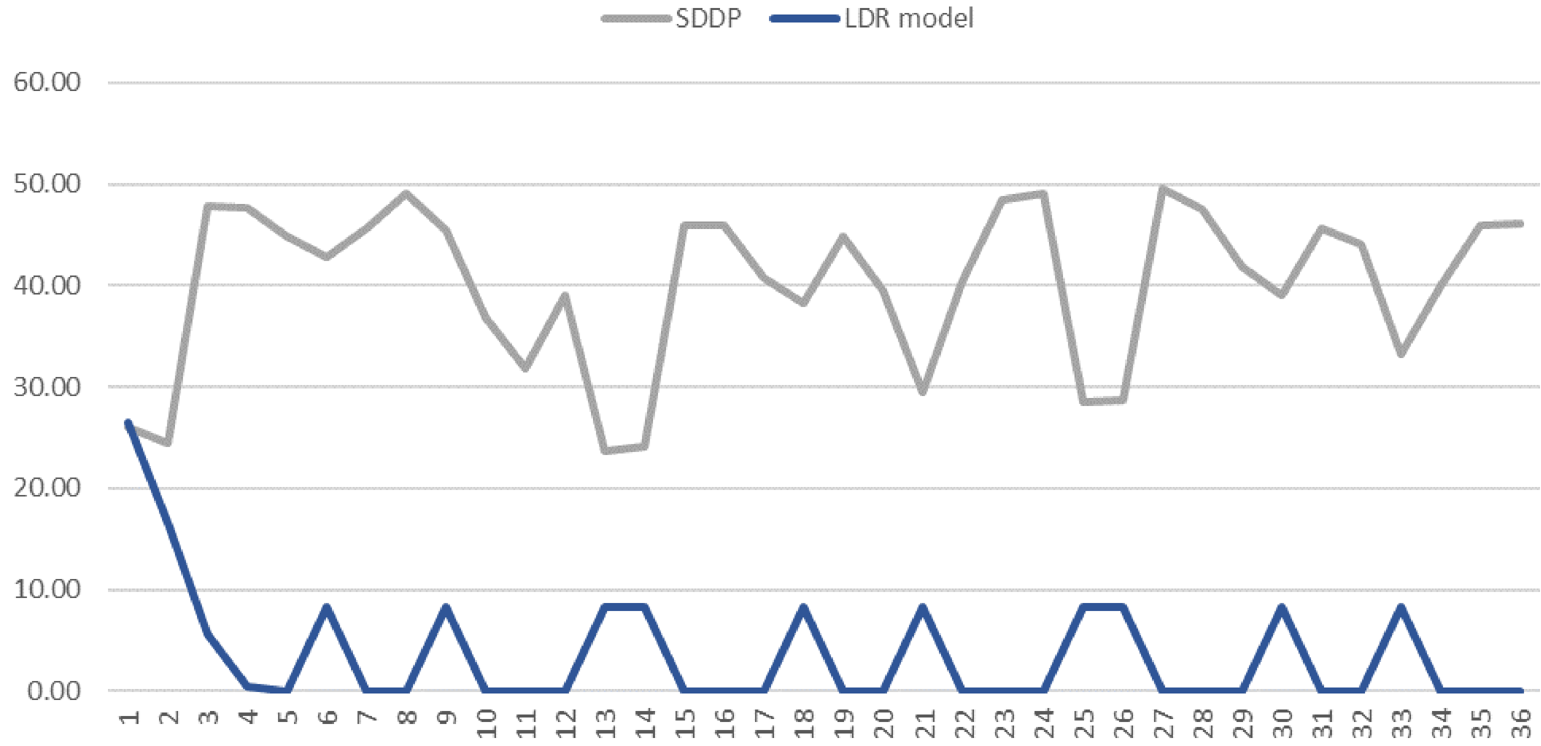
Resultados - Geração

A geração resultante tem um comportamento similar ao do modelo que otimiza todo o sistema:



Resultados – Gestão do reservatório

Apesar dos resultados de geração e receita bastante similares, a gestão de volume do reservatório no modelo LDR é mais agressiva que no modelo sistêmico. Isso poderia ser corrigido utilizando métricas de aversão à risco.



Resultados – Impacto do Preço

As tabelas apresentam os valores médios de β e a contagem de β não-nulos para cada etapa i da curva e cada lag j.

Average

I/Lag	0	1	2	3	4	5	6
1	-3.0%	-0.6%	-0.7%	-0.8%	-0.5%	-0.5%	-0.3%
2	-3.2%	-47.7%	-0.5%	-0.5%	-0.5%	-0.8%	-0.7%
3	-3.2%	-0.4%	-0.7%	-1.0%	-0.6%	-0.5%	-0.7%
4	-3.2%	-0.4%	-0.7%	-0.4%	-0.6%	-0.4%	-0.7%
5	-3.1%	-0.5%	-0.7%	-1.8%	-0.3%	-0.5%	-0.7%
6	-3.3%	-0.4%	-0.1%	-0.8%	-0.9%	-0.7%	-0.7%
7	-3.3%	-0.6%	-0.1%	-0.7%	-0.9%	-0.6%	-0.7%
8	-3.2%	-0.6%	-0.1%	-0.8%	-0.9%	-0.6%	-0.7%
9	0.9%	-44.8%	20.5%	-4.4%	-1.0%	-0.3%	-0.4%
10	-3.7%	-0.4%	-0.4%	-0.3%	-0.8%	-0.9%	-0.4%

Count != 0

I/Lag	0	1	2	3	4	5	6
1	36.00	35.00	34.00	33.00	32.00	31.00	30.00
2	36.00	35.00	34.00	33.00	32.00	31.00	30.00
3	36.00	35.00	34.00	33.00	32.00	31.00	30.00
4	36.00	35.00	34.00	33.00	32.00	31.00	30.00
5	36.00	35.00	34.00	33.00	32.00	31.00	30.00
6	36.00	35.00	34.00	33.00	32.00	31.00	30.00
7	36.00	35.00	34.00	33.00	32.00	31.00	30.00
8	36.00	35.00	34.00	33.00	32.00	31.00	30.00
9	36.00	35.00	34.00	33.00	32.00	31.00	30.00
10	36.00	35.00	34.00	33.00	32.00	31.00	30.00

Os β nunca são nulos, mas de forma geral temos valores de magnitude bem pequena e quase sempre negativos (como esperado), variando em média entre 0% e -6%. Quanto maior o lag, menor tende a ser a influência do preço.

Otimização de bid hidroelétrico usando LDR

Apresentação Intermediária do Projeto de Fim de curso

Aluna: Ana Beatriz Carvalho Werlang

Contato: anabeatriz@psr-inc.com

Orientador: Davi Valladão