Análise econômica dos preços horários

Claudia Sagastizábal

CeMEAI

CEPID - Centro de Ciências Matemáticas Aplicadas à Indústria

FAPESP

2º Workshop on Computing Efficient Energy Prices

13/04/2021 - 16h

Avanços acadêmicos e as novas fronteiras metodológicas dos modelos de operação e formação de preço

Análise econômica dos preços horários

Claudia Sagastizábal

Em colaboração com
J. P. Luna, P. J. S. Silva, K. Vinente

CeMEAI
CEPID - Centro de Ciências Matemáticas Aplicadas à Indústria
FAPESP

Workshop CEMEAI: Despacho Hidrotérmico de Curto Prazo: Impacto do Programa de Resposta à Demanda

ccee
Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
Eletrobras Cepel
radix
Engenharia e Software

2º Workshop on Computing Efficient Energy Prices

13/04/2021 - 16h
Avanços acadêmicos e as novas fronteiras metodológicas dos modelos de operação e formação de preço

Para saber mais:

PHILOSOPHICAL
TRANSACTIONS A

royalsocietypublishing.org/journal/rsta

Discussion

Check for updates

Cite this article: Pablo Luna J, Sagastizábal C, Silva PJS. 2021 A discussion on electricity prices, or the two sides of the coin. *Phil. Trans. R. Soc. A* **379**: 20190428.
https://doi.org/10.1098/rsta.2019.0428

Accepted: 24 February 2021

A discussion on electricity prices, or the two sides of the coin

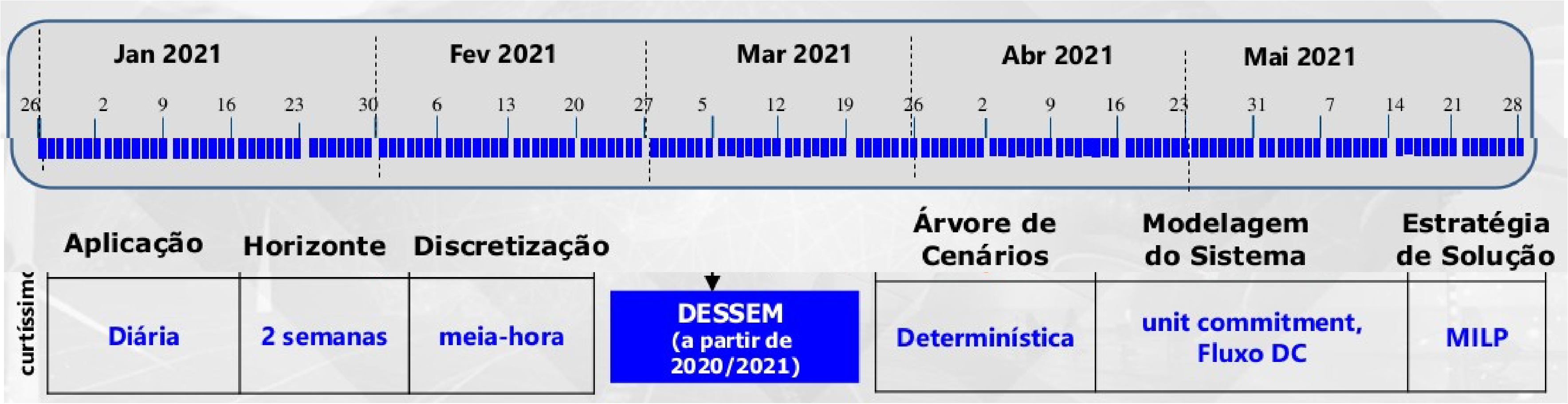
Juan Pablo Luna[1], Claudia Sagastizábal[2] and Paulo J. S. Silva[2]

[1]Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil
[2]IMECC-Unicamp, Campinas, Brazil

CS, 0000-0002-9363-9297

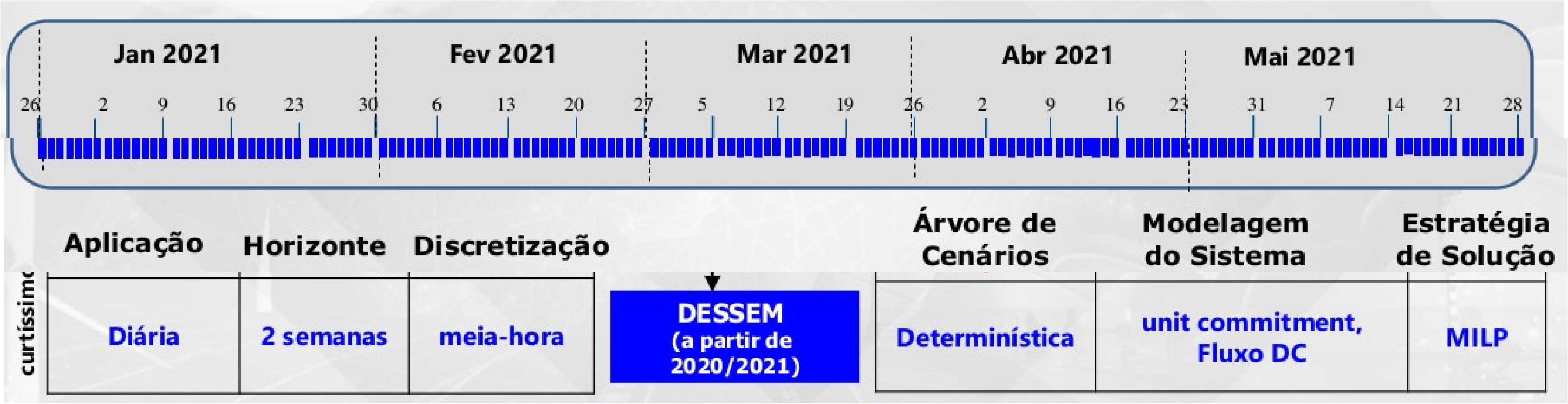
We examine how different pricing frameworks deal with non-convex features typical of day-ahead energy prices when the power system is hydro-dominated, like in Brazil. For the system operator, requirements

Os dois lados da PDO do SIN



Fonte: CEPEL

Os dois lados da PDO do SIN

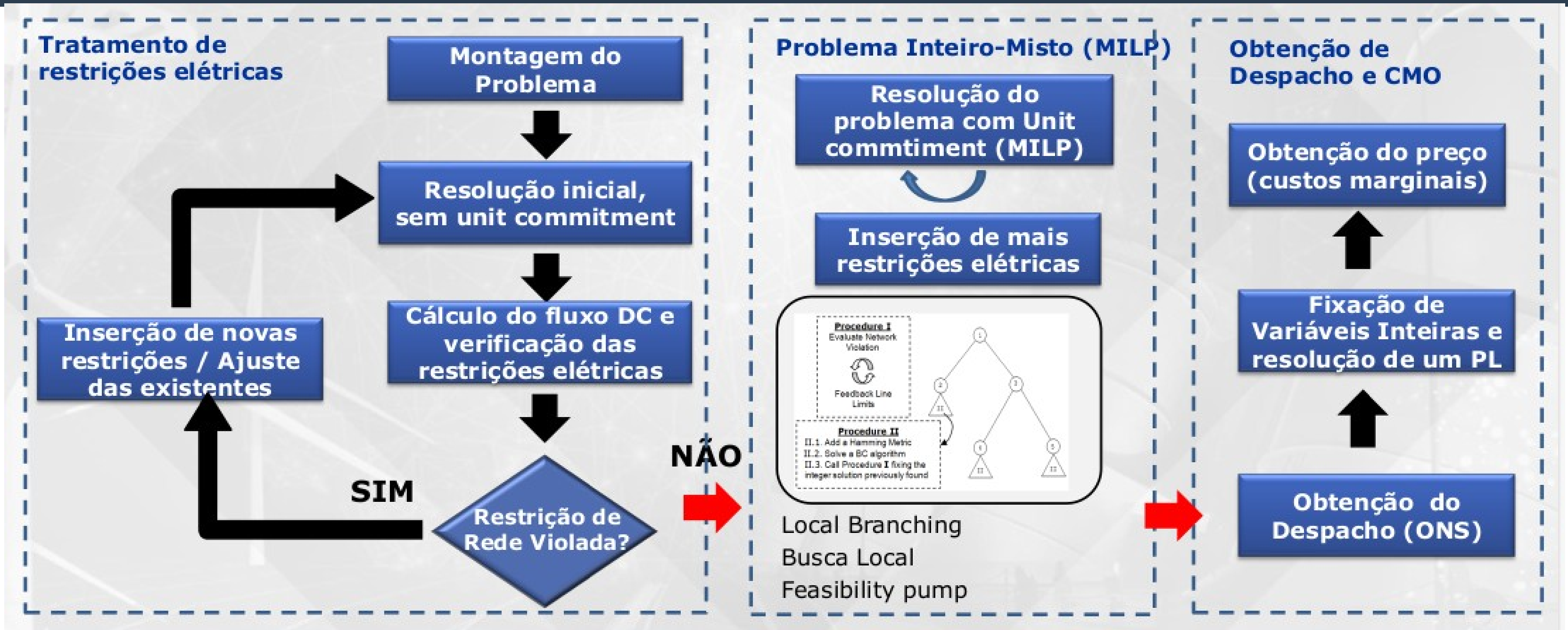


Despacho do sistema de ½ em ½ hora, por unidade geradora (ONS)
Preço de energia (PLD) horário (CCEE)

OPERADOR: interessado em viabilidade do despacho, com baixo custo

GERADOR: interessado na remuneração (preço), para rentabilizar o negócio

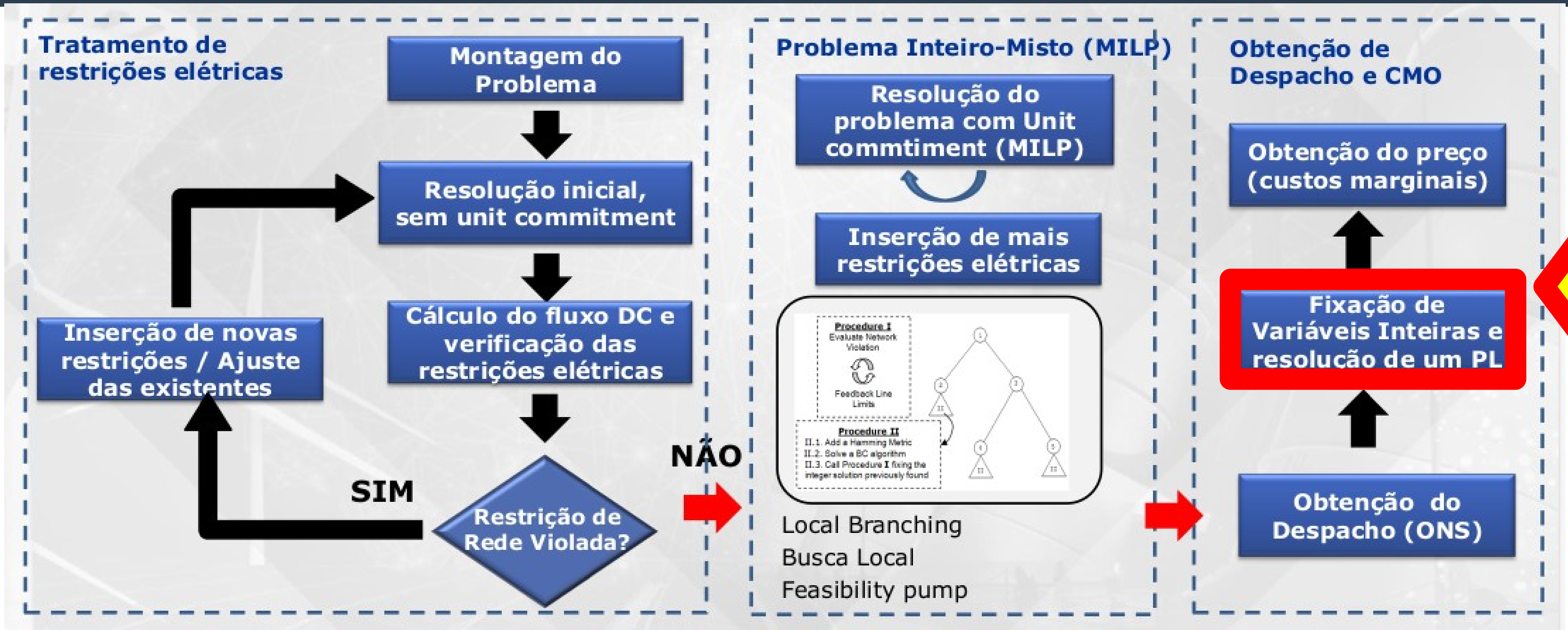
Os dois lados da PDO do SIN



OPERADOR: interessado em viabilidade do despacho, com baixo custo
GERADOR: interessado na remuneração (preço), para rentabilizar o negócio

Fonte: CEPEL

Os dois lados da PDO do SIN



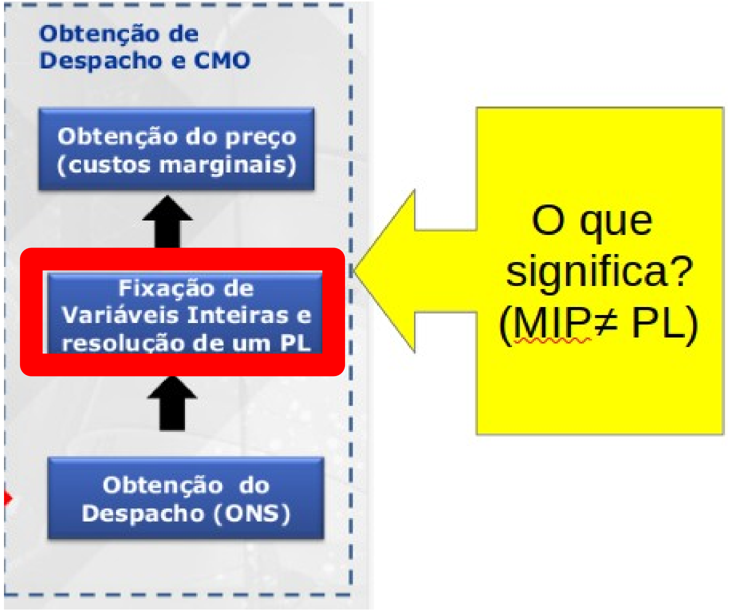
O que significa? (MIP≠ PL)

OPERADOR: interessado em viabilidade do despacho, com baixo custo

GERADOR: interessado na remuneração (preço), para rentabilizar o negócio

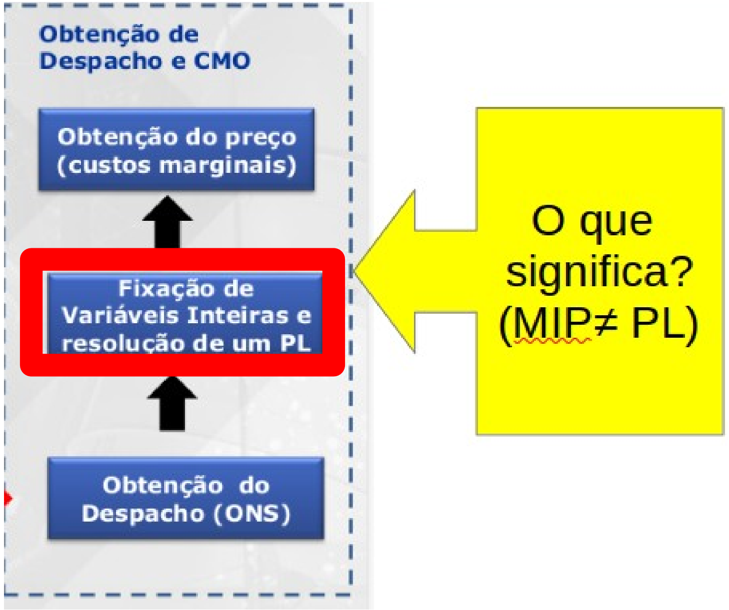
Fonte: CEPEL

Multiplicadores de Lagrange e PDO
OBS 1: u=u* fixa a capacidade instalada



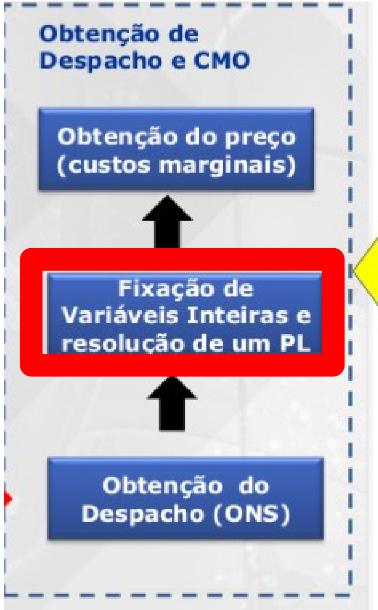
$$
\begin{cases}
\min\limits_{(p_i,u_i)} \sum\limits_{i \in SIN} GenCost_i(p_i,u_i) & \\
\text{s.a.} \quad u_i^t \in \{0,1\} & i,t \\
\qquad (p_i,u_i) \in \mathcal{P}_i & i \\
\qquad \sum\limits_{i \in SIN} p_i^t = D^t & t = 1,\dots,T
\end{cases}
$$

Multiplicadores de Lagrange e PDO
OBS 1: u=u* fixa a capacidade instalada



$$
\left\{
\begin{array}{lll}
\min\limits_{(p_i,u_i)} \sum\limits_{i \in SIN} \mathrm{GenCost}_i(p_i,u_i) & & \\
\text{s.a.} \quad u_i^t = u_i^{*t} & & i,t \\
\quad (p_i,u_i) \in \mathcal{P}_i & & i \\
\quad \sum\limits_{i \in SIN} p_i^t = D^t & \text{(multip. =CMO)} & t = 1,\ldots,T
\end{array}
\right.
$$

Multiplicadores de Lagrange e PDO
OBS 1: u=u* fixa a capacidade instalada



O que significa? (MIP≠ PL)

$$
\left\{
\begin{array}{lll}
\min\limits_{(p_i,u_i)} & \sum\limits_{i\in SIN} GenCost_i(p_i,u_i) & \\
\text{s.a.} & u_i^t = u_i^{*t} & i,t \\
 & (p_i,u_i) \in \mathcal{P}_i & i \\
 & \sum\limits_{i\in SIN} p_i^t = D^t \quad \textbf{(multip. =CMO)} & t = 1,\ldots,T
\end{array}
\right.
$$

CMO para capacidade de geração FIXA em u*

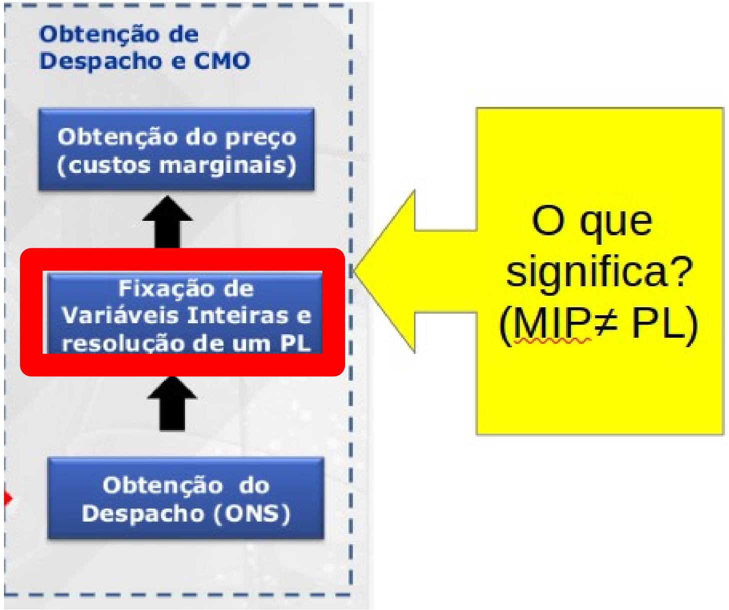
Multiplicadores de Lagrange e PDO
OBS 1: u=u* fixa a capacidade instalada

Para esse PL, o multiplicador de Lagrange (=CMO) mede variações marginais do custo se a demanda aumenta

$$
\begin{cases}
\min\limits_{(p_i,u_i)} \sum\limits_{i\in SIN} \mathrm{GenCost}_i(p_i,u_i) & \\
\text{s.a.} \quad u_i^t = u_i^{*t} & i,t \\
\quad (p_i,u_i) \in \mathcal{P}_i & i \\
\quad \sum\limits_{i\in SIN} p_i^t = D^t \quad \textbf{(multip. =CMO)} & t=1,\ldots,T
\end{cases}
$$

CMO para capacidade de geração FIXA em u*

Multiplicadores de Lagrange e PDO
OBS 1: u=u* fixa a capacidade instalada



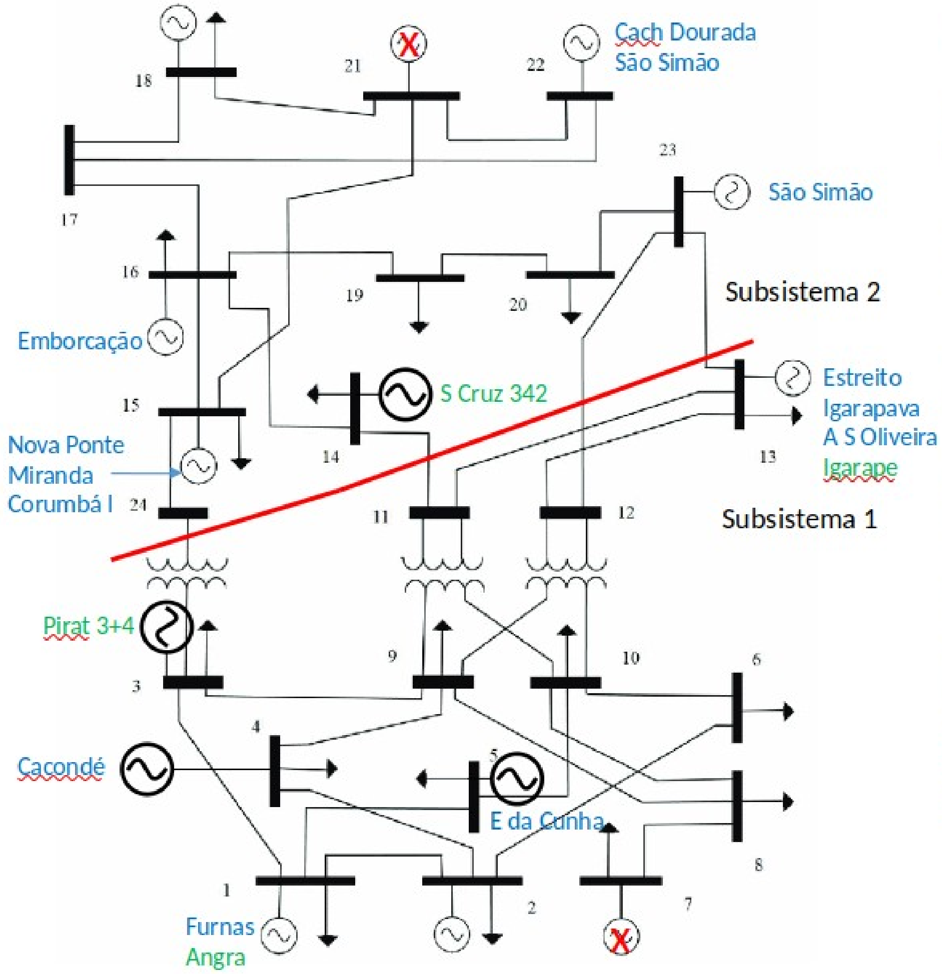
Para esse PL, o multiplicador de Lagrange (=CMO) mede variações marginais do custo se a demanda aumenta

MAS: não tem como acionar unidades desligadas, para valores de D maiores que a capacidade “on”, CMO=+∞

$$\begin{cases} \min\limits_{(p_i,u_i)} \sum\limits_{i \in SIN} GenCost_i(p_i,u_i) & \\ \text{s.a. } u_i^t = u_i^{*t} & i,t \\ \quad (p_i,u_i) \in \mathcal{P}_i & i \\ \quad \sum\limits_{i \in SIN} p_i^t = D^t \quad \text{(multip. =CMO)} & t = 1,\ldots,T \end{cases}$$

CMO para capacidade de geração FIXA em u*

Instância simples ～IEEE 24 bus DESSEM acadêmico



Informações sobre o estudo realizado (DESSEM):

Dados gerais: Horizonte 24 horas com discretização horária; Inclusão da rede elétrica em todos os instantes temporais.

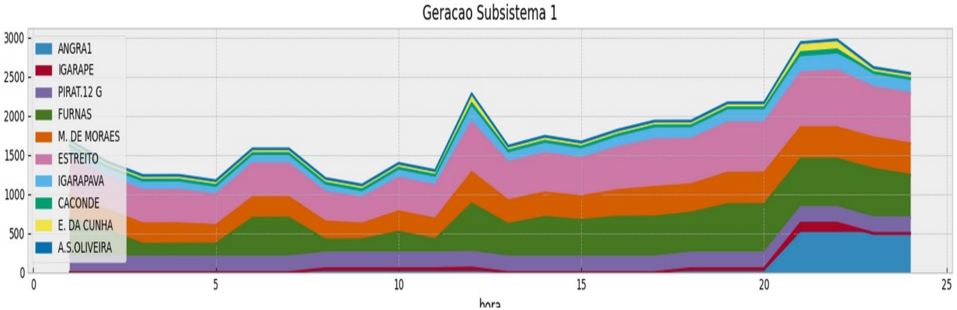
Carga/Geração: Demanda referência: 7287 MW; Pot instalada térmica: 1292MW; Pot instalada hidrelétrica: 11263 MW.

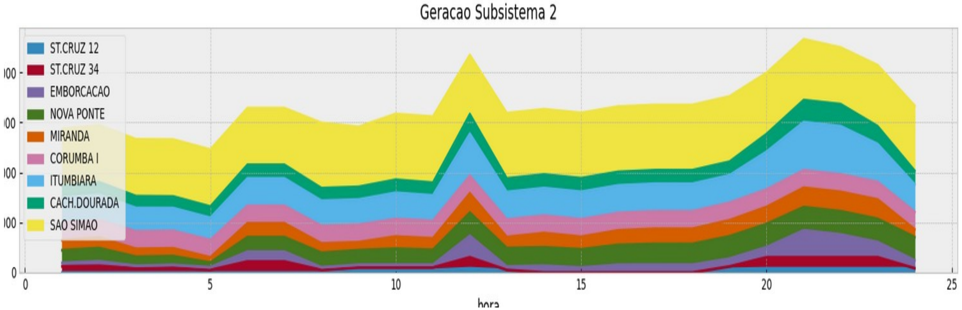
Números: 24 barras; 38 LTs; 2 áreas; 14 hidrelétricas; 5 termelétricas.

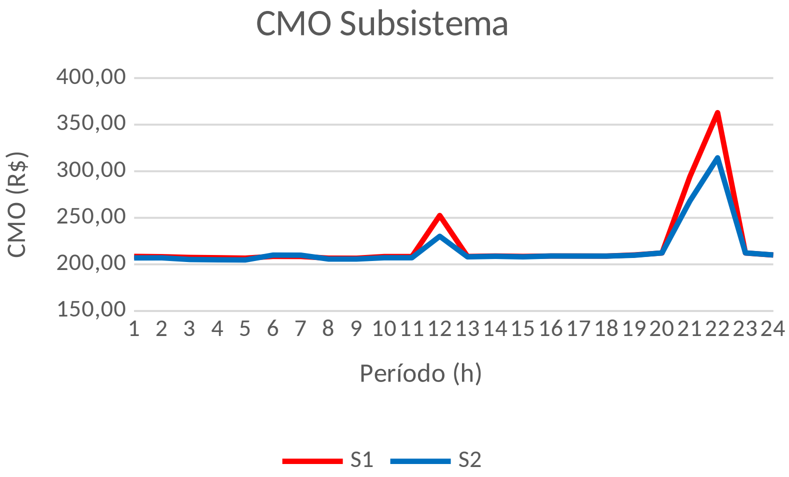
Rep. Custos: Termelétricas: somente CVU; Hidrelétricas: FCF; UTEs com tempo mínimo ON/OFF.

UTE (Subsistema):	CVU (R$) [períodos (h)];	Ton – Toff [h]
Angra 1 (1):	200,00 [1-12]; 370,00 [13-24];	13-5
Igarapé (1):	253,43 [1-24]	5-5
St. Cruz 12 (2):	210,00 [1-24]	5-5
Pirat. 12 G (1):	205,34 [1-24]	5-5
St. Cruz 34 (2):	210,41 [1-24]	5-5

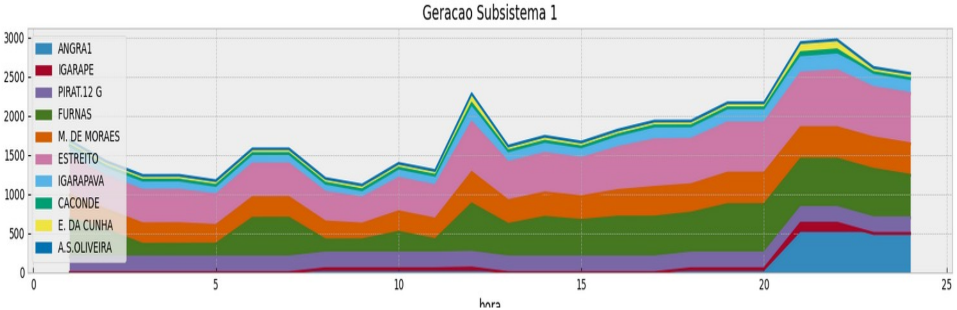
Instância simples ～IEEE 24 bus DESSEM acadêmico

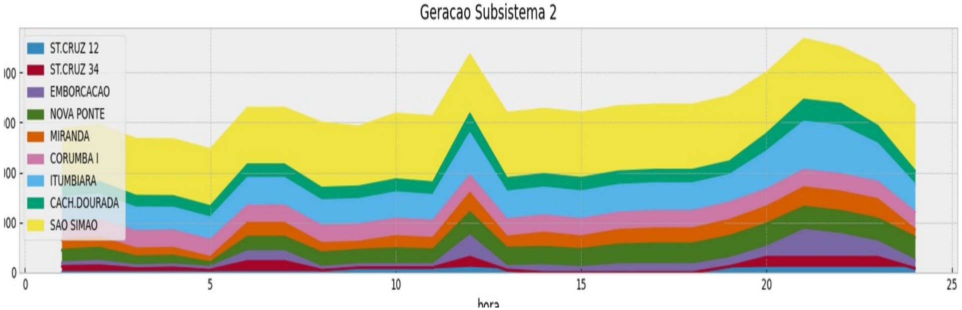


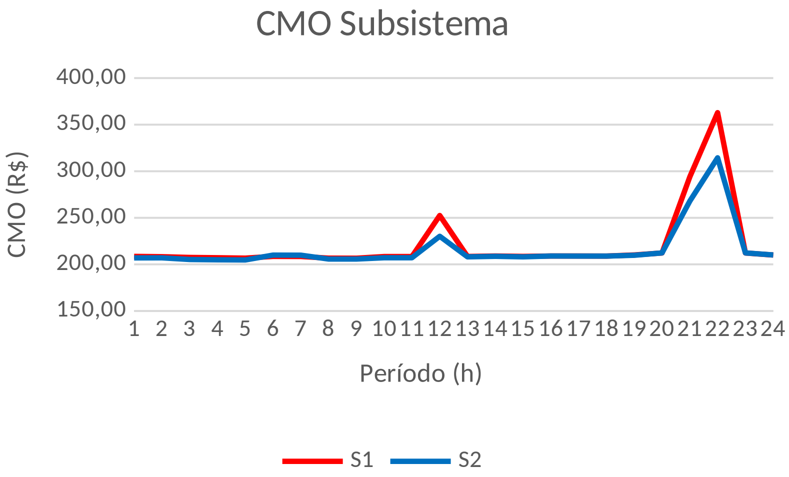




Instância simples ～IEEE 24 bus DESSEM acadêmico







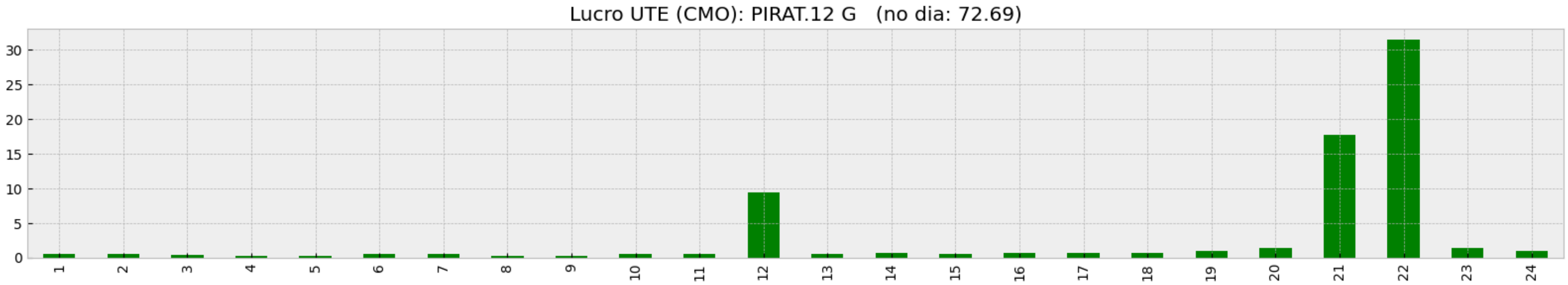
Qual é o lucro de mercado dos geradores despachados?

preço*despacho

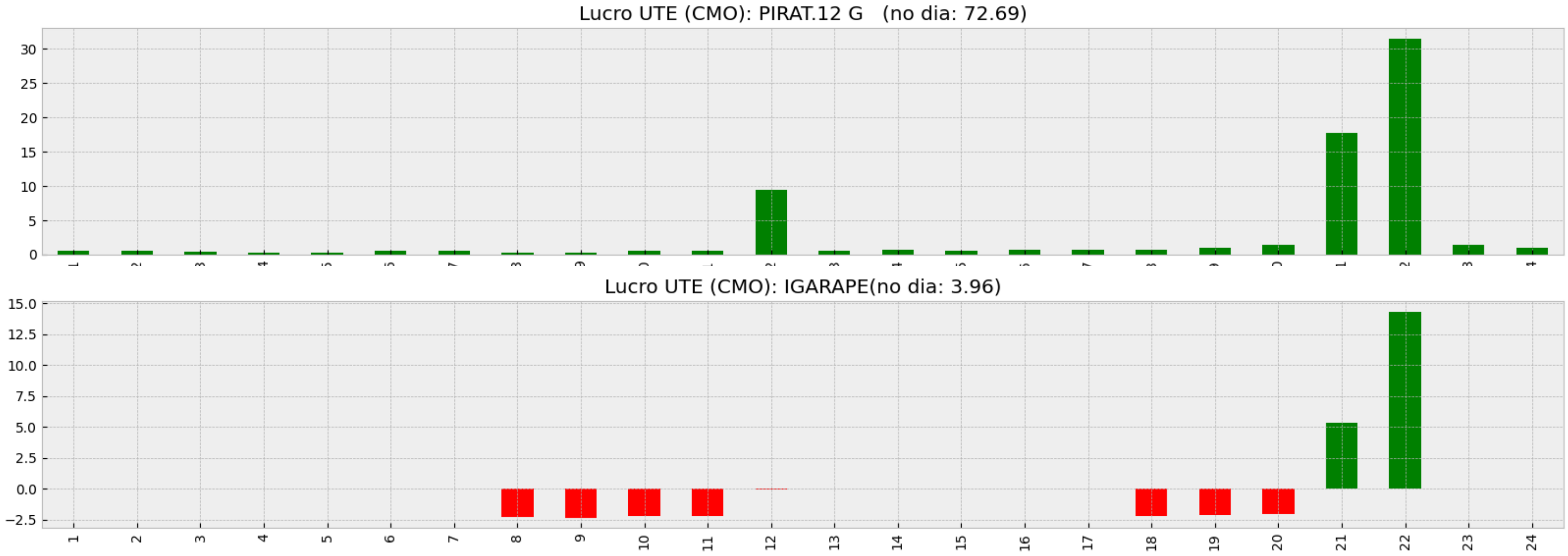
-

Custo de Geração

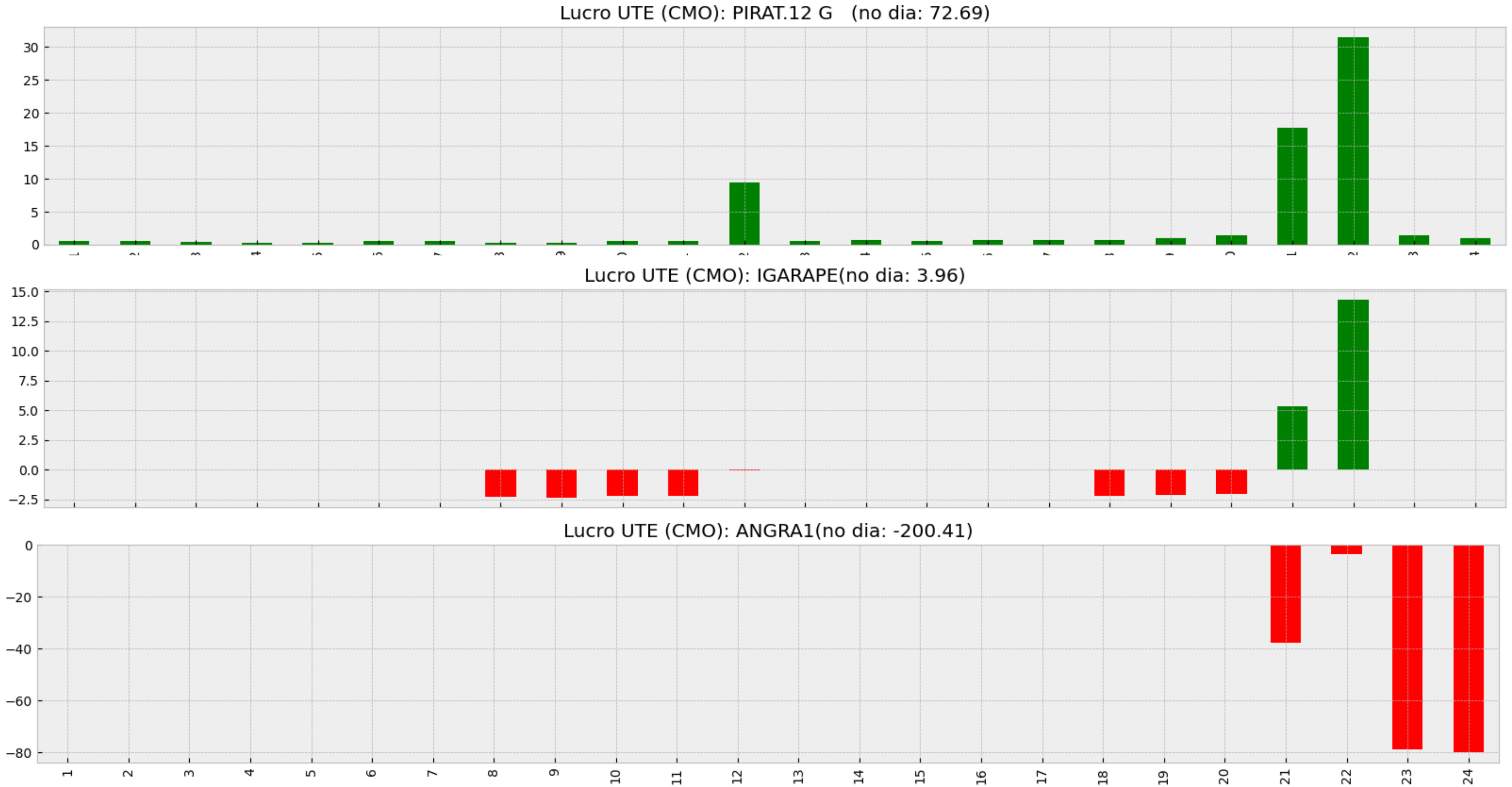
Algumas surpresas ...



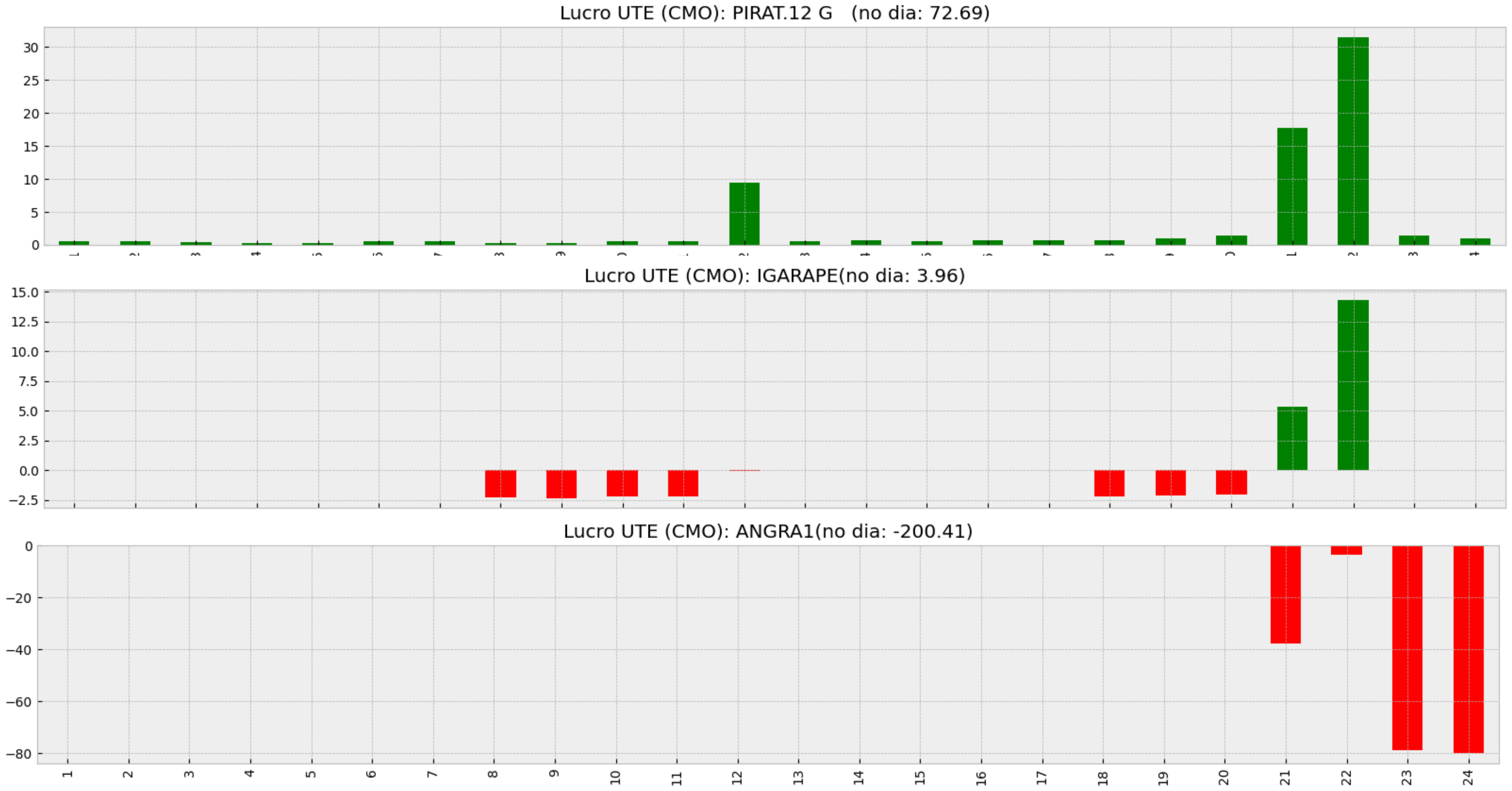
Algumas surpresas ...



Algumas surpresas ...



Algumas surpresas ...



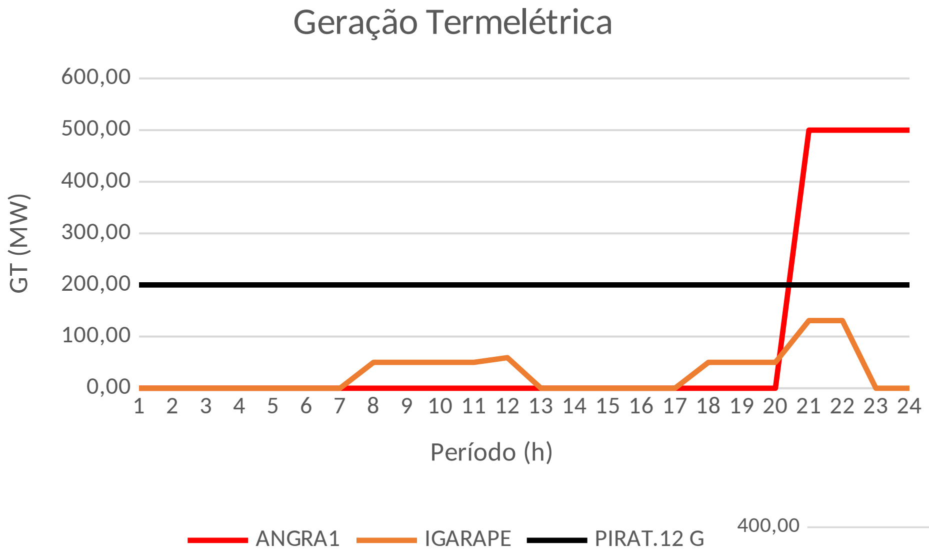
OK

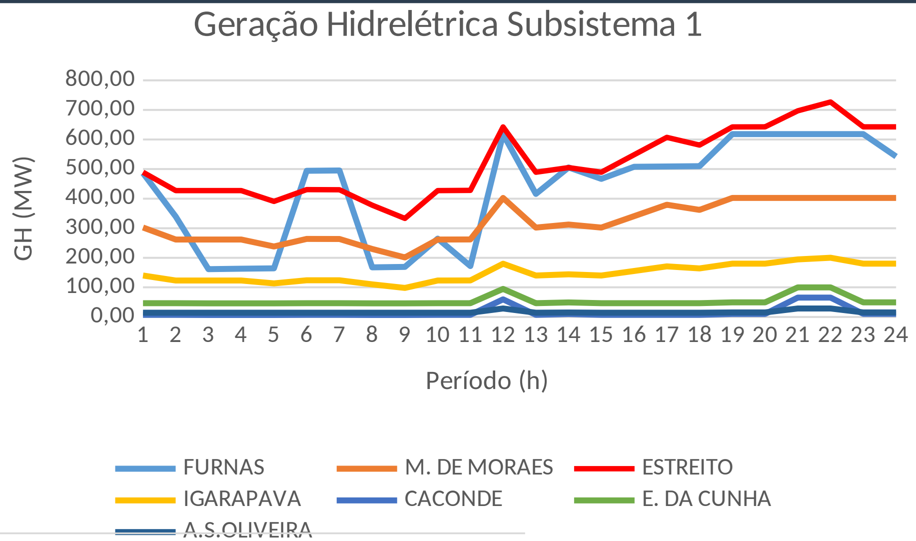
OK

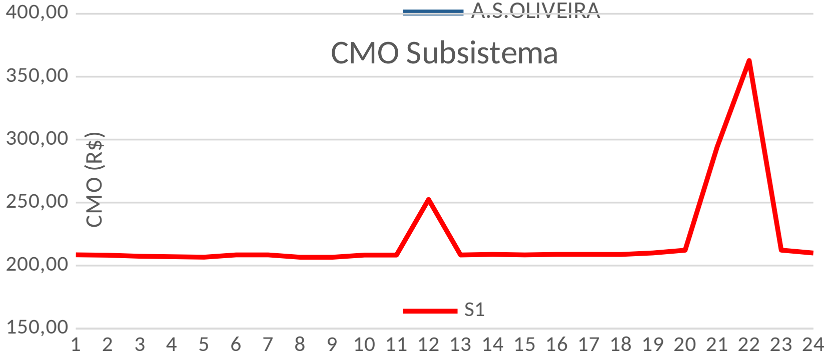
not OK

O cálculo não é incorreto, porem!

pot. minima distorce multiplicadores

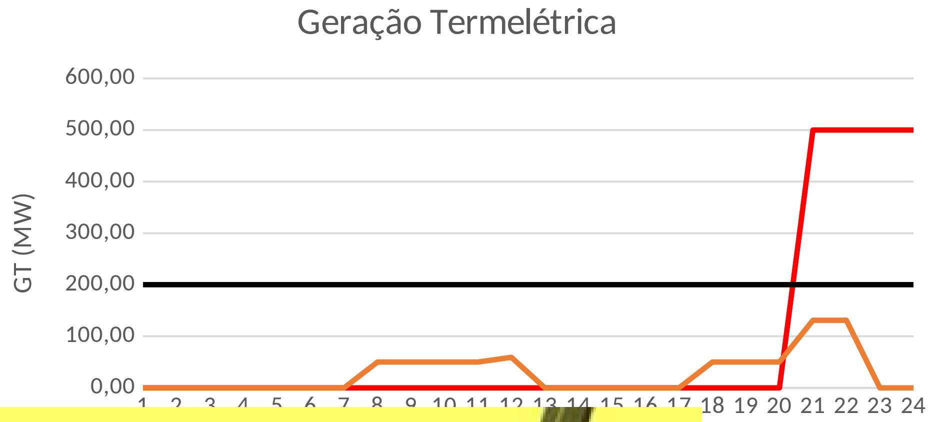


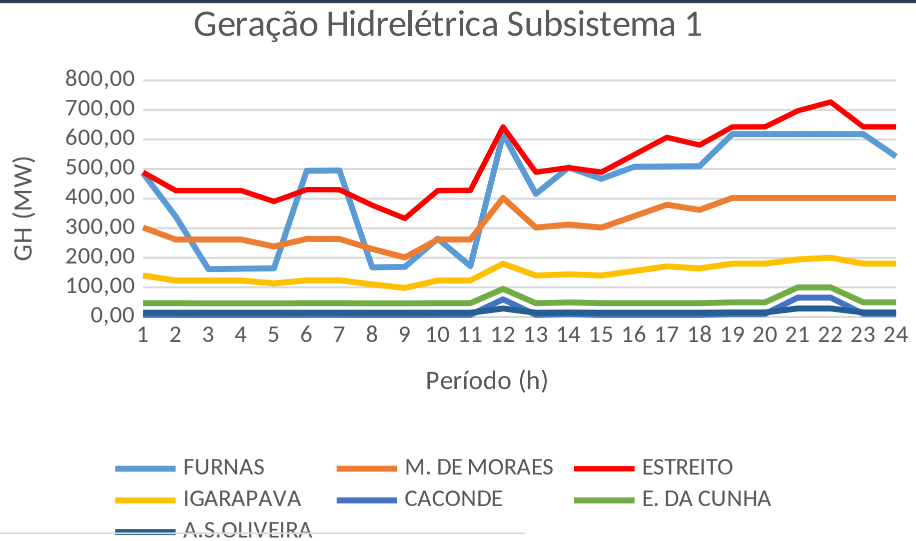


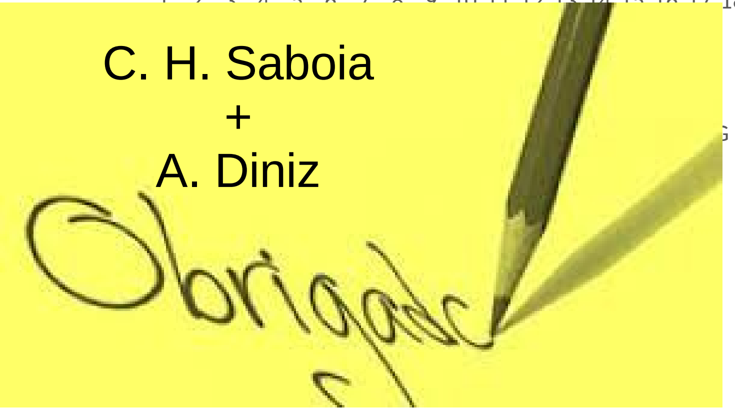


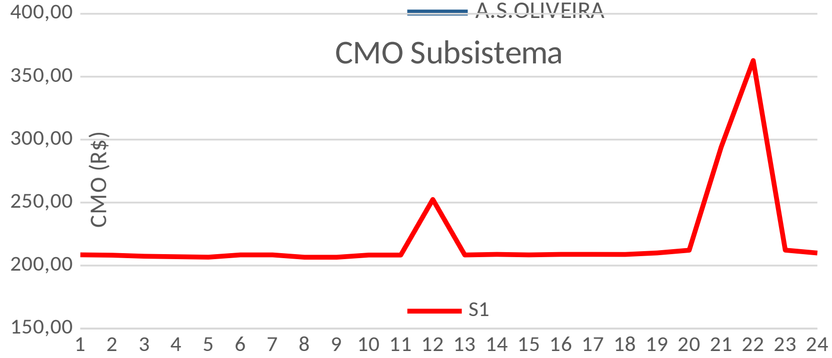
O cálculo não é incorreto, porem!

pot. minima distorce multiplicadores

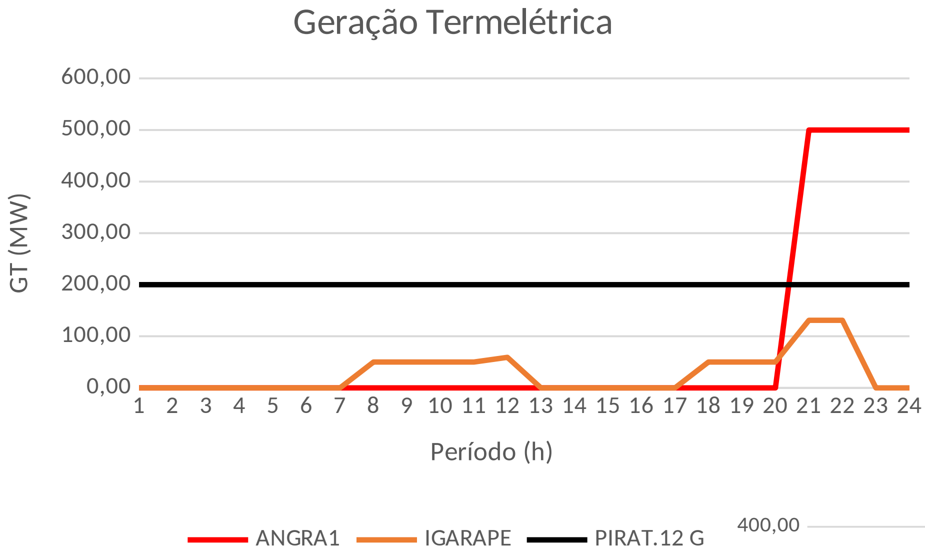






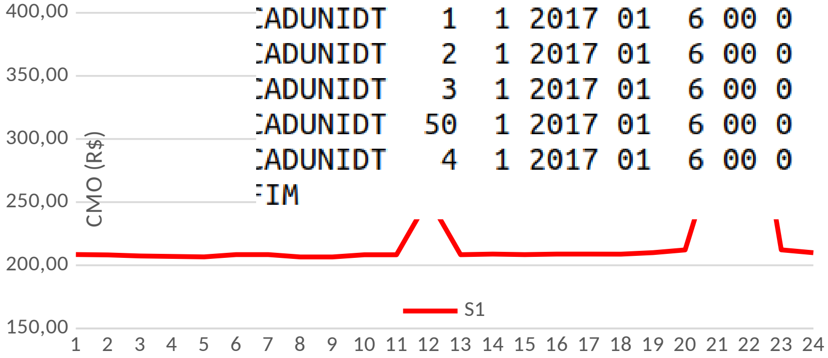


O cálculo não é incorreto, porem!
pot. mínima distorce multiplicadores



Geração Hidrelétrica Subsistema 1

```
& CARACTERISTICAS DAS USINAS TERMICAS
&
&ADUSIT  us     nome        ss yyyy mm dd hr mh nunid
&ADUSIT XXX XXXXXXXXXXXX XX XXXX XX XX XX X   XX
CADUSIT       ANGRA 1        1 2017 01  6 00 0    1
CADU          IGARAPE        1 2017 01  6 00 0    1
CADUSIT         CRUZ 12      1 2017 01  6 00 0    1
CADUSIT  50 PIRAT.1          1 2017 01  6 00 0    1
C  USIT   4 ST.CRUZ 34         2017 01  6 00 0    1
&
& CAR                 DAS UNIDADES TERMICAS   E CADA USINA
&
&ADUNIDT  us un yyyy mm dd         Po            PotMin
&ADUNIDT XXX XX XXXX xx XX XX X          XXXX XXXXXXXXXX XXX
CADUNIDT   1  1 2017 01  6 00 0        657.        500.0
CADUNIDT   2  1 2017 01  6 00 0        131.         50.0
CADUNIDT   3  1 2017 01  6 00 0         84.
CADUNIDT  50  1 2017 01  6 00 0        200.         50.0
CADUNIDT   4  1 2017 01  6 00 0        220.         50.0
FIM
```



Multiplicadores de Lagrange e PDO
OBS2: multip=CMO só se v(D) convexa

O multiplicador de Lagrange mede variações marginais
do custo para problemas convexos,
SEM “indivisibilidades” (pot. mínima, custos de partida)

$$v(D) = \begin{cases} \min\limits_{(p_i,u_i)} & \sum\limits_{i \in SIN} \mathrm{GenCost}_i(p_i, u_i) & \\ \text{s.a.} & u_i^t \in \{0,1\} & i,t \\ & (p_i, u_i) \in \mathcal{P}_i & i \\ & \sum\limits_{i \in SIN} p_i^t = D^t & t = 1, \ldots, T \end{cases}$$

Multiplicadores de Lagrange e PDO OBS2: multip=CMO só se v(D) convexa

O multiplicador de Lagrange mede variações marginais do custo para problemas convexos,
SEM "indivisibilidades" (pot. mínima, custos de partida)

CASO CONVEXO IDEAL

variação marginal (CMO)
=
derivada de função valor v(D)
=
multiplicador de Lagrange da restrição de demanda

$$v(D) = \begin{cases} \min_{(p_i,u_i)} \sum_{i \in SIN} \mathrm{GenCost}_i(p_i, u_i) & \\ \text{s.a.} \quad u_i^t \in \{0,1\} & i,t \\ \quad (p_i, u_i) \in \mathcal{P}_i & i \\ \quad \sum_{i \in SIN} p_i^t = D^t & t = 1, \ldots, T \end{cases}$$

Multiplicadores de Lagrange e PDO
OBS3: v(D) mal comportada para o UC

O multiplicador de Lagrange não mede variações marginais do custo para problemas com “indivisibilidades” (pot. mínima, custos de partida)

CASO CONVEXO IDEAL

variação marginal (CMO)
=
derivada de função valor v(D)
=
multiplicador de Lagrange da restrição de demanda

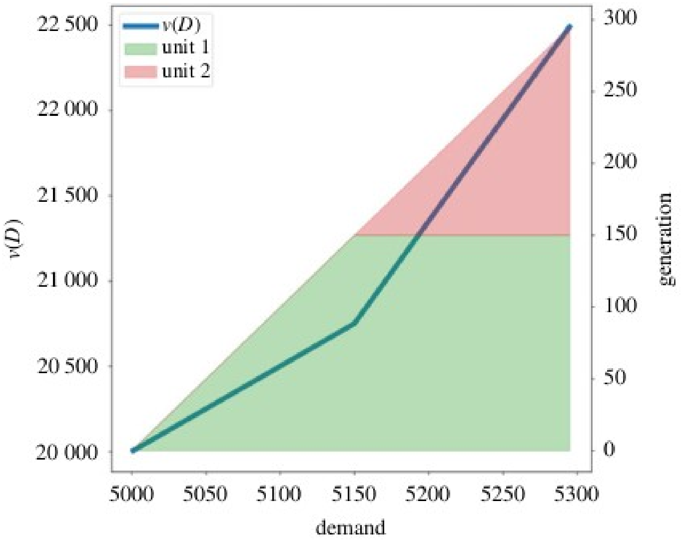
$$v(D) = \begin{cases} \min\limits_{(p_i,u_i)} \sum\limits_{i \in SIN} \mathrm{GenCost}_i(p_i,u_i) & \\ \text{s.a.} \quad u_i^t \in \{0,1\} & i,t \\ \qquad (p_i,u_i) \in \mathcal{P}_i & i \\ \qquad \sum\limits_{i \in SIN} p_i^t = D^t & t = 1,\ldots,T \end{cases}$$

Multiplicadores de Lagrange e PDO
Caso de função valor convexa

$$
v(D) = \begin{cases} \min\limits_{(p_i, u_i)} \sum\limits_{i \in \mathtt{SIN}} \mathrm{GenCost}_i(p_i, u_i) & \\ \text{s.a.} \quad u_i^t \in \{0, 1\} & i, t \\ \qquad (p_i, u_i) \in \mathcal{P}_i & i \\ \qquad \sum\limits_{i \in \mathtt{SIN}} p_i^t = D^t & t = 1, \ldots, T \end{cases}
$$

unit	C_i^t	$F_i^+ = F_i^-$	$p_{i,min}^t$	$p_{i,max}^t$	u_i^0 i
1	5	0.0	0.0	150	0
2	12	0.0	0.0	150	0
b	4	0.0	0.0	5000	1

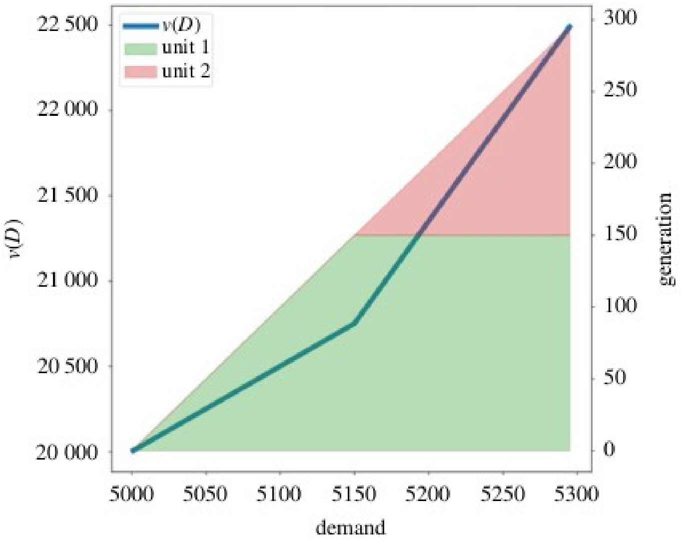
Multiplicadores de Lagrange e PDO
Caso de função valor convexa



$$v(D) = \begin{cases} \min\limits_{(p_i,u_i)} \sum\limits_{i \in SIN} \mathrm{GenCost}_i(p_i,u_i) & \\ \text{s.a.} \quad u_i^t \in \{0,1\} & i,t \\ \qquad (p_i,u_i) \in \mathcal{P}_i & i \\ \qquad \sum\limits_{i \in SIN} p_i^t = D^t & t = 1,\dots,T \end{cases}$$

unit	C_i^t	$F_i^+ = F_i^-$	$p_{i,\min}^t$	$p_{i,\max}^t$	u_i^0 i
1	5	0.0	0.0	150	0
2	12	0.0	0.0	150	0
b	4	0.0	0.0	5000	1

Multiplicadores de Lagrange e PDO
Caso de função valor convexa

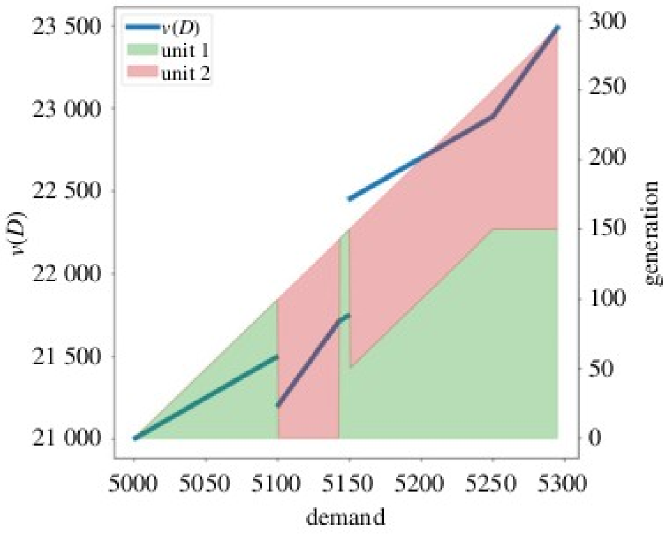


OK: multiplicador=CMO
(mult=5, [5,12], 12)

$$v(D) = \begin{cases} \min\limits_{(p_i,u_i)} \sum\limits_{i \in \mathtt{SIN}} \mathrm{GenCost}_i(p_i, u_i) & \\ \text{s.a.} \quad u_i^t \in \{0,1\} & i, t \\ \quad (p_i, u_i) \in \mathcal{P}_i & i \\ \quad \sum\limits_{i \in \mathtt{SIN}} p_i^t = D^t & t = 1, \ldots, T \end{cases}$$

unit	C_i^t	$F_i^+ = F_i^-$	$p_{i,\min}^t$	$p_{i,\max}^t$	u_i^0 i
1	5	0.0	0.0	150	0
2	12	0.0	0.0	150	0
b	4	0.0	0.0	5000	1

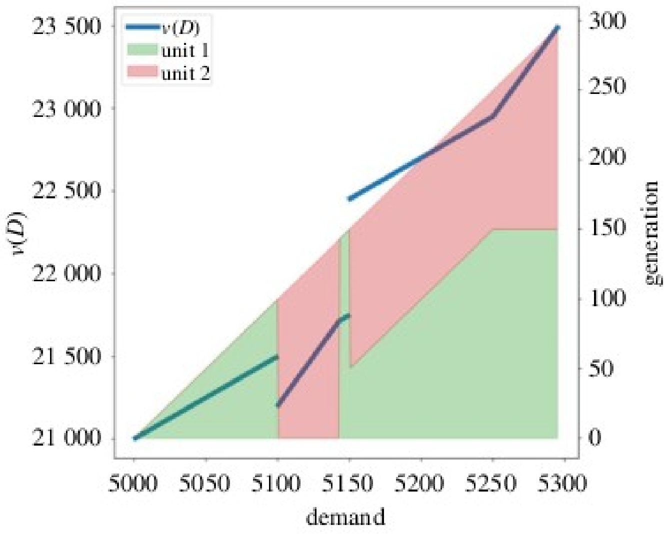
Multiplicadores de Lagrange e PDO
Função valor descontinua e não convexa



$$
v(D) = \begin{cases} \min\limits_{(p_i,u_i)} \sum\limits_{i \in \mathtt{SIN}} \mathrm{GenCost}_i(p_i,u_i) & \\ \text{s.a.} \quad u_i^t \in \{0,1\} & i,t \\ \quad (p_i,u_i) \in \mathcal{P}_i & i \\ \quad \sum\limits_{i \in \mathtt{SIN}} p_i^t = D^t & t = 1,\dots,T \end{cases}
$$

unit	C_i^t	$F_i^+ = F_i^-$	$p_{i,\min}^t$	$p_{i,\max}^t$	u_i^0 i
1	5	1000	0.0	150	0
2	12	0.0	100	150	0
b	4	0.0	0.0	5000	1

Multiplicadores de Lagrange e PDO
Função valor descontinua e não convexa



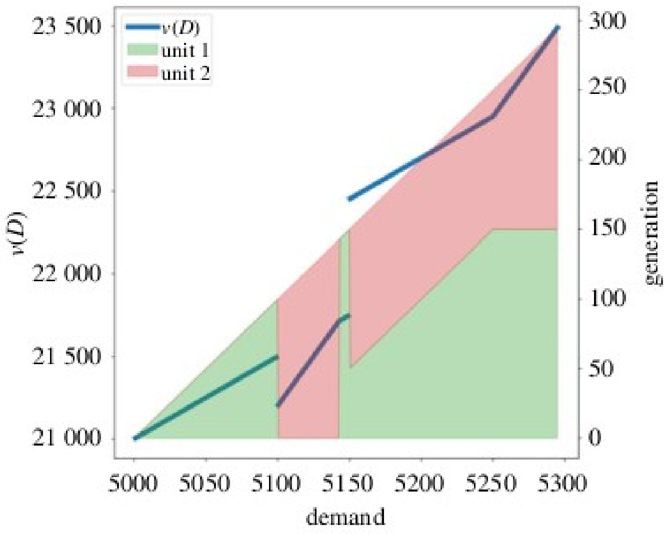
O multiplicador de Lagrange não mede variações marginais do custo para problemas com “indivisibilidades” (pot. mínima, custos de partida)

$$
v(D) = \begin{cases} \min\limits_{(p_i,u_i)} \sum\limits_{i \in SIN} \mathrm{GenCost}_i(p_i,u_i) & \\ \text{s.a.} \quad u_i^t \in \{0,1\} & i,t \\ \quad (p_i,u_i) \in \mathcal{P}_i & i \\ \quad \sum\limits_{i \in SIN} p_i^t = D^t & t = 1,\dots,T \end{cases}
$$

unit	C_i^t	$F_i^+ = F_i^-$	$p_{i,\min}^t$	$p_{i,\max}^t$	u_i^0 i
1	5	1000	0.0	150	0
2	12	0.0	100	150	0
b	4	0.0	0.0	5000	1

Not OK!: multiplicador≠CMO
(mult=5,∞, 12,5,∞,5, 12)

Multiplicadores de Lagrange e PDO
Função valor descontinua e não convexa



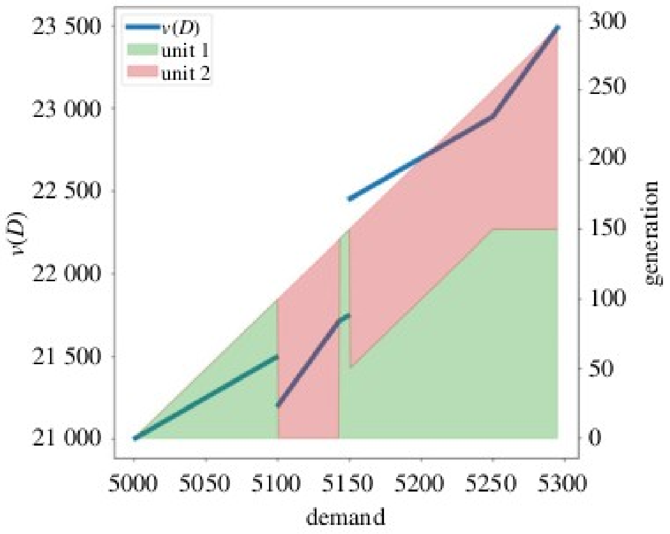
O multiplicador de Lagrange não mede variações marginais do custo para problemas com “indivisibilidades” (pot. mínima, custos de partida)

$$
v(D) = \begin{cases} \min\limits_{(p_i,u_i)} \sum\limits_{i \in SIN} \mathrm{GenCost}_i(p_i,u_i) & \\ \text{s.a.} \quad u_i^t \in \{0,1\} & i,t \\ \qquad (p_i,u_i) \in \mathcal{P}_i & i \\ \qquad \sum p_i^t = D^t & t = 1,\dots,T \end{cases}
$$

$p_{i,\max}^t$	u_i^0
150	0
150	0
5000	1

Not OK!: multiplicador≠CMO
(mult=5,∞, 12,5,∞,5, 12)

Multiplicadores de Lagrange e PDO
Função valor descontinua e não convexa



O multiplicador de Lagrange não mede variações marginais do custo para problemas com “indivisibilidades” (pot. mínima, custos de partida)

$$v(D) = \begin{cases} \min\limits_{(p_i,u_i)} & \sum\limits_{i \in SIN} \mathrm{GenCost}_i(p_i,u_i) & \\ \text{s.a.} & u_i^t \in \{0,1\} & i,t \\ & (p_i,u_i) \in \mathcal{P}_i & i \\ & \sum p_i^t = D^t & t = 1,\ldots,T \end{cases}$$

Not OK!: multiplicador≠CMO
(mult=5,∞, 12,5,∞,5, 12)

Preço paga CVU? E os custos de partida com encargos?

Análise pós-despacho

- DESSEM calcula despacho de custo mínimo: (p_i^*, u_i^*)
- ONS corrige esse despacho por questões inerentes a boa pratica operacional do SIN: segurança elétrica, inflexibilidades, risco hídrico
- Descolamento entre CMO e preços parece inevitável, mais ainda ao se definir preços uniformes por subsistema
- Proposta: determinar preços próximos ao CMO resolvendo um MIP simples, que formaliza o lado da moeda dos geradores despachados, atendendo aos requerimentos de SS do operador

Proposta EconPrice: calcular preços fazendo uma análise econômica

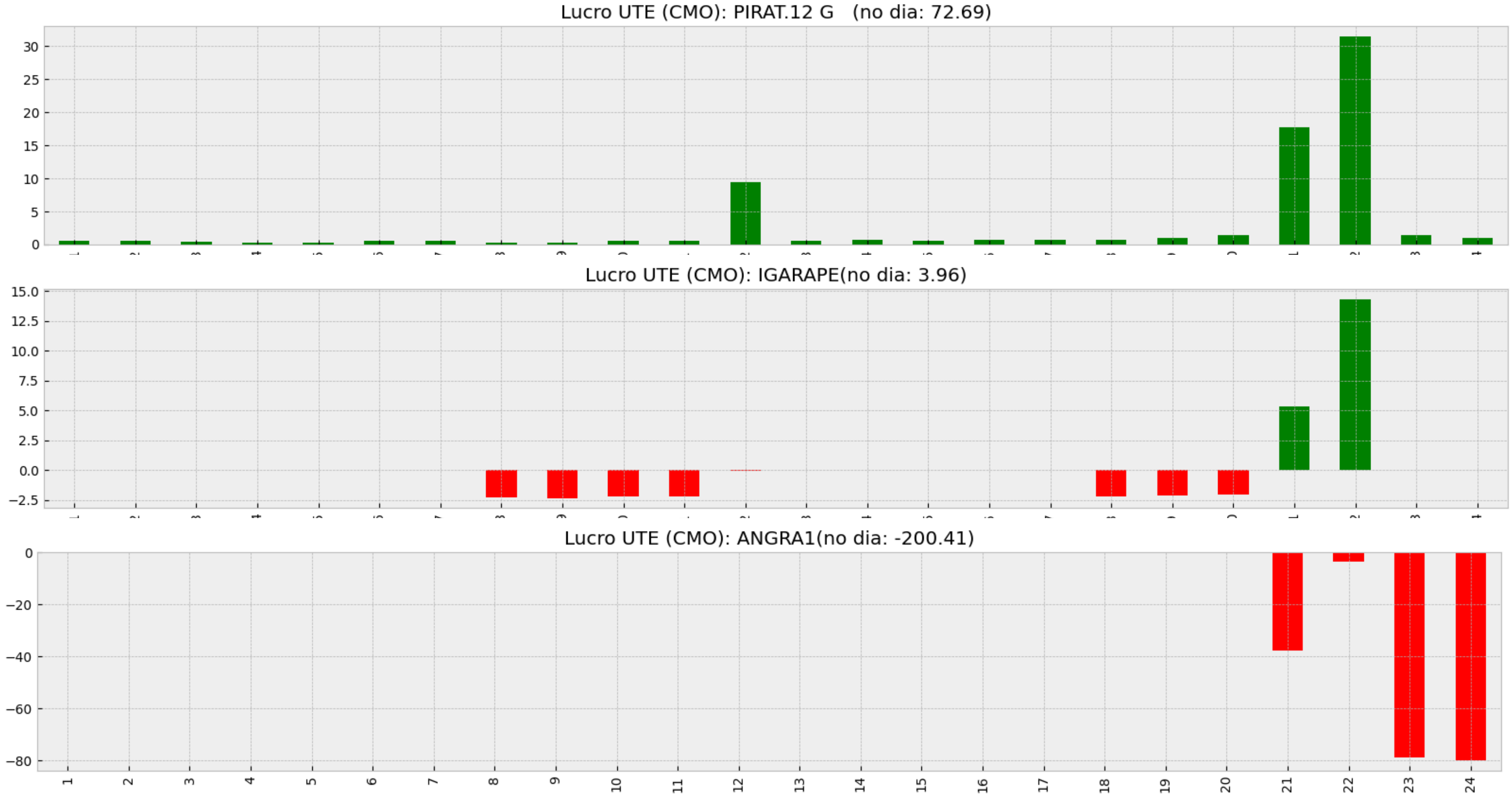
- DESSEM calcula despacho de custo mínimo: (p_i*, u_i*)
- Calculamos custo desse despacho para o gerador: $GenCost_i(p_i*, u_i*)$
- DESSEM calcula preço de referência $\pi*$ (p.ex. CMO)
- Resolvemos um problema de otimização, com o preço π como variável de decisão

$$\begin{cases} \min\limits_{(\pi^t, E_i)} & \frac{1}{2}\|\pi - \pi^*\|^2 \\ \text{s.a.} & \pi^t \geq 0 \qquad t \\ & E_i \geq 0 \qquad i \end{cases}$$

\+ restrições com sentido econômico

- EconPrice: encargos compensam somente custos fixos ou inflexibilidades, outras regras ONS (ESS), não ha geradores despachados que fiquem em vermelho ao final do dia, encargos limitados, etc

Instância simples ～IEEE 24 bus DESSEM acadêmico

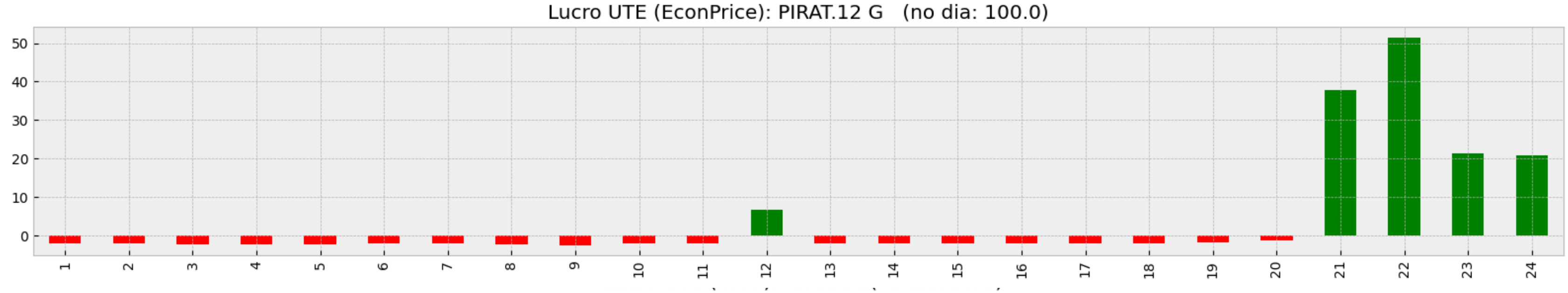


72.69

3.96

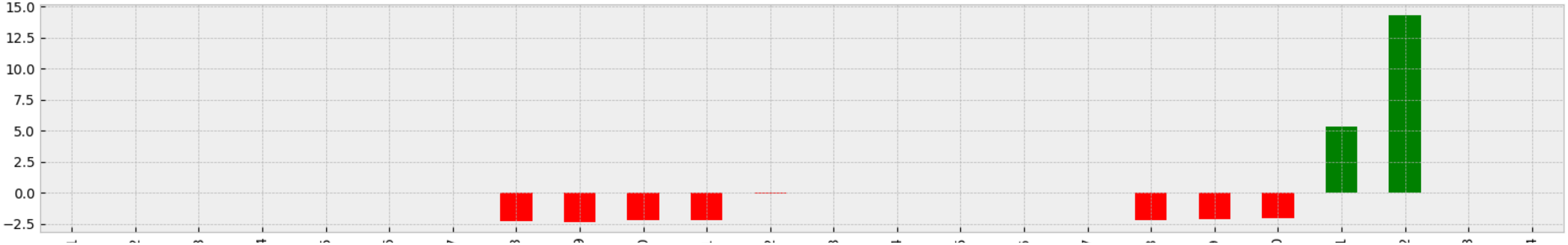
-200.41

Instância simples ～IEEE 24 bus DESSEM acadêmico

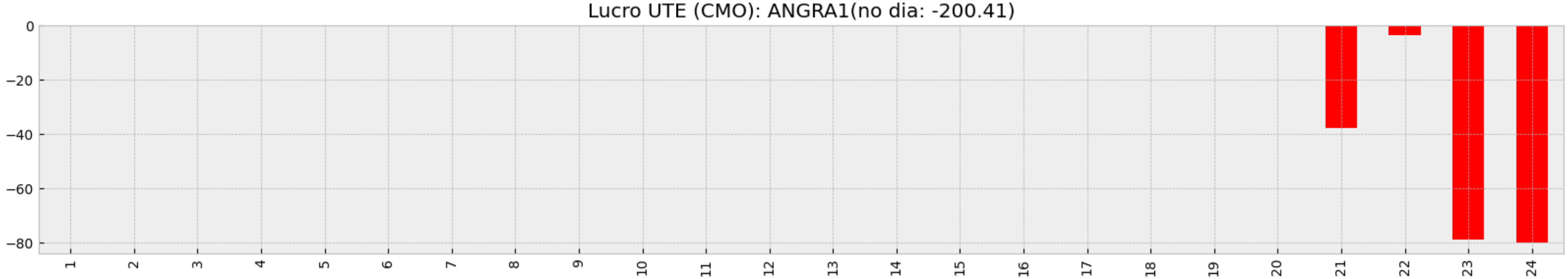


72.69

100.00

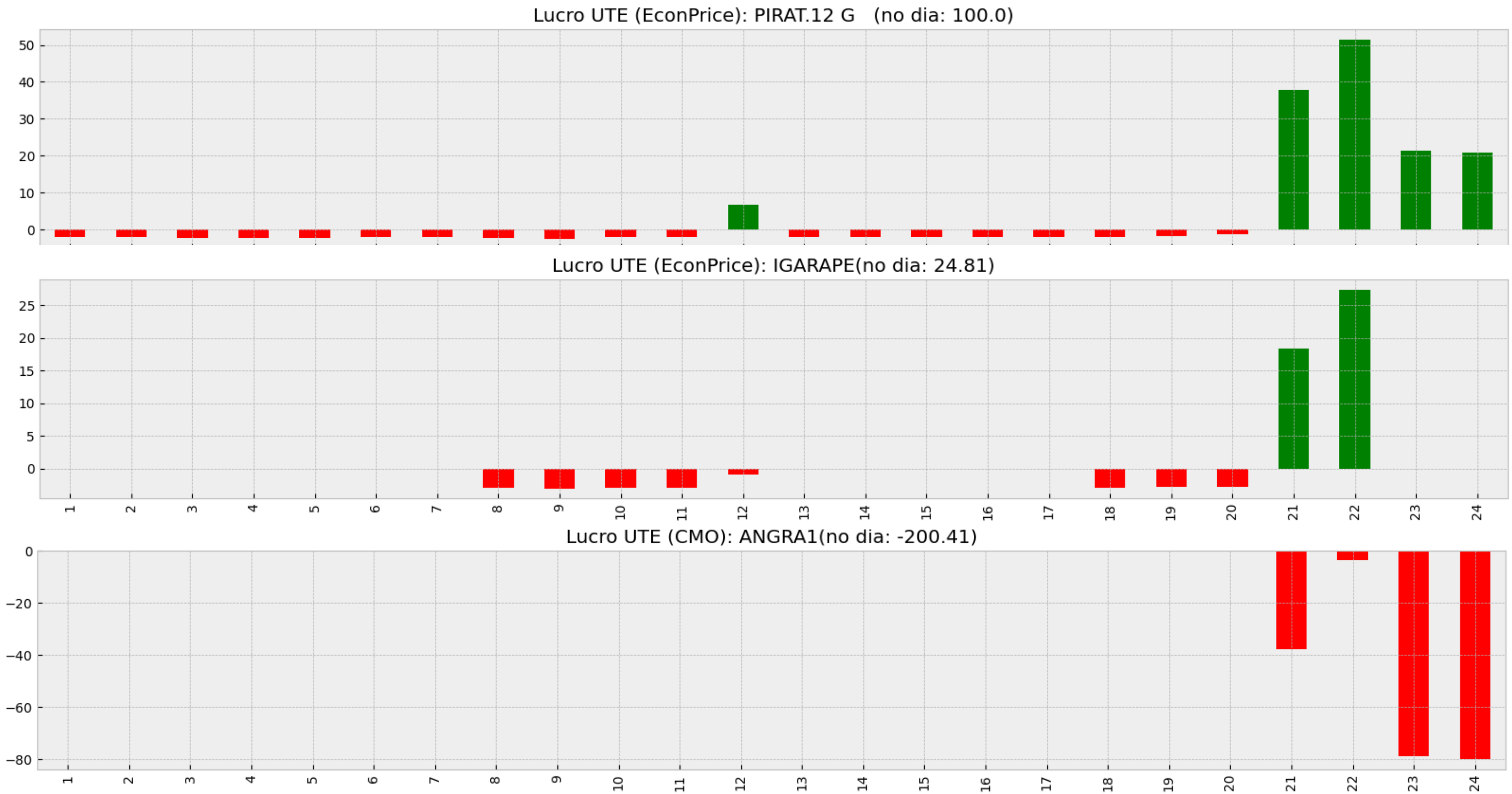


3.96



-200.41

Instância simples ~ IEEE 24 bus DESSEM acadêmico



72.69

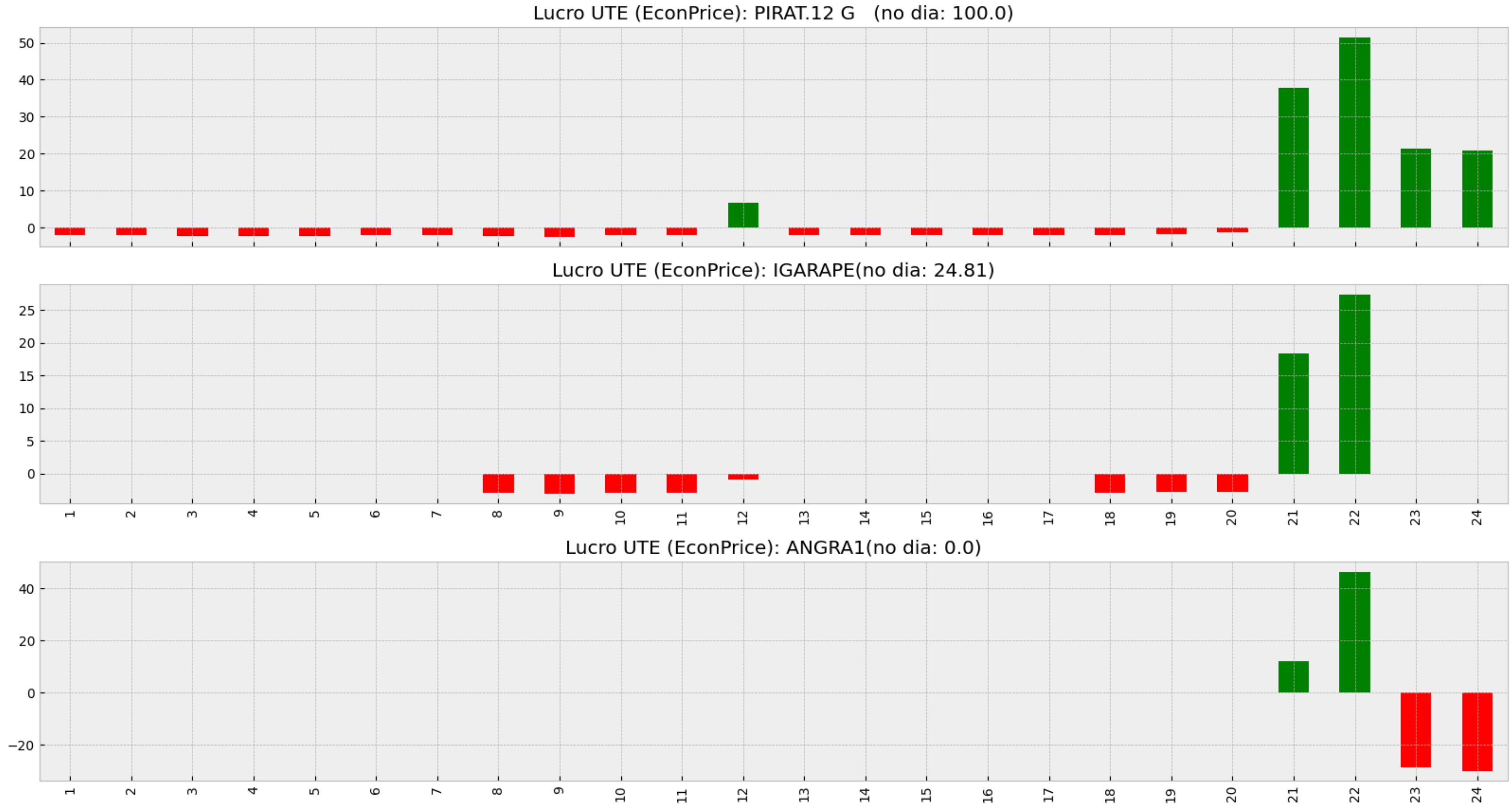
100.00

3.96

24.81

-200.41

Instância simples ~ IEEE 24 bus DESSEM acadêmico



72.69
100.00

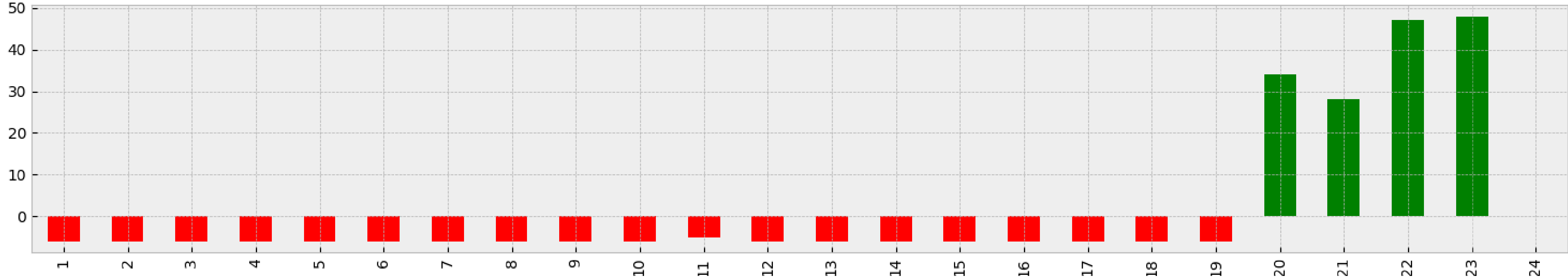
3.96
24.81

-200.41
0.00

Instância simples ～IEEE 24 bus DESSEM acadêmico

Instância simples ~IEEE 24 bus DESSEM acadêmico

Diferença percentual em relação ao preço de referencia



Vantagem de EconPrice:
cálculo feito de modo direto,
impondo condições explicitas
(ao invés de multiplicador),
estabelecidas de modo consertado

Considerações finais sobre a PDO e como lidar com indivisibilidades

- Cálculo de preços horários sempre envolve trade-offs
- Para o SIN no curtíssimo prazo, os multiplicadores de Lagrange não sempre informam as variações marginais do custo
  - u=u* fixa a capacidade instalada e pode acrescer indevidamente o CMO
  - Potencia mínima, Ton/Toff, custos de partida distorcem os valores do CMO, que devem ser corrigidos
  - multiplicadores pode não ser únicos: podemos ter valores diferentes com rodadas em maquinas diferentes
- A metodologia EconPrice
  - determina um preço horário único que tira aos geradores despachados do vermelho, corrigindo o preço de referência, levando conta de ESS
  - EconPrice pode incorporar outras restrições sobre os preços, definidas de modo consertado (acompanhar a demanda, GFOM, p.ex.)
  - Mitiga o impacto de resolução aproximada do MIP nos preços