

2º WorkShop
on Computing
Efficient Energy
Prices

13/04/2021

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

Unit Commitment Hidrelétrico

Palestrante

Prof. Erlon Cristian Finardi (LabPlan/UFSC)

Equipe Labplan/UFSC

Prof. Antônio Felipe da Cunha de Aquino

Bruno Colonetti, M. Eng.

Kenny Vinente, M. Eng.

Renata Pedrini, M. Eng.

ALOCAÇÃO DE UNIDADES HIDRELÉTRICAS (*UNIT COMMITMENT* HIDRELÉTRICO)

- Visa definir quais e quando as unidades geradoras devem ser ligadas/desligadas



Tempo Real

- Condições atualizadas de afluência, queda, disponibilidade de unidades, etc.
- Em geral, é realizado “observando” a usina isoladamente

Programação Diária

- Condições previstas de afluências, disponibilidade, etc.
- Realizada em conjunto com as demais usinas do sistema (despacho centralizado)

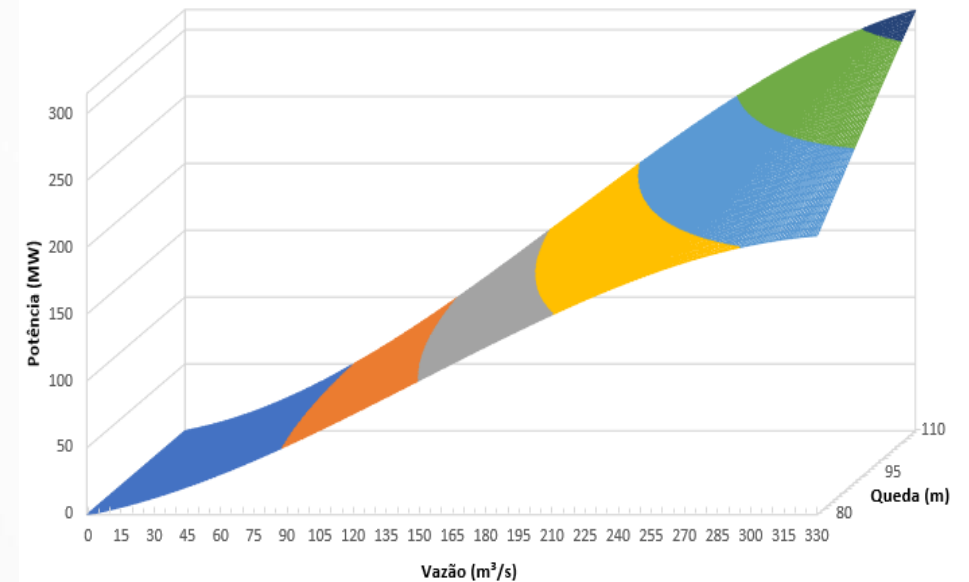
ASPECTO CHAVE: FUNÇÃO DE PRODUÇÃO HIDRELÉTRICA

- Define a relação entre queda, vazão e potência de uma unidade geradora



$$p = k \cdot \eta(q, h) \cdot h \cdot q \rightarrow$$

- p potência
- k constante
- η rendimento
- h queda líquida
- q vazão turbinada



CARACTERÍSTICAS DO UNIT COMMITMENT

• Vantagens

- ❑ Representa (ou permite representar) as características individuais das unidades de maneira precisa (não linearidades, faixas operativas, decisões on-off), i.e., **“a máquina como ela é”**
- ❑ Facilita a representação aproximada das características acima, conforme adiante

• Desvantagens

- ❑ Em casos de grande porte, inclui uma enorme quantidade de variáveis e restrições
- ❑ Parte significativa das restrições possuem variáveis binárias

18 unidades com uma faixa operativa



$$G_{1t}^{\min} u_{1t} \leq k \cdot \eta_{1t}(q_{1t}, h_{1t}) \cdot h_{1t} \cdot q_{1t} \leq G_{1t}^{\max} u_{1t}$$

$$G_{2t}^{\min} u_{2t} \leq k \cdot \eta_{2t}(q_{2t}, h_{2t}) \cdot h_{2t} \cdot q_{2t} \leq G_{2t}^{\max} u_{2t}$$

⋮

$$G_{18t}^{\min} u_{18t} \leq k \cdot \eta_{18t}(q_{18t}, h_{18t}) \cdot h_{18t} \cdot q_{18t} \leq G_{18t}^{\max} u_{18t}$$

$$u_{1t}, u_{2t}, \dots, u_{18t} \in \{0, 1\}$$

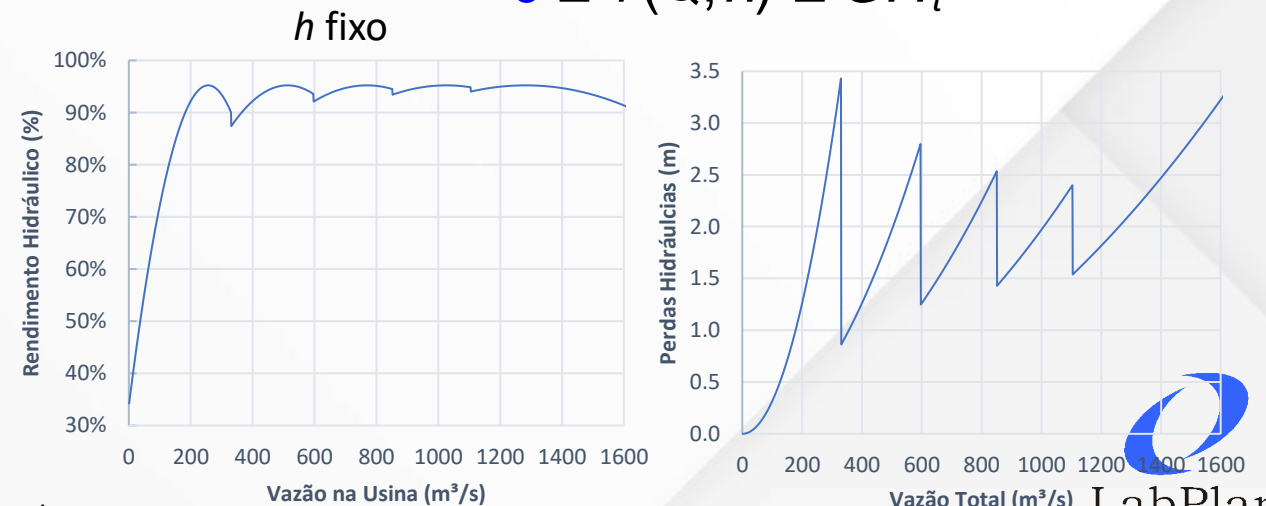
PLANT-BASED APPROACH

- Representa a usina por meio de uma (*) unidade equivalente
- Vantagens
 - ❑ Reduz significativamente o número de variáveis e restrições
- Desvantagens
 - ❑ As características individuais não são mais representadas precisamente
 - ❑ Não é possível obter uma expressão analítica exata, sendo necessário realizar alguma aproximação com base em um conjunto de pontos definidos por um oráculo

UMA SUPER UNIDADE



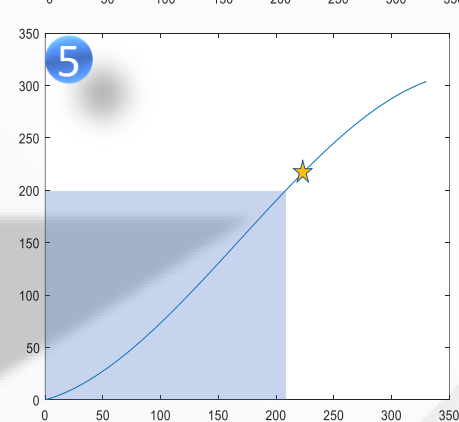
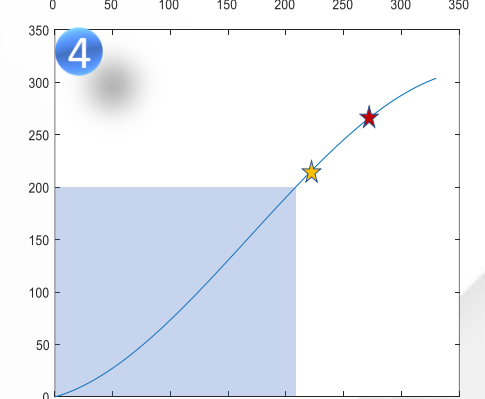
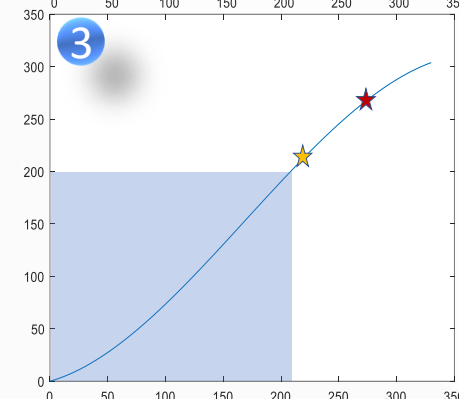
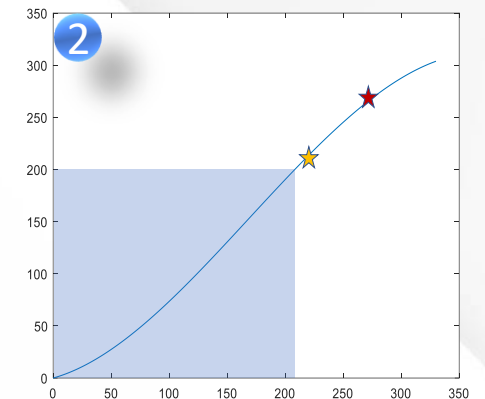
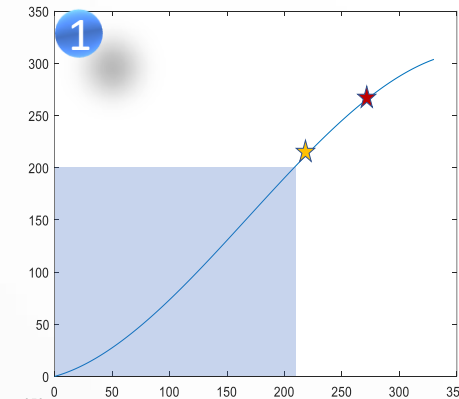
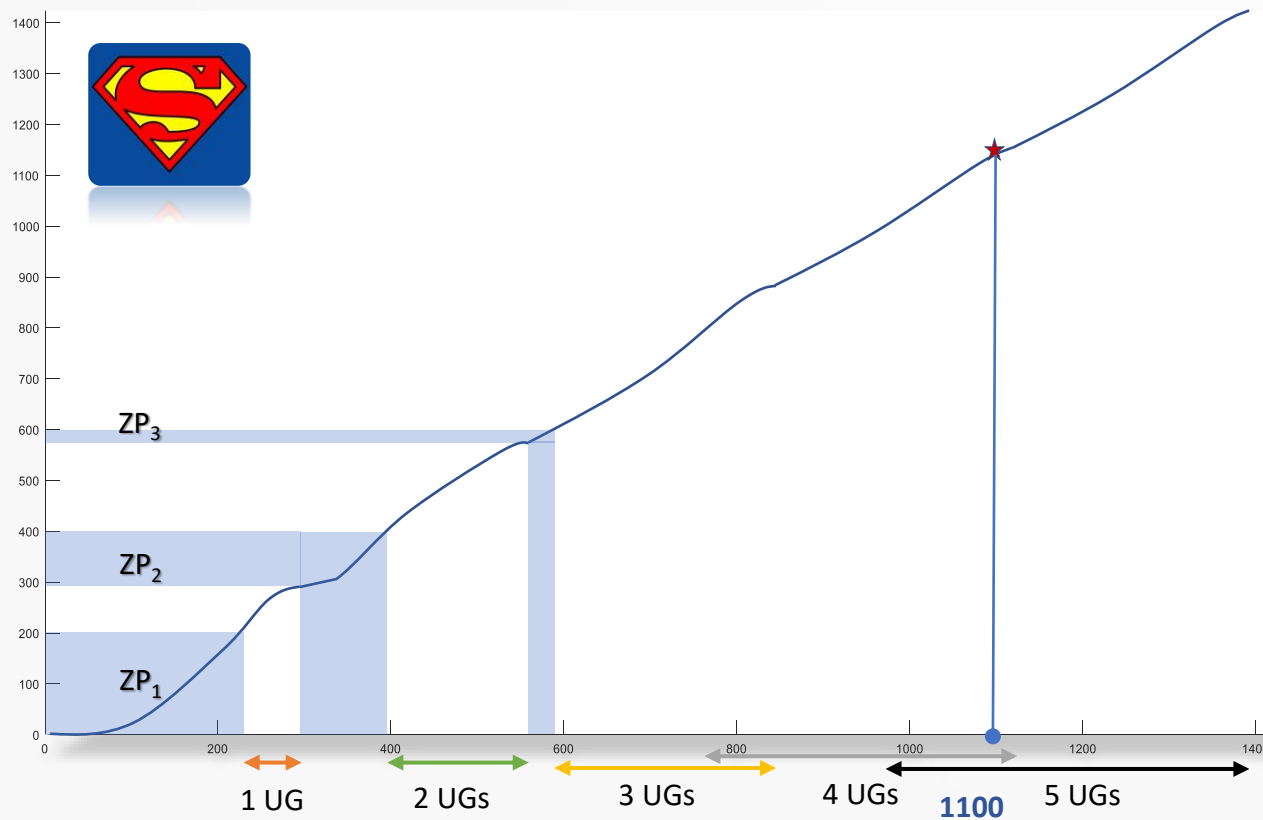
$$0 \leq f(Q, h) \leq GH_t^{\max}$$



PLANT-BASED APPROACH – Considerações Básicas

Exemplo ilustrativo

- Usina com 5 unidades idênticas e uma faixa operativa entre [200-290] MW
- Queda é mantida constante para ilustrar funções de produção com uma variável

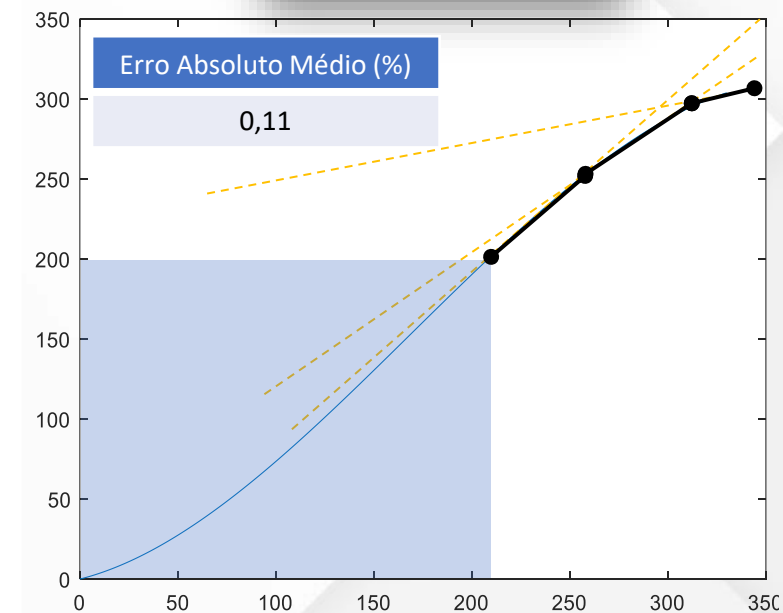
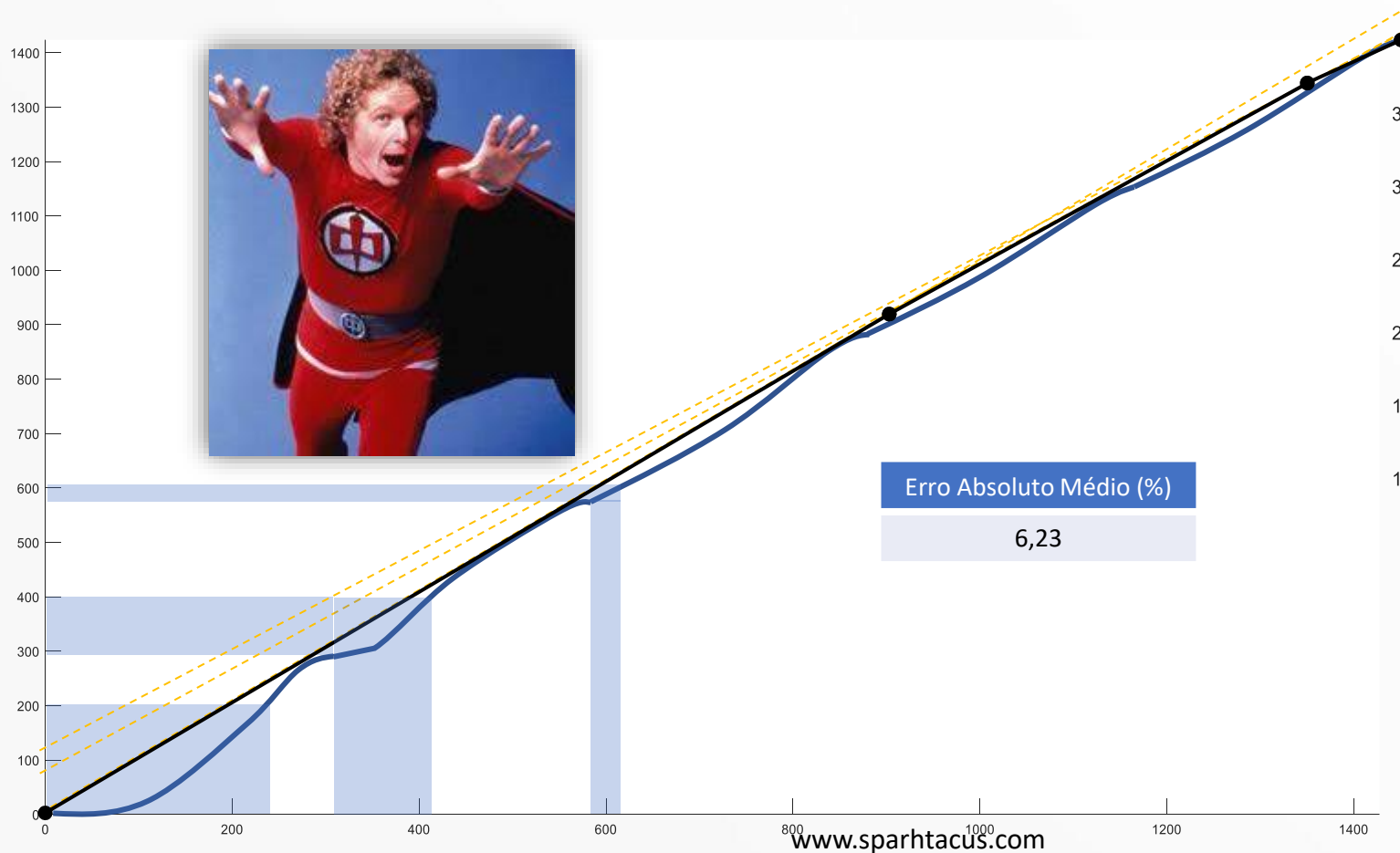


★ 997,64 MW
★ 998,74 MW

PLANT-BASED APPROACH (MAIS COMUM) x INDIVIDUALIZADA

- Super unidade ainda precisa de um “face lift”

- ❑ Zonas proibidas são desconsideradas para evitar decisões 0-1
- ❑ Emprega-se uma aproximação linear por partes para formar um modelo côncavo



SISTEMA TESTE

- **Baseado nos dados do DESSEM**

- ❑ 161 usinas e 731 unidades hidrelétricas
- ❑ 329 unidades termelétricas
- ❑ 7.475 barras e 10.698 linhas (Modelo DC)

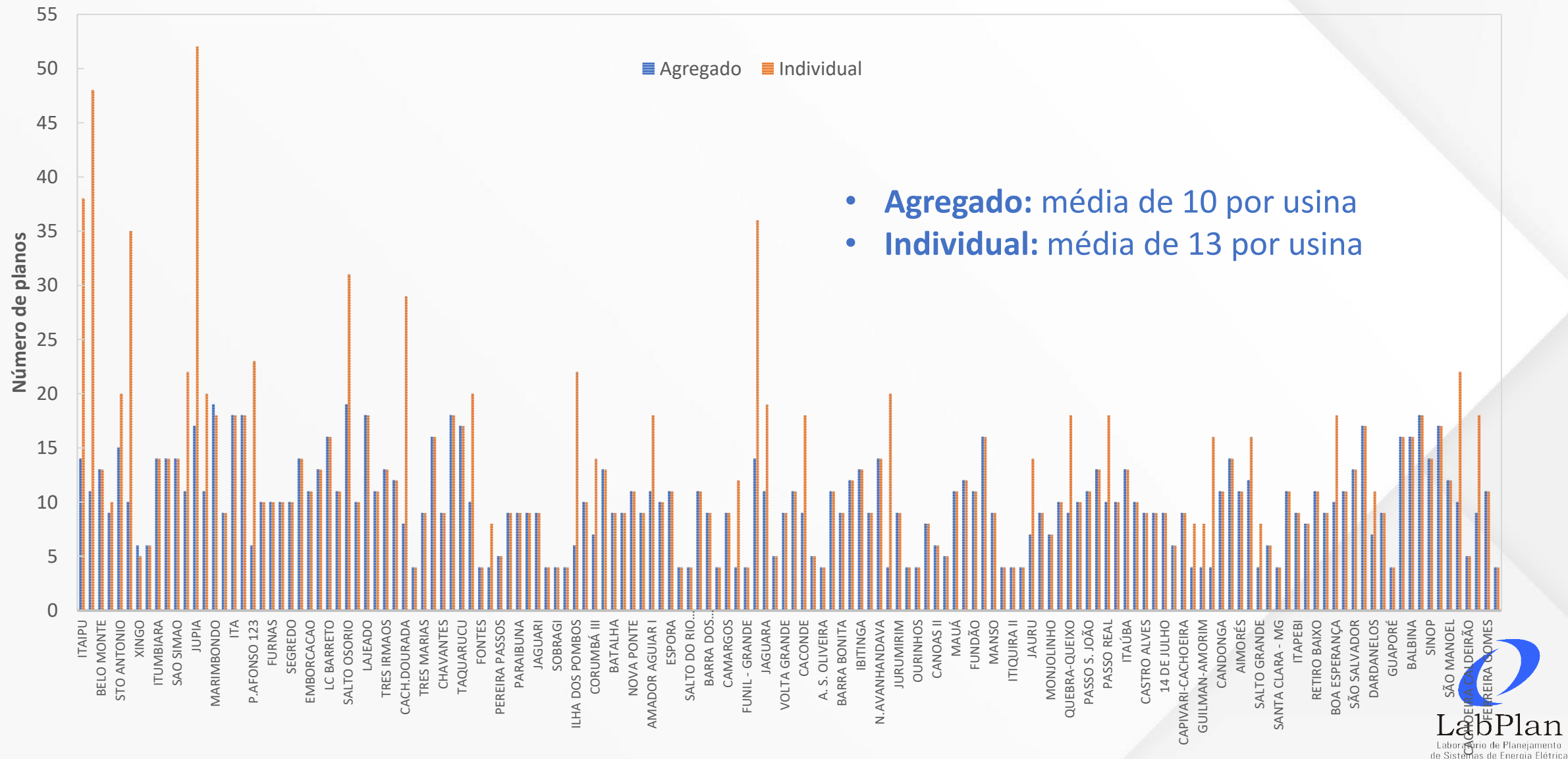
- **Modelo hidrelétrico**

- ❑ FPH linear por partes por grupo de unidades idênticas
- ❑ Depende do volume, vazão turbinada e vertimento (rendimento e perdas aproximadas – função analítica está disponível)
 - **Modelo Agreg-H:** um único modelo agregado contínuo
 - **Modelo Ind-H:** um modelo agregado para cada grupo com a individualização das unidades via faixas operativas
- ❑ Balanço hidráulico, rampas e limites de variáveis
- ❑ Função de custo futuro via SPT

- **Parque gerador termelétrico**

- ❑ Custo unitário variável
- ❑ Limites de geração
- ❑ Rampas e trajetórias de acionamento e desligamento
- ❑ Restrições de *uptime and downtime*

NÚMERO DE HIPERPLANOS



DESCRIÇÃO DOS CASOS

- **Quatro casos baseados nos dados do DESSEM**
 - ❑ 31/1, 7/8 e 11/12 de 2020 com horizonte de 24 horas com discretização semi-horária
 - ❑ 13/7 tem horizonte de 72 horas com discretização semi-horária no primeiro dia
 - ❑ Modelo agregado é resolvido via GUROBI sem decomposição
 - ❑ Modelo individual é resolvido via Decomposição de Benders

- **Dimensão dos modelos de otimização**

Modelo	Variáveis binárias	Variáveis contínuas	Restrições
Agregado	63.168	1.057.441	782.829
Individual	98.832	1.136.833	1.074.737

- **Acréscimo de variáveis contínuas não foi significativo**
- **Por outro lado, número de binárias e restrições tem um aumento considerável (entre 40 a 50%, aproximadamente)**

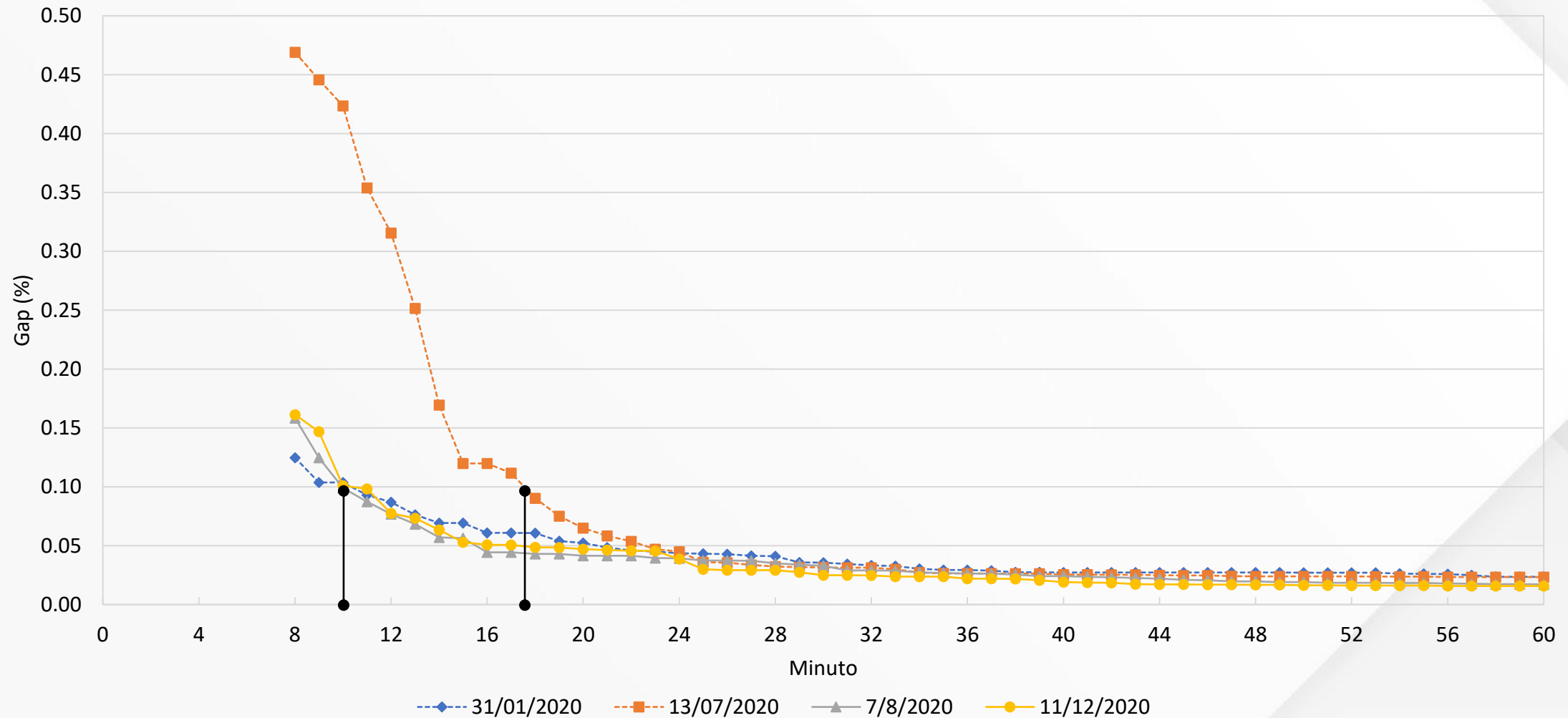
QUAL É A DIFICULDADE DE RESOLVER O MODELO INDIVIDUAL?

- Enquanto o GUROBI resolve o modelo agregado em menos de 10 minutos, em 3 horas o mesmo não foi capaz de encontrar uma solução para um conjunto de 25 casos

Case	UB	LB	Gap (%)	Nós explorados	Tempo (min)	Case	UB	LB	Gap (%)	Nós explorados	Tempo (min)
1	-	60,308,398,262.02	-	11503	178	14	-	120,389,362,324.60	-	8830	179
2	-	60,437,430,010.31	-	11755	178	15	-	120,376,118,158.80	-	3459	179
3	-	60,231,758,274.64	-	11548	178	16	-	82,905,685,380.37	-	11548	179
4	-	60,290,376,136.55	-	11642	178	17	-	82,875,531,385.56	-	11655	179
5	-	60,270,131,893.77	-	11692	178	18	-	82,928,441,108.96	-	11844	179
6	-	56,840,654,943.03	-	11789	178	19	-	83,134,232,120.53	-	11294	179
7	-	56,935,063,366.81	-	6579	179	20	-	83,177,526,762.95	-	3960	179
8	-	57,044,323,216.12	-	9630	179	21	-	60,023,515,096.71	-	11572	179
9	-	57,170,368,544.89	-	11529	179	22	-	60,065,621,905.93	-	11508	178
10	-	57,263,038,930.97	-	11532	179	23	-	60,141,403,563.94	-	11534	178
11	-	120,386,476,452.60	-	11464	179	24	-	60,202,670,725.53	-	11417	178
12	-	120,258,696,062.10	-	11787	179	25	-	60,253,096,283.15	-	11457	178
13	-	120,337,347,386.40	-	10509	179						

QUAL É A DIFICULDADE DE RESOLVER O MODELO INDIVIDUAL?

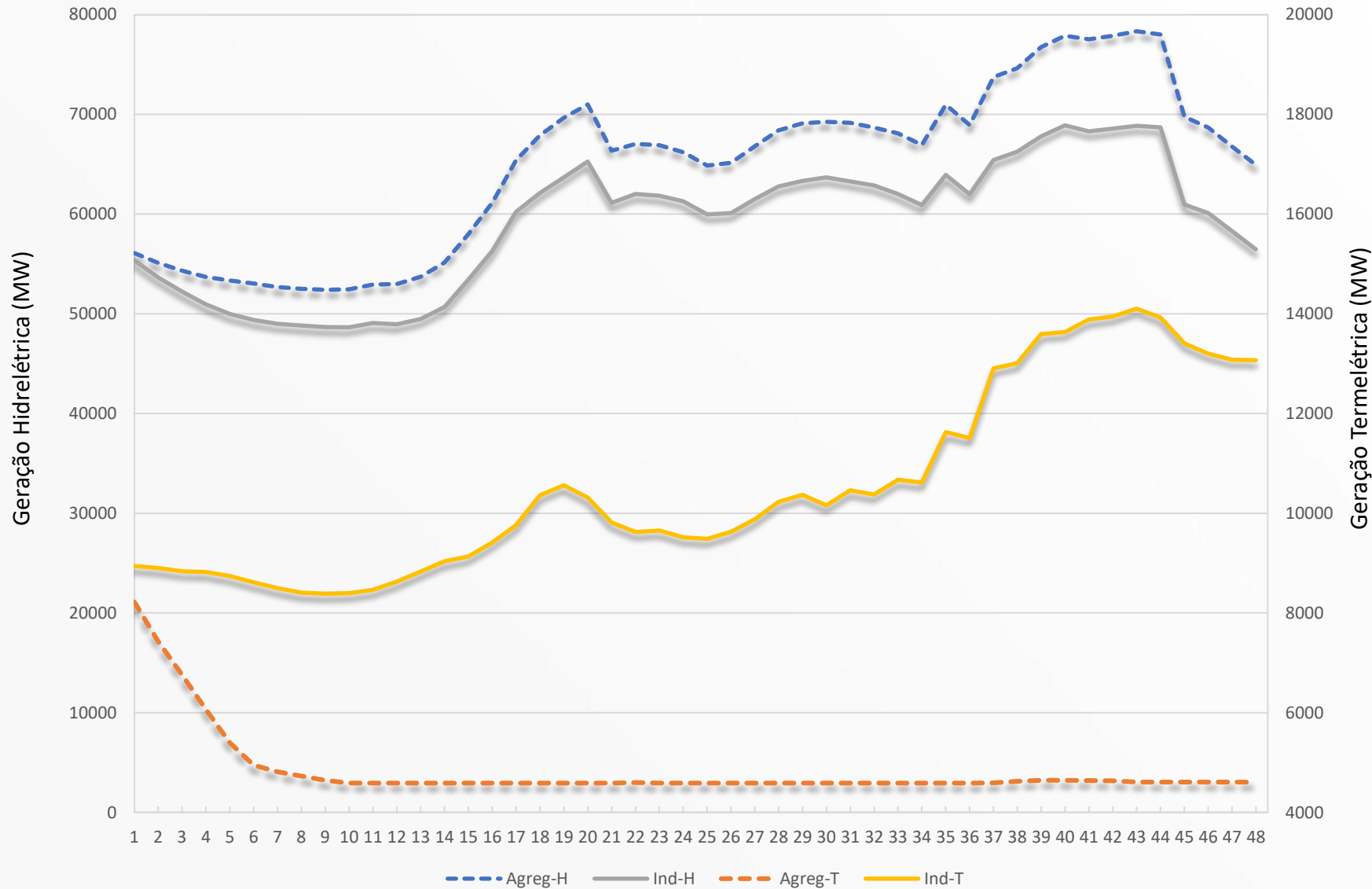
- Convergência do Individual via *Cooperative Multi-search Benders Decomposition*



CUSTOS E GAPS

Modelo	Caso	Gap (%)	Custo Ótimo (R\$)	Limite inferior (R\$)	Custo presente (R\$)	Custo futuro (R\$)
Agregado	31/01/2020	0	106,143,562,189.74	106,143,562,189.74	8,746,229.41	106,221,133,483.15
	13/07/2020		60,679,222,355.99	60,679,222,355.99	32,699,995.16	60,833,580,049.21
	07/08/2020		57,511,350,445.97	57,511,350,445.97	8,094,272.96	57,525,695,996.90
	11/12/2020		73,458,180,953.98	73,458,180,953.97	13,220,783.82	73,503,417,707.83
Individual	31/01/2020	0.0234	106,292,505,225.44	106,267,582,773.95	35,673,274.69	106,209,786,922.22
	13/07/2020	0.0232	60,908,353,845.98	60,894,195,209.05	37,504,996.33	60,837,923,383.95
	07/08/2020	0.0172	57,583,371,726.45	57,573,476,359.04	9,872,853.17	57,537,296,534.02
	11/12/2020	0.0157	73,584,116,817.14	73,572,560,737.98	18,089,488.61	73,512,938,910.68

GERAÇÕES TOTAIS HIDRELÉTRICAS E TERMELÉTRICAS (31/01/2020)

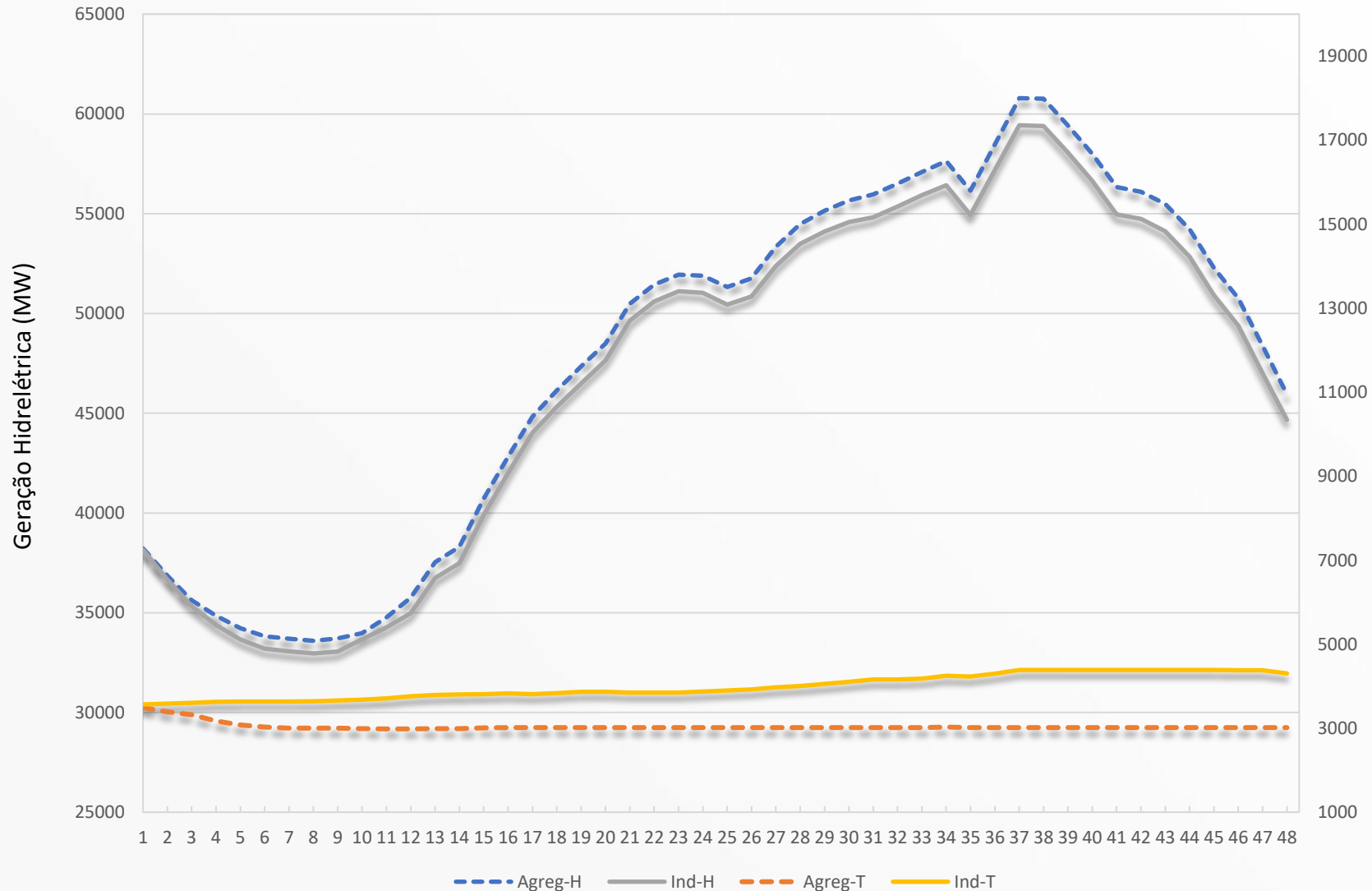


• Valores Médios (MW)

□ Agreg-H:	64819
□ Ind-H:	59107
□ Agreg-T:	4840
□ Ind-T:	10551

- **Geração hidrelétrica ~10% inferior do modelo detalhado, ocasionou uma geração termelétrica 200% maior que o caso agregado**

GERAÇÕES TOTAIS HIDRELÉTRICAS E TERMELÉTRICAS (13/07/2020)

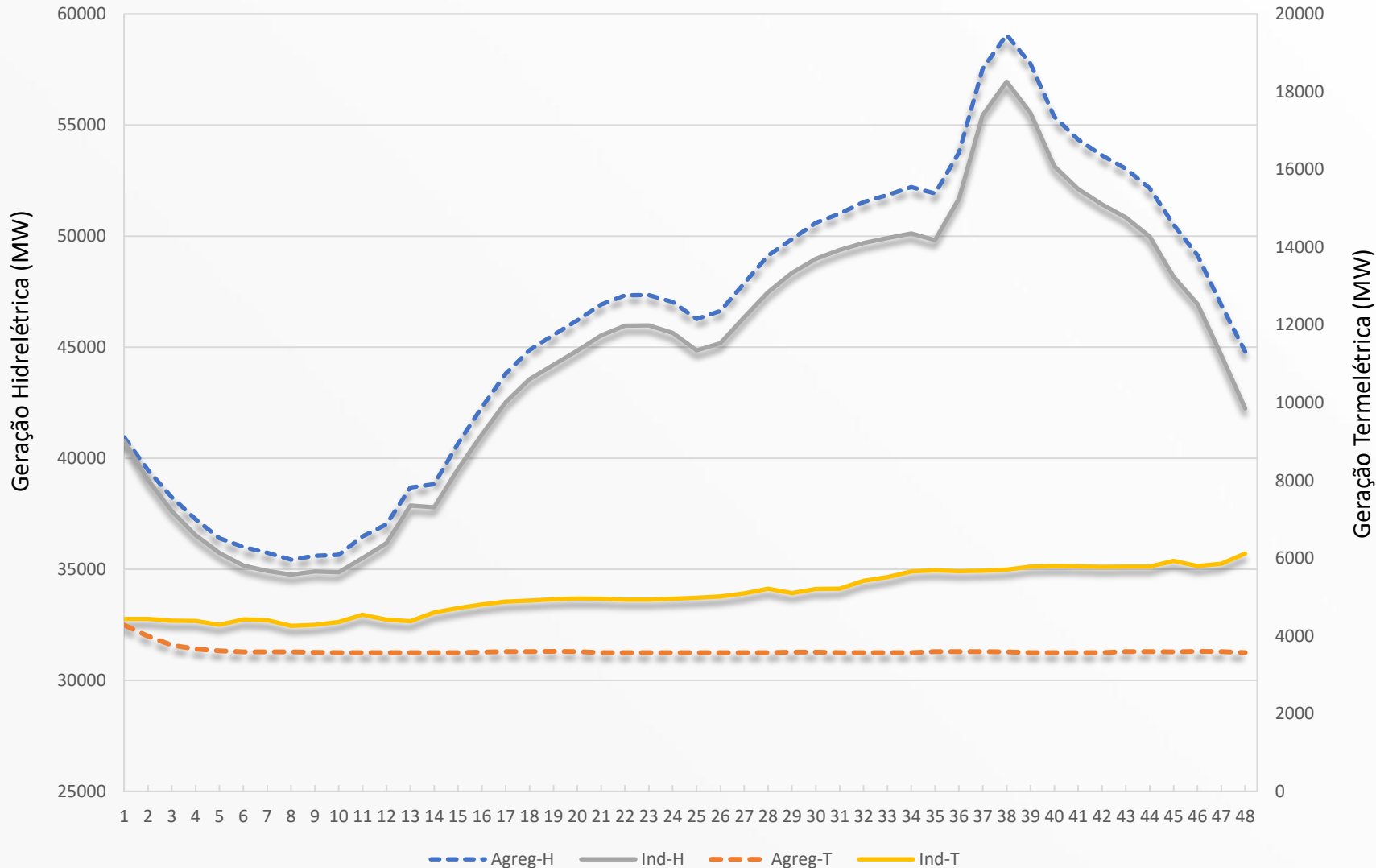


• Valores Médios (MW)

□ Agreg-H:	47773
□ Ind-H:	46836
□ Agreg-T:	3043
□ Ind-T:	3992

- **Geração hidrelétrica ~2% inferior do modelo detalhado, ocasionou uma geração termelétrica 130% maior que o caso agregado**

GERAÇÕES TOTAIS HIDRELÉTRICAS E TERMELÉTRICAS (07/08/2020)

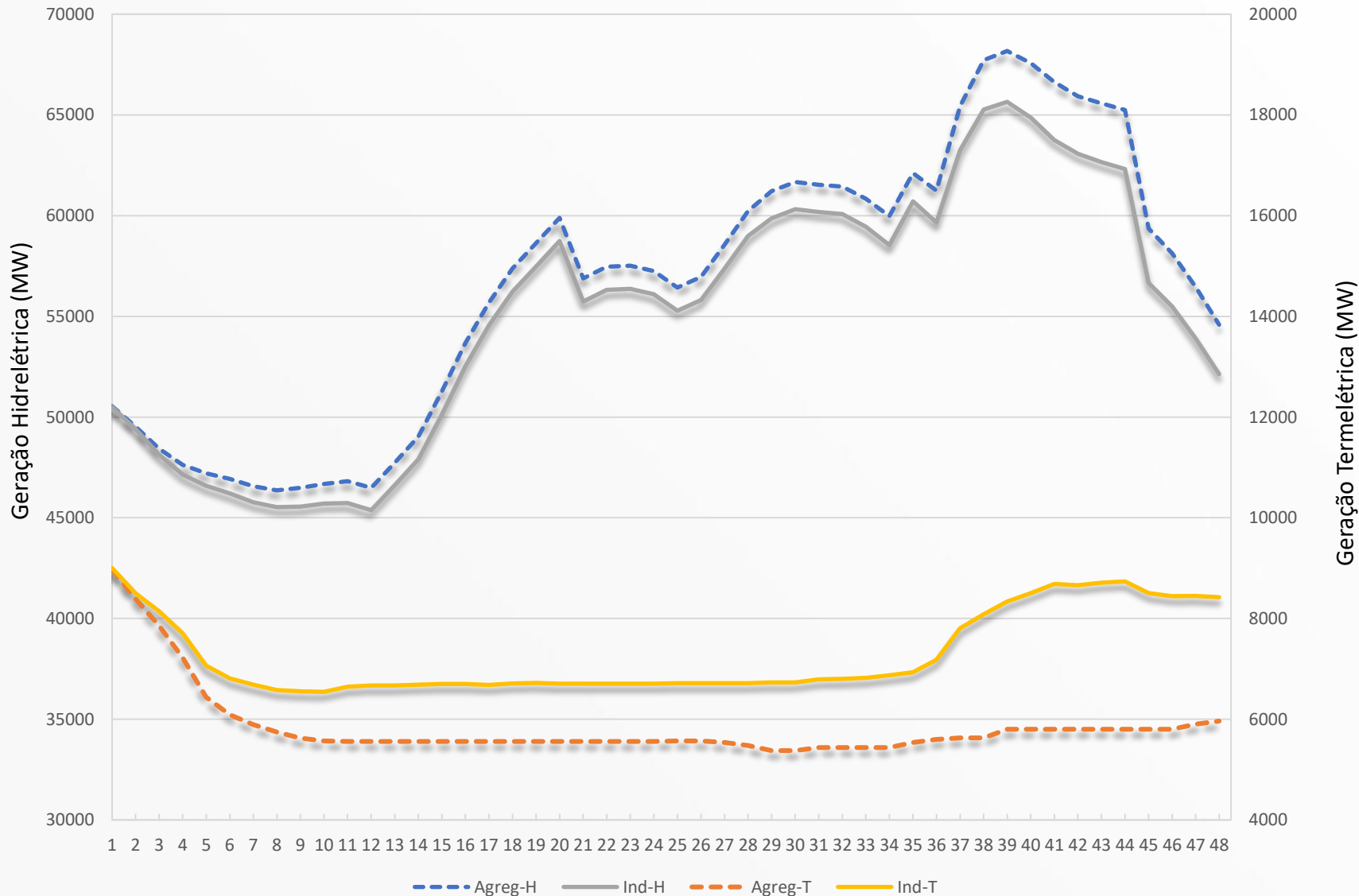


• Valores Médios (MW)

□ Agreg-H:	46054
□ Ind-H:	44576
□ Agreg-T:	3608
□ Ind-T:	5087

- **Geração hidrelétrica ~3% inferior do modelo detalhado, ocasionou uma geração termelétrica 140% maior que o caso agregado**

GERAÇÕES TOTAIS HIDRELÉTRICAS E TERMELÉTRICAS (07/08/2020)



• Valores Médios (MW)

□ Agreg-H:	56565
□ Ind-H:	55119
□ Agreg-T:	5854
□ Ind-T:	7300

- **Geração hidrelétrica ~2,5% inferior do modelo detalhado, ocasionou uma geração termelétrica 125% maior que o caso agregado**

AS 10 MAIORES VIOLAÇÕES MÉDIAS (MW) PARA CADA CASO

31.01.2020			
Planta	Positiva	Planta	Negativa
SLT.SANTIAGO	89	IRAPÉ	-34
BARRA GRANDE	38	ITAPEBI	-27
LC BARRETO	37	CORUMBÁ I	-15
TRES IRMAOS	29	SEGREDO	-15
P.AFONSO 4	20	BARRA GRANDE	-13
SERRA DO FACÃO	18	FUNIL	-8
ITAPARICA	17	BARRA BONITA	-6
PEDRA DO CAVALO	14	14 DE JULHO	-6
AMADOR AGUIAR I	14	MONTE CLARO	-6
SALTO PILÃO	10	AMADOR AGUIAR I	-5

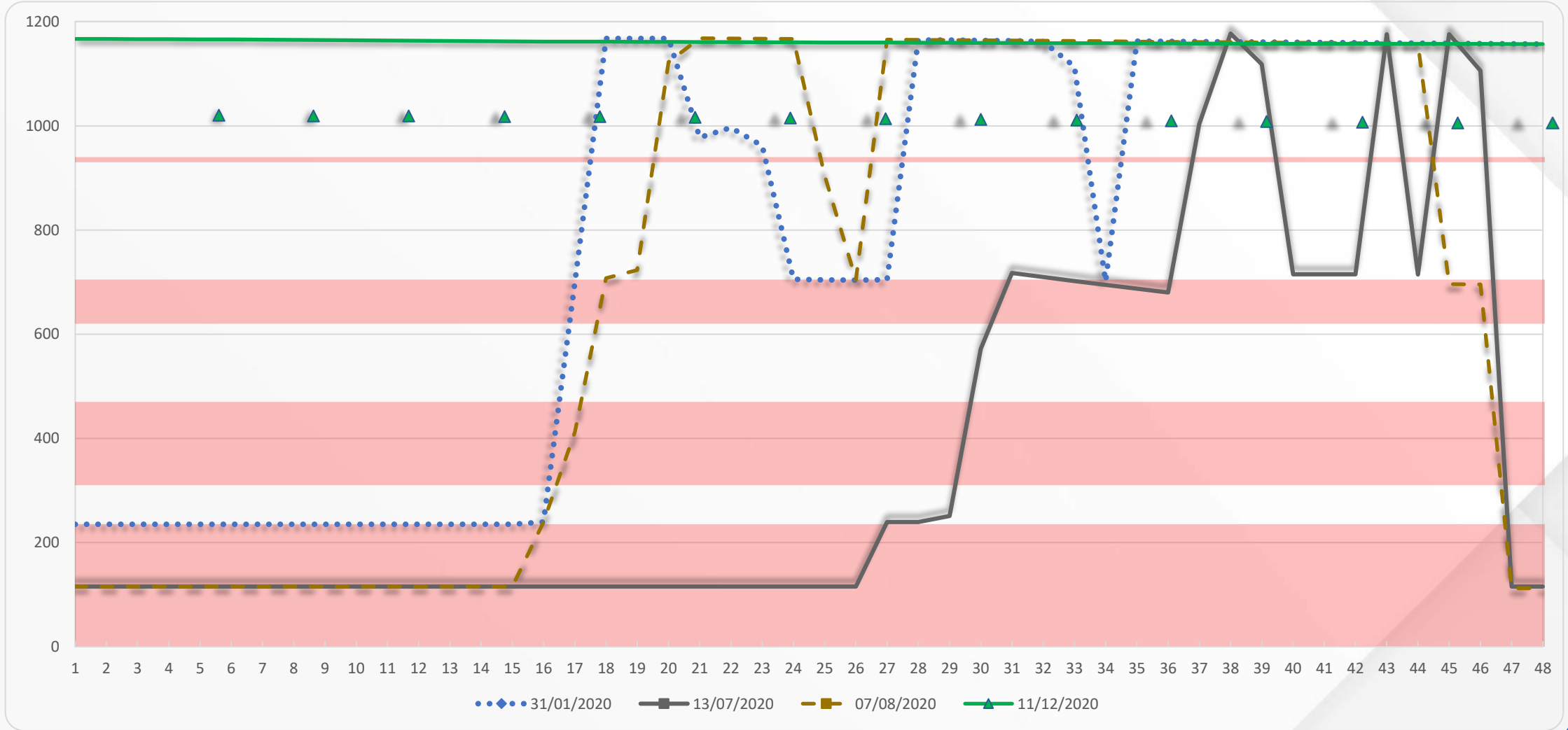
13.07.2020			
Planta	Positiva	Planta	Negativa
BELO MONTE	107	SALTO CAXIAS	-115
ITA	57	MACHADINHO	-87
LC BARRETO	37	FOZ DO CHAPECÓ	-58
FOZ DO CHAPECÓ	35	ITUMBIARA	-51
IRAPÉ	34	SALTO OSORIO	-40
CAMPOS NOVOS	31	CANA BRAVA	-38
CANA BRAVA	23	ITAPEBI	-28
TRES IRMAOS	20	SÃO SALVADOR	-19
PEDRA DO CAVALO	17	BELO MONTE	-19
AMADOR AGUIAR I	16	SAO SIMAO	-15

07.08.2020			
Planta	Positiva	Planta	Negativa
BELO MONTE	130	SALTO CAXIAS	-115
ITA	57	MACHADINHO	-114
LC BARRETO	37	FOZ DO CHAPECÓ	-58
TRES IRMAOS	36	ITUMBIARA	-50
FOZ DO CHAPECÓ	35	SALTO OSORIO	-40
IRAPÉ	34	CANA BRAVA	-38
CANA BRAVA	23	ITAPEBI	-27
N.AVANHANDAVA	21	SÃO SALVADOR	-19
AMADOR AGUIAR I	20	BELO MONTE	-15
SALTO CAXIAS	19	SEGREDO	-15

11.12.2020			
Planta	Positiva	Planta	Negativa
BELO MONTE	206	MACHADINHO	-106
ITA	57	BELO MONTE	-84
FOZ DO CHAPECÓ	37	FOZ DO CHAPECÓ	-58
LC BARRETO	37	ITUMBIARA	-41
TRES IRMAOS	28	CANA BRAVA	-38
AMADOR AGUIAR I	18	IRAPÉ	-34
SERRA DO FACÃO	16	SÃO SALVADOR	-19
FUNDÃO	16	TRES IRMAOS	-12
SLT.SANTIAGO	15	SEGREDO	-10
CORUMBÁ I	8	AMADOR AGUIAR I	-8

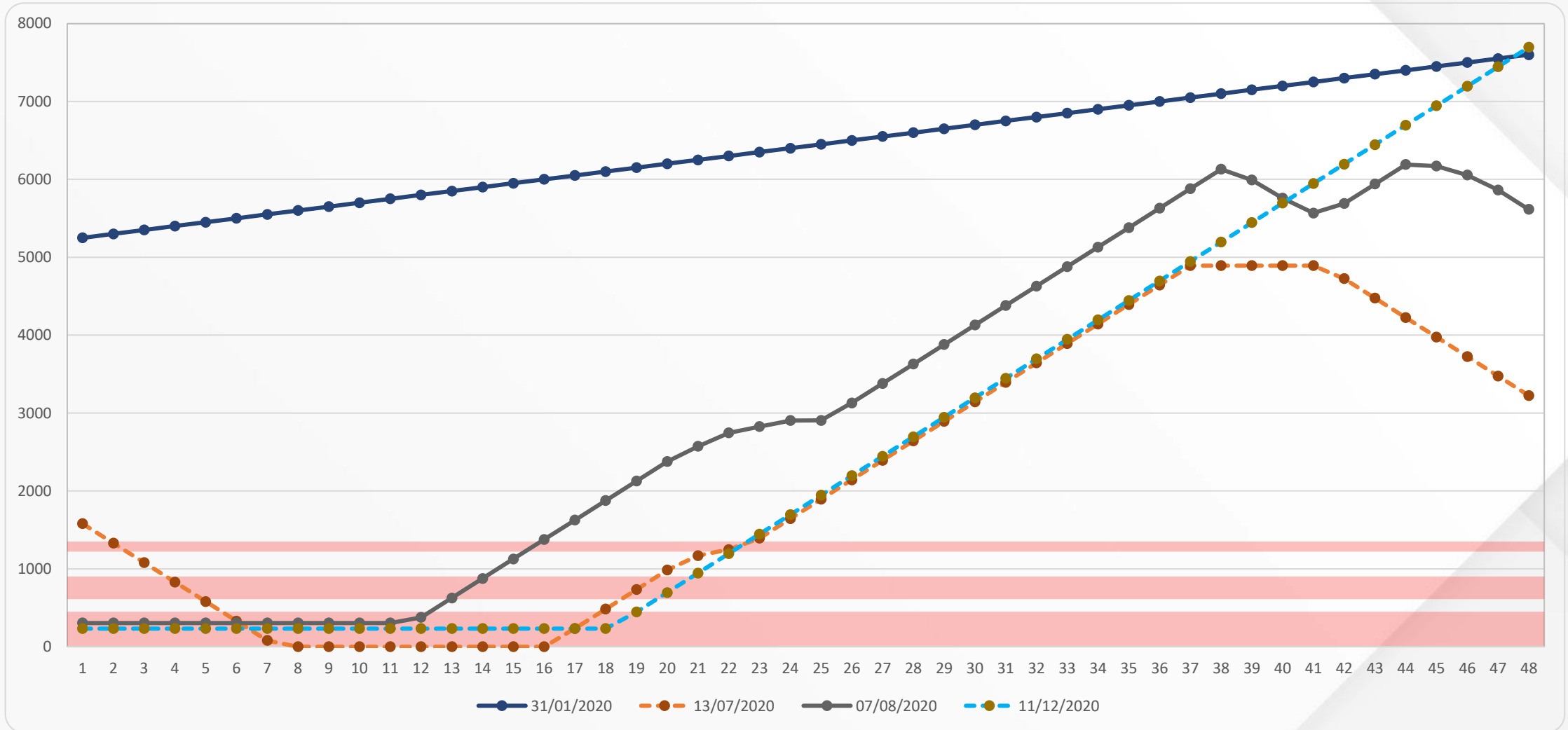
- ❑ **Médias são calculadas somente quando há violação**
- ❑ **Positiva:** A potência viável no modelo individual mais próxima da potência sugerida pelo modelo agregado é maior que essa potência sugerida
- ❑ **Negativa:** Ao contrário

SALTO CAXIAS - 4 UNIDADES IDÊNTICAS COM FAIXA OPERATIVA [235 - 310] MW

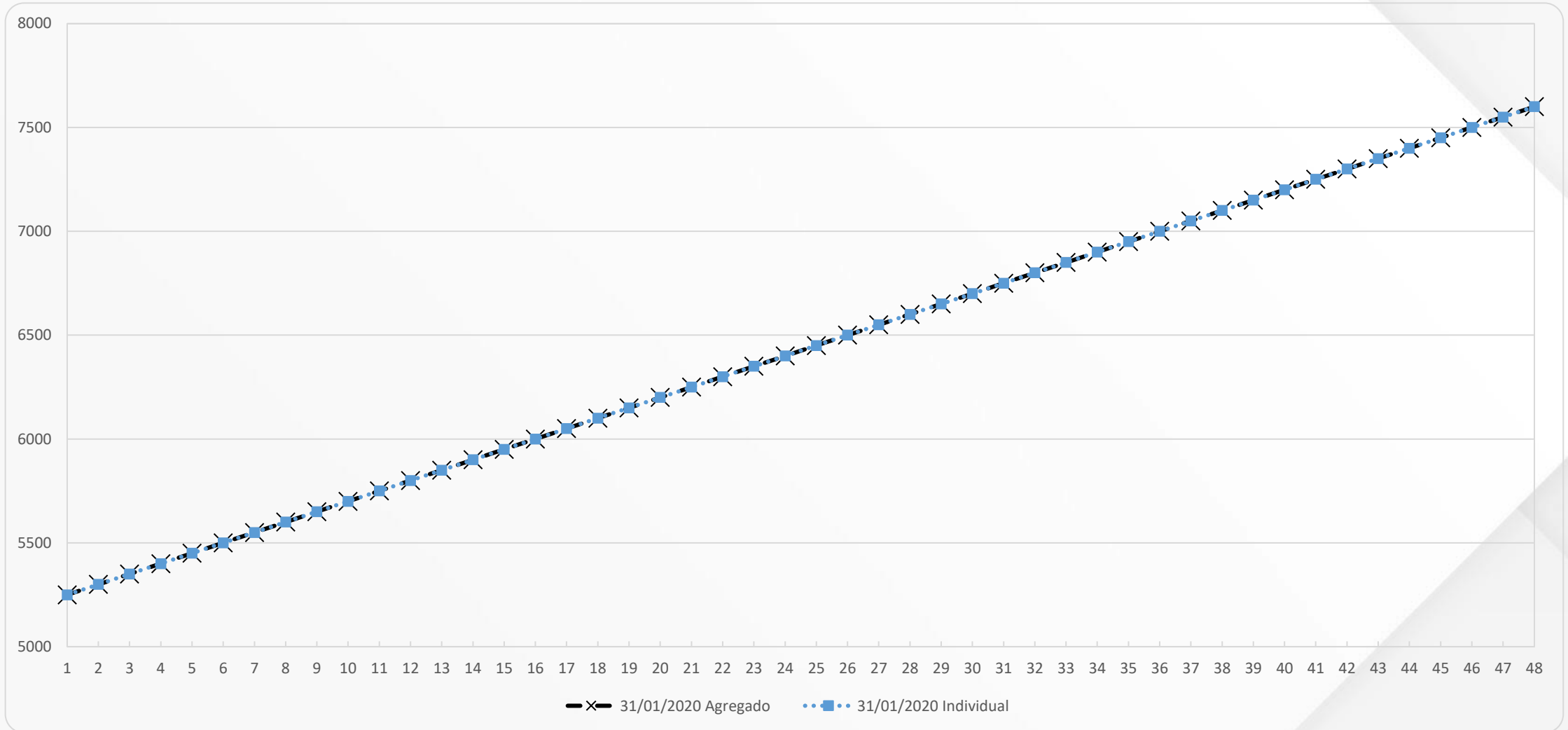


Modelo Agregado

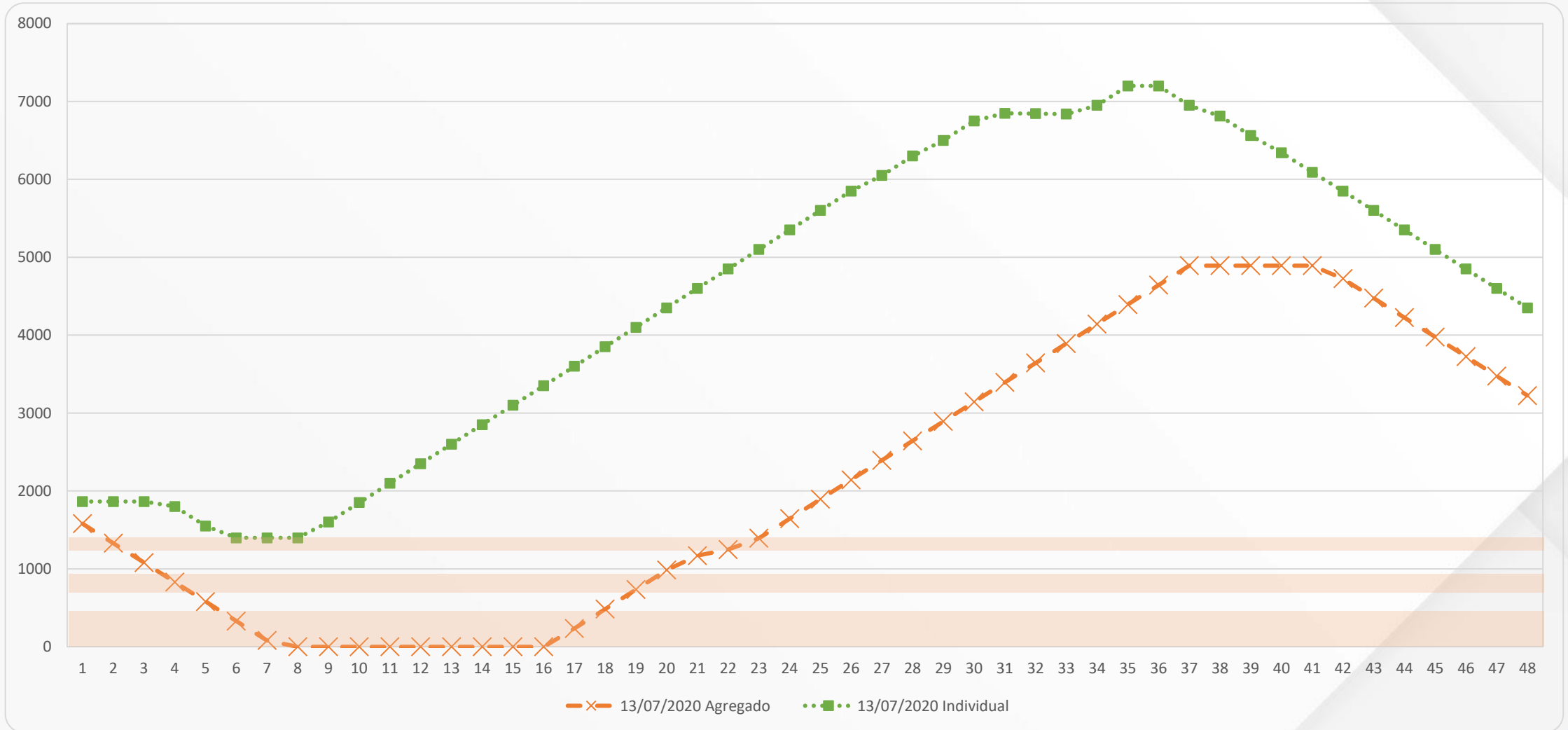
BELO MONTE - 18 UNIDADES IDÊNTICAS COM UMA FAIXA [450 – 611,1] MW



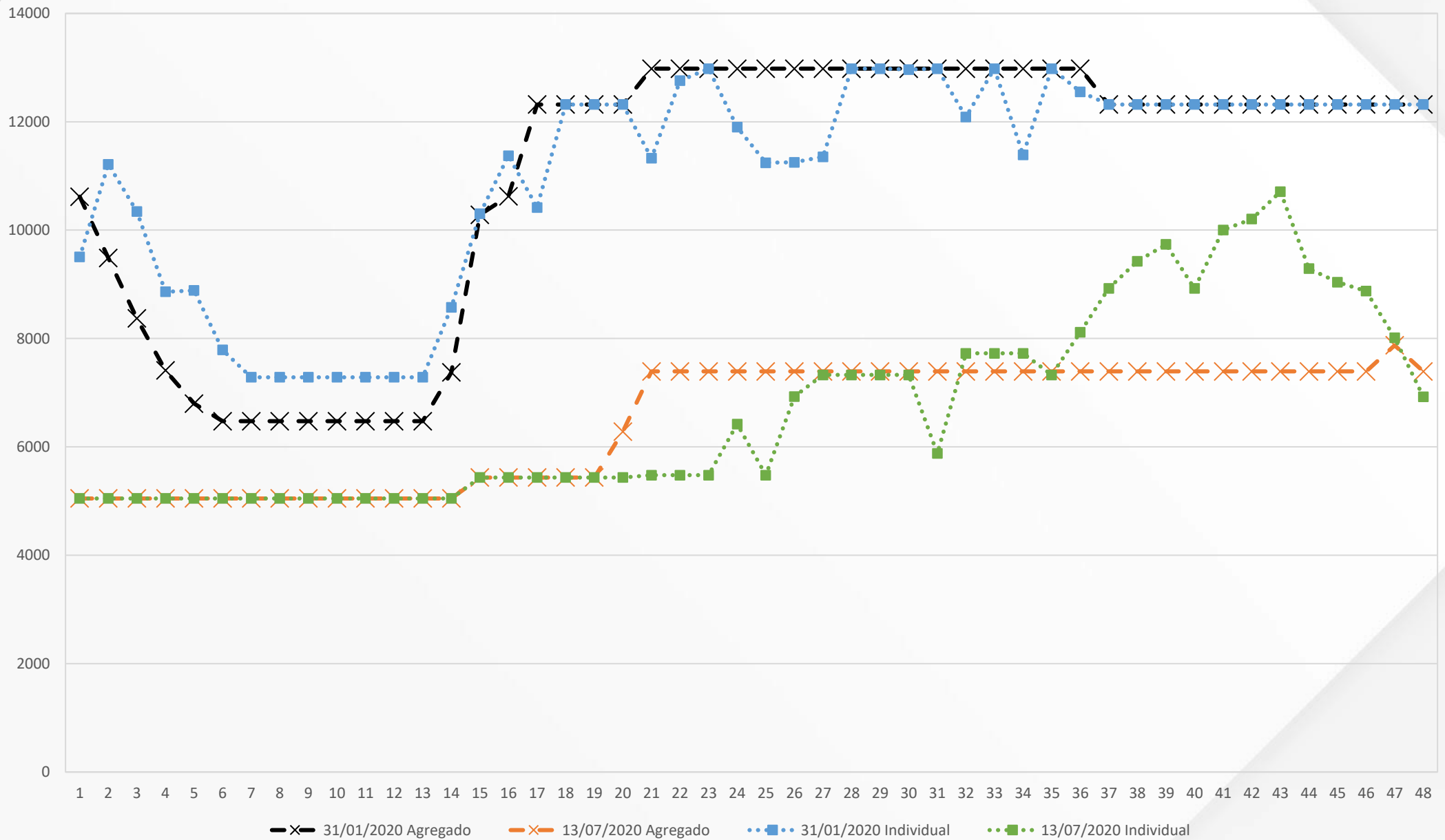
DIFERENÇAS DO DESPACHO (MW) – BELO MONTE (31/01/2020)



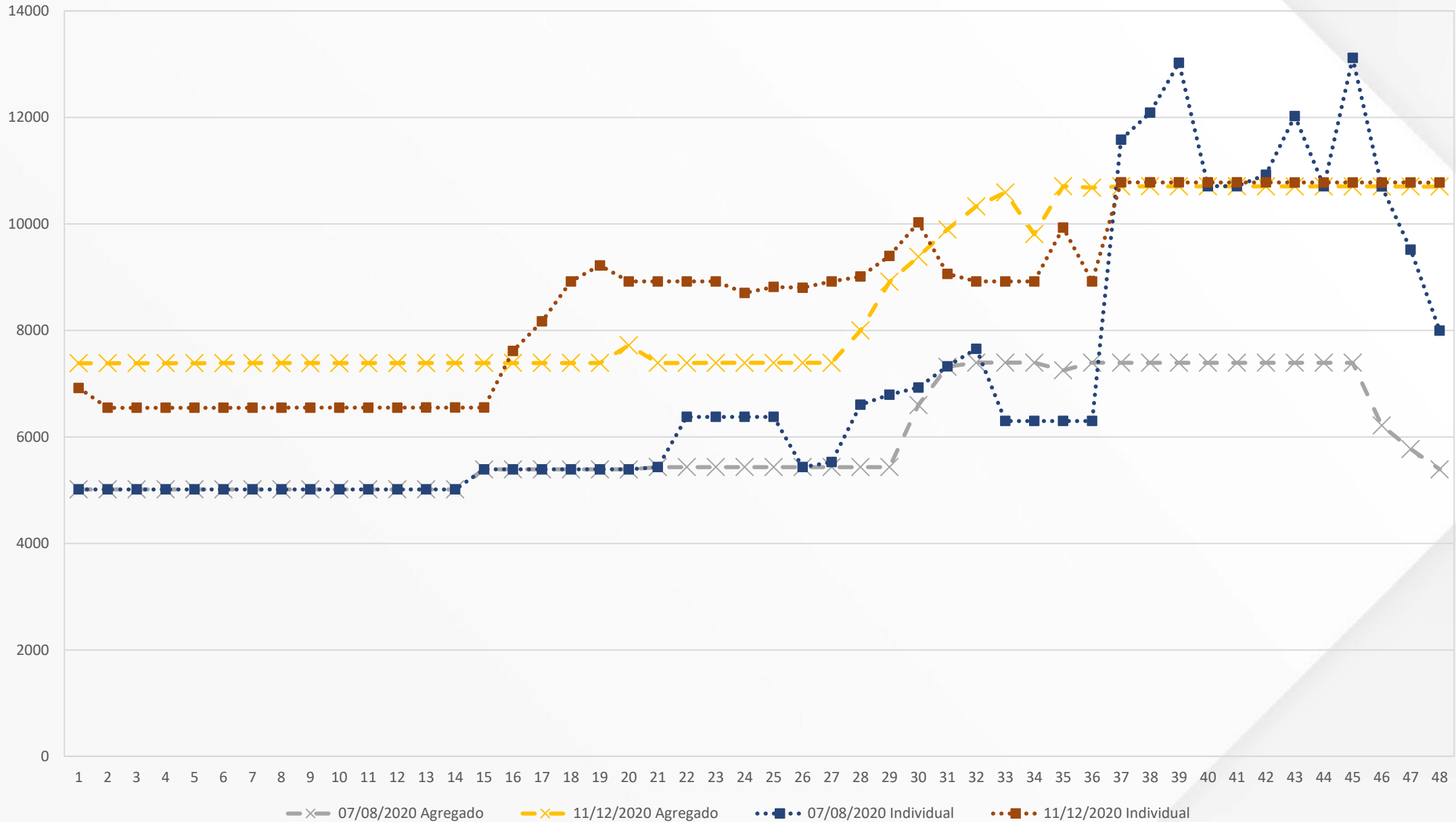
DIFERENÇAS DO DESPACHO (MW) – BELO MONTE (13/07/2020)



DIFERENÇAS NO DESPACHO - ITAIPÚ

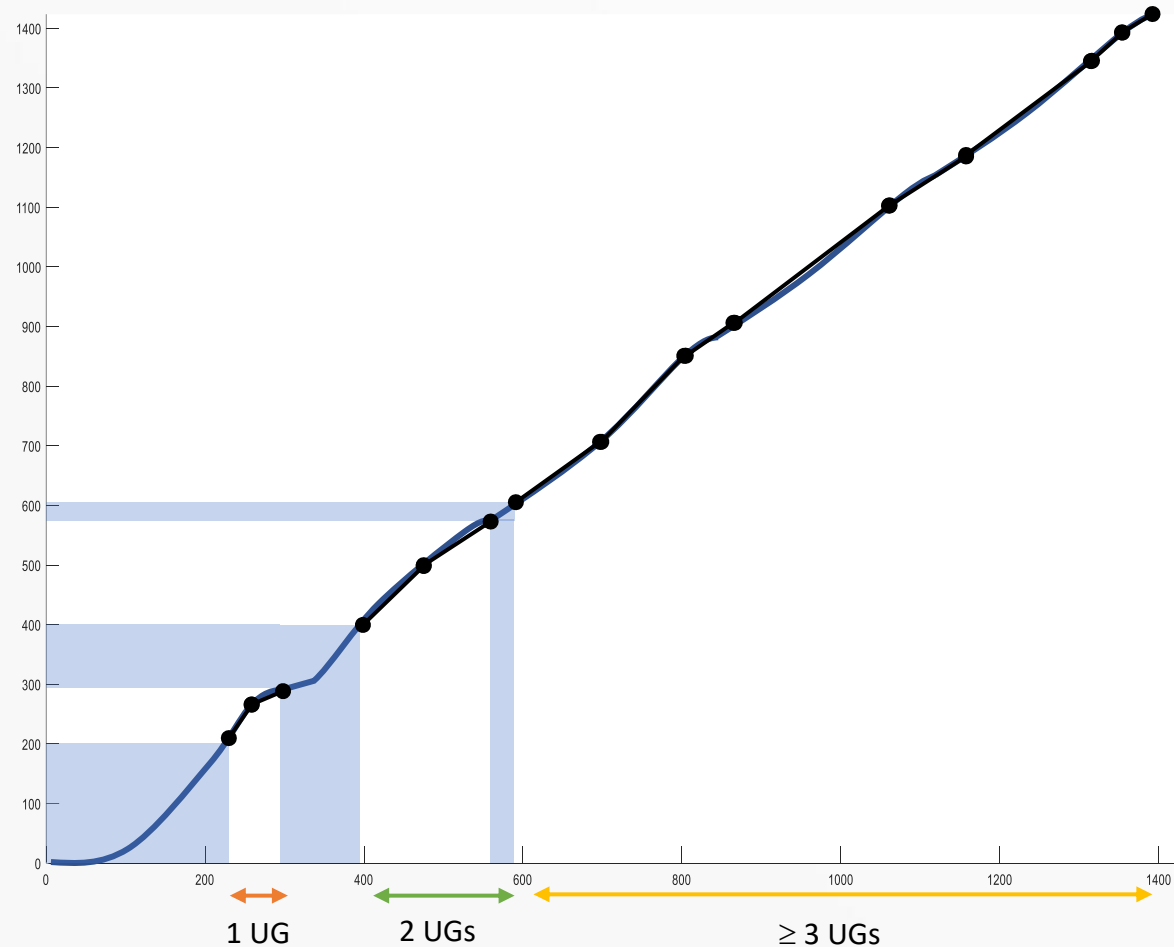


DIFERENÇAS NO DESPACHO - ITAIPÚ



ALTERNATIVA ENTRE A ABORDAGEM ATUAL E A REPRESENTAÇÃO PURA INDIVIDUALIZADA

- Foco nas faixas operativas e não linearidades



- Decide-se qual combinação de unidades idênticas
- Cada combinação tem uma função de produção específica

CODA

- **Aprimoramento da representação hidrelétrica na programação diária é um desafio contínuo**
 - ❑ Restrições de Unit Commitment representam a direção a ser perseguida
 - ❑ Não linearidades e descontinuidades são as principais barreiras
- **Diversidade entre as unidades geradoras exigem um dossiê completo investigativo**
 - ❑ Diferentes tipos de turbina determinam curvas de eficiência e zonas operativas
 - ❑ Diferentes arranjos hidráulicos determinam complexidades de modelagem das perdas no circuito de adução
 - ❑ Usinas têm impactos diferentes na operação do sistema (tanto em termos de potência quanto do valor da água)
- **Arsenal metodológico e computacional**
 - ❑ Decomposição ainda sugere ser a opção mais interessante para vencer o desafio
 - ❑ Técnicas de aprendizado de máquina podem ser uma alternativa para “selecionar” tipo de aproximação e nível de precisão para cada usina

REFERÊNCIAS

1. Cunha, S.; Prado, S.; Costa, J. **Modelagem Da Produtividade Variável Da Usinas Hidrelétricas com Base na Construção de uma Função de Produção Energética**. XII Simpósio Brasileiro De Recursos Hídricos, P. 391–397, 1997.
2. Diniz, A. L.; Maceira, M. E. **A Four-dimensional Model of Hydro Generation for the Short-term Hydrothermal Dispatch Problem Considering Head and Spillage Effects**. IEEE Transactions On Power Systems, V. 23, N. 3, P. 1298–1308, 2008.
3. Cordova, M.M. ; Finardi, E.C. ; Ribas, F.A.C. ; De Matos, V.L. ; Scuzziato, M.R. . **Performance Evaluation and Energy Production Optimization in the Real-time Operation Of Hydropower Plants**. Electric Power Systems Research (Print), V. 116, P. 201-207, 2014.
4. Jiehong Kong, Hans Ivar Skjelbred, Olav Bjarte Fosso, **An Overview on Formulations and Optimization Methods for The Unit-based Short-term Hydro Scheduling Problem**, Electric Power Systems Research, Volume 178, 2020.
5. Bruno Colonetti, Erlon Finardi, Paulo Larroyd and Felipe Beltran. **A Novel Cooperative Multi-search Benders Decomposition for Solving The Hydrothermal Unit-commitment Problem**. [Http://www.Optimization-online.Org/DB_HTML/2021/02/8252.Html](http://www.optimization-online.org/DB_HTML/2021/02/8252.html)
6. Kenny Vinente Santos and Erlon Finardi. **Network-constrained Hydrothermal Unit Commitment in Centralized Cost-based Dispatch Models with Piecewise Linear Approximations for Hydropower Production Function**. Under Review.
 - a) Prof. Secundino Soares da Unicamp
 - b) Prof. André Marcato e seus colegas da UFJF (com seu famoso sigmóide ☺)
 - c) Prof. Rodney R. Saldanha e colegas da UFMG
 - d) Douglas Alexandre Gomes Vieira e demais pesquisadores da ENACOM
 - e) Demais trabalhos do CEPEL, EPE, ONS e vários agentes do setor

2º WorkShop on Computing Efficient Energy Prices

Obrigado!

Prof. Erlon Cristian Finardi (LabPlan/UFSC)

erlon.finardi@ufsc.br