

Grupo de Estudo de Operação de Sistemas Elétricos-GOP

Despacho ótimo econômico de PCHs com unidades geradoras individualizadas usando programação linear inteira mista considerando PLD horário

**RAFAEL FREITAS FERREIRA(1)*; CASSIANO RICARDO PEREGO(1);
GIULIANO PEREIRA(1); MARCIO RIBEIRO FAVERO(1);
ELETROSUL(1);**

RESUMO

A provável entrada do Preço de Liquidação das Diferenças (PLD) em base horária, em Janeiro de 2021, quando a CCEE vai adotar o Dessem no cálculo do Preço de Liquidação das Diferenças (PLD), na contabilização e na liquidação do Mercado de Curto Prazo, vai introduzir nos operadores de PCHs, principalmente àqueles que têm contratos no Ambiente de Contratação Livre, novas oportunidades de incremento na lucratividade e incentivos ao aumento da competitividade [1]. Este informe técnico vai mostrar um comparativo de despacho hidrelétrico de uma das PCHs da Eletrosul considerando o PLD semanal, o PLD horário e o despacho puramente energético.

PALAVRAS-CHAVE

Pequena Central Hidrelétrica, Despacho Ótimo, Planejamento da Operação, Programação Linear Inteira Mista, Preço de Liquidação das Diferenças

1.0 - INTRODUÇÃO

De acordo com o procedimento de rede do Operador Nacional do Sistema (ONS), as Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs), que são as centrais hidrelétricas com potência entre 5 MW e 30 MW, com área de reservatório inferior a 13 km², não conectadas à rede básica, não possuem relacionamento com o ONS, e assim, tem condição de determinar o próprio despacho [2]. Além disto, não há obrigatoriedade deste tipo de central hidrelétrica em participar do Mecanismo de Realocação de Energia, podendo o agente escolher expor-se ao risco hidrológico sob a possibilidade de obter maior rentabilidade.

A otimização do despacho de curto prazo de PCHs é uma ferramenta que auxilia o operador da planta a cumprir a própria política de operação. Na Eletrosul a política de operação atualmente adotada é gerar o máximo de energia, evitando vertimentos e operação flexível - aquela que se permite partir e parar a máquina diversas vezes. Para auxiliar a Eletrosul a cumprir a própria política de operação, foi desenvolvido um software de otimização do despacho das hidrelétricas da companhia, incluindo as PCHs. A interface deste software foi desenvolvida no MatLab, enquanto que o solver utilizado para solucionar o problema de otimização é o Gurobi. Na Figura 1 é apresentada a interface que o planejador utilizaria para simular o despacho das centrais hidrelétricas no curto prazo.

A PCH que terá o despacho ótimo energético (que não leva em consideração o PLD) comparado com o despacho ótimo econômico será a Barra do Rio Chapéu (PCHBC). Ainda quando se fala em despacho econômico é levado em consideração o PLD horário e o PLD semanal. A PCH fica localizada no município catarinense de Rio Fortuna e possui duas máquinas horizontais do tipo Francis dupla idênticas. A potência da PCH é de 15,15 MW e sua garantia física foi determinada em 8,61 MW médios [3]. A PCH é despachada através do Centro de Operação da Geração da Eletrosul, em Florianópolis. O tipo de despacho é considerado do Tipo III pelo ONS e possui

vertedouro de soleira livre. A Figura 2 apresenta imagens aéreas da PCH. Devido a capacidade limitada de regularização do reservatório (19 horas apenas) as simulações de curto prazo terão horizonte de três dias (72 estágios de simulação).

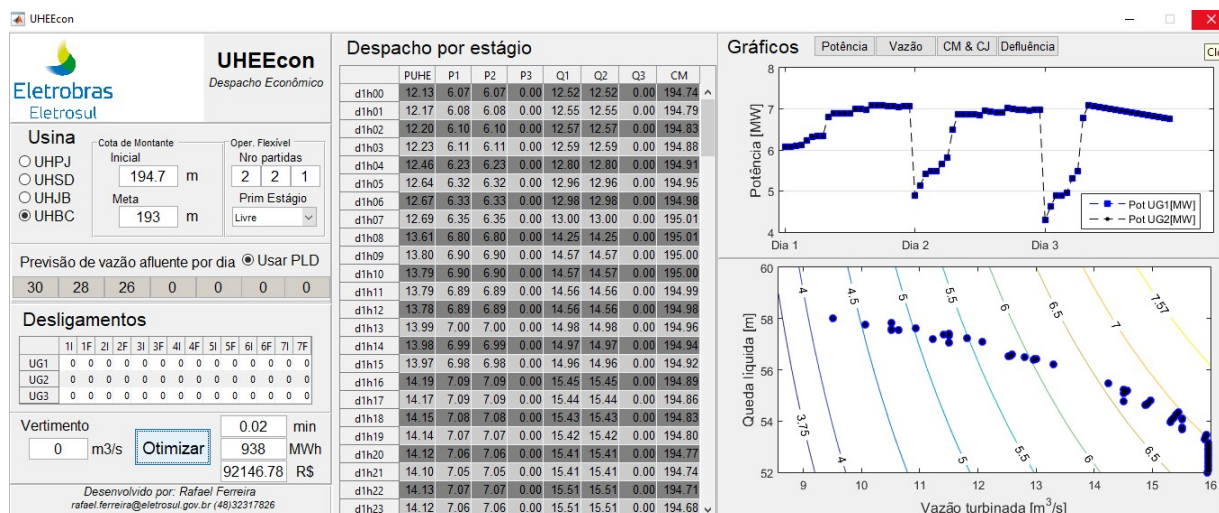


FIGURA 1 – Interface gráfica do programa de despacho ótimo



FIGURA 2 – Casa de força da PCH (à esquerda) e vertedouro de soleira livre

2.0 - MODELO DE OTIMIZAÇÃO

Para a otimização do despacho das centrais hidrelétricas, foi escolhida a técnica da Programação Linear Inteira Mista (PLIM). A técnica foi escolhida por apresentar eficiência quando avaliado acurácia e esforço computacional por diversos autores [4, 5, 6, 7]. Para a linearização das funções não lineares foi utilizado as técnicas de Convex Hull, também testada de forma satisfatória por diversos autores [7, 8].

Como já citado, a função objetivo do problema de otimização é executar o maior despacho de energia ou despachar a maior energia com maior rentabilidade, levando em consideração a mesma política operacional. Para tal, o modelo de otimização de interesse do trabalho é proposto como:

$$\Pi = \max \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N psg_{it} \quad (a) \quad \text{ou} \quad \Pi = \max \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N psg_{it} \cdot pld_t \quad (b) \quad (1)$$

sujeito a:

$$v_{t+1} - v_t + C \cdot (\Theta_t + s_t) = C \cdot Y_t \quad (2) \quad \delta_t - (\Theta_t + s_t) = 0 \quad (10)$$

$$\Theta_t - \sum_{i=1}^N q_{it} = 0, \quad (3) \quad \sum_{k=1}^K Q_k^{\min} z_{ikt} - q_{it} \leq 0, \quad q_{it} - \sum_{k=1}^K Q_k^{\max} z_{ikt} \leq 0, \quad (11)$$

$$psg_{it} - P_0^{u_p} \cdot z_{it} - P_1^{u_p} \cdot q_{it} - P_2^{u_p} \cdot h_{it} \leq 0, \quad u_p = 1, U_p, \quad (4) \quad Q^{\min} \sum_{k=1}^K (1 - z_{ikt}) \leq w_t - q_{it} \leq Q^{\max} \sum_{k=1}^K (1 - z_{ikt}), \quad (12)$$

$$E_0^{u_{gh}} + E_1^{u_{gh}} \cdot q_{it} + E_2^{u_{gh}} \cdot h_{it} \leq 0, \quad u_{gh} = 1, U_{gh}, \quad (5) \quad u_{it} - \sum_{k=1}^K z_{ikt} = 0, \quad (13)$$

$$\Delta h_{it} - DH_0^{u_{DH}} \cdot z_{it} - DH_1^{u_{DH}} \cdot q_{it} - DH_2^{u_{DH}} \cdot \Theta_t \geq 0, \quad (6) \quad n_{it} - u_{it} + u_{i,t-1} \geq 0, \quad (14)$$

$$u_{DH} = 1, U_{DH}$$

$$h_{it} - (A_0 + A_1 \cdot v_t) + c_j t + \Delta h_{it} = 0 \quad (7) \quad \sum_{t=1}^T n_{i,t} - NP \leq 0, \quad (15)$$

$$c_j t - C_0^{u_{cj}} - C_1^{u_{cj}} \cdot \delta_t \leq 0, \quad u_{cj} = 1, U_{cj}, \quad (8) \quad n_{it}, u_{it}, z_{it} \in \{0, 1\}, \quad (16)$$

$$s_t - S_0^{u_s} - S_1^{u_s} \geq 0, \quad u_s = 1, U_s \quad (9) \quad H^{\min} \leq h_{it} \leq H^{\max}, V^{\min} \leq v_t \leq V^{\max}, S^{\min} \leq s_t \leq S^{\max}, \quad (17)$$

$$CJ^{\min} \leq c_j t \leq CJ^{\max}, v_T = V, z_{ikt} = CI.$$

em que:

psg_{it}	potência de saída do gerador i no estágio t [MW];
p/d_t	preço da energia no estágio t [R\$]
v_t	volume do reservatório no estágio final do estágio t [hm ³];
Θ_t	vazão turbina na usina durante o estágio t [m ³ /s];
s_t	vertimento no estágio t [m ³ /s];
C	constante que converte m ³ /s para hm ³ em um dado estágio de tempo;
Y_t	vazão afluyente prevista para o estágio t [m ³ /s];
q_{it}	vazão turbinada na unidade i no estágio t ;
h_{it}	queda líquida da unidade i no estágio t ;
P_0, P_1, P_2	coeficientes dos hiperplanos de psg ;
E_0, E_1, E_2	coeficientes das retas que limitam a faixa operativa das unidades;
Δh_{it}	perda de carga da unidade geradora i no estágio t ;
DH_0, DH_1, DH_2	coeficientes dos hiperplanos da função perda de carga;
A_0, A_1	coeficientes do polinômio de cota de montante;
$c_j t$	cota de jusante no estágio t ;
C_0, C_1	coeficientes das retas da função c_j ;
S_0, S_1	coeficientes das retas da função que representa o vertimento em função do volume;
δ_t	defluência do reservatório no estágio t [m ³ /s];
z_{ikt}	variável binária que indica se a unidade i está operando ($z_{ikt} = 1$) na faixa operativa k durante o estágio t ;
k	índice relacionado a região permitida de operação das unidades;
K	quantidade de faixas permitidas da unidade;
w_t	variável auxiliar utilizada para forçar a distribuição igualitária de vazão entre as máquinas que estão em operação [m ³ /s];
n	variável binária auxiliar que assume valor unitário se a máquina foi partida;
NP	número de partidas permitido na simulação;
Q^{\min}, Q^{\max}	vazão turbinada mínima e máxima das unidades [m ³ /s]. Dado que em todos os casos as máquinas são idênticas, esse limite independe da unidade em uma mesma UHE;
H^{\min}, H^{\max}	queda líquida mínima e máxima das unidades [m]. A mesma consideração para os limites de vazão turbinada também é válida para a queda líquida;
V^{\min}, V^{\max}	volume mínimo e máximo do reservatório [hm ³];
S^{\min}, S^{\max}	vertimento mínimo e máximo [m ³ /s];
CJ^{\min}, CJ^{\max}	cota de jusante mínima e máxima [m];
u_p, u_{DH}, u_{cj}, u_s	índices relacionados a quantidade de hiperplanos da psg , Δh e as retas c_j e s ;
U_p, U_{DH}, U_{cj}, U_s	quantidade de hiperplanos da psg e Δh e quantidade de retas na c_j e s ;
V	meta do volume para o último estágio de simulação [hm ³];
CI	vetor com as variáveis binárias que define a condição inicial de cada unidade.

A função objetivo visa maximizar a potência sem levar em consideração o preço da energia (1-a) ou maximizar o produto entre a máxima energia e o preço da energia no estágio de simulação t (1-b). As equações (2) representam o balanço de massa d'água para o reservatório ao longo do tempo. A Equação (3) representa o balanço hidráulico nas máquinas. Já (4) representa o conjunto de hiperplanos que modela a Função de Produção Hidráulica (FPH). Esta função de produção hidráulica pode ser vista na Figura 3.

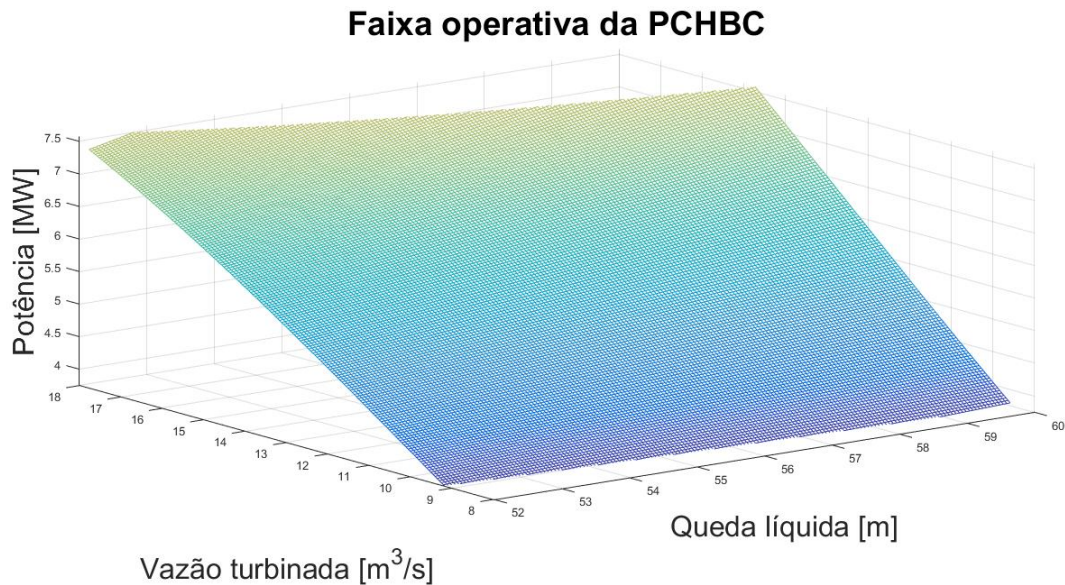


FIGURA 3 – Função de Produção Hidráulica da PCHBC

As perdas de carga são dadas por (6), enquanto (7) determina a queda líquida. As restrições (8) correspondem ao modelo linear por partes da cota de jusante. Na PCHBC esta função pode ser linearizada por apenas duas retas. Já (9) representa o modelo linear por partes do vertimento em função do volume no reservatório. Esta restrição é necessária pois, a PCH possui vertedouro de soleira livre. As restrições (10) representam a defluência da usina em cada estágio. Por sua vez, (11) limita a vazão turbinada para cada faixa permitida. Sendo que (12) utiliza uma variável auxiliar para igualar as vazões turbináveis das máquinas idênticas que estão em operação. As restrições (13) garantem que o despacho de cada unidade é dado em apenas uma das faixas operativas. As restrições (14) representam variáveis binárias que assumem valor unitário sempre que uma unidade é ligada. Já as restrições (15) determinam o número máximo de partidas de uma dada unidade geradora. Por fim, (16) e (17) são os limites das variáveis, além da meta de volume do reservatório ao final da simulação e o estado inicial das unidades.

2.1 Resultados Computacionais

Como já apresentado na Figura 1, uma interface gráfica foi desenvolvida para tornar mais amigável a programação do despacho de curto prazo. No campo “Usina”, o usuário deve escolher qual usina será despachada. A simulação é feita usina por usina. Em seguida no campo “Cota de Montante” deve preencher corretamente dados válidos da cota de montante inicial e a meta no período de simulação (sete dias para as UHEs e três dias para as PCHs). No campo “Oper. Flexível” o usuário deve escolher o número máximo de partidas de cada UG no período de simulação. Este número deve ser um inteiro positivo. Ainda dentro do mesmo campo o usuário define a condição das máquinas no primeiro estágio. As vezes se a máquina já estava operando anteriormente, convém mantê-la operando até o início do horário comercial. As plantas são tele assistidas, logo não há mantenedores fora do horário comercial. No campo “Previsão de vazão afluyente por dia” o programador preenche as sete (três) previsões de vazão diária para as UHEs (PCHs). No campo “Desligamentos” é possível informar para o programa os horários que as UGs deverão estar desligadas para uma manutenção preventiva, por exemplo.

No campo “Vertimento” o programador preenche o vertimento desejado. Para as UHEs é possível verter mais do que o sanitário, pois há comportas para este controle. Caso seja deixado zero, o programa assumirá o vertimento como o vertimento mínimo que consta na licença operacional da planta para o mês da simulação. No caso das PCHs, independentemente do que o usuário insere, o vertimento mandatório será, no mínimo, o sanitário. Caso o nível de do reservatório esteja acima da soleira, o vertimento é dado pela equação (9). O botão “Otimizar” utiliza a PLIM para entregar o despacho energético ótimo da central hidrelétrica de acordo com as condições de entrada especificadas (1-a). Ao final da simulação é apresentado o tempo gasto para resolver o problema. Caso seja optado por “Usar PLD” o programa vai importar a previsão de PLD do submercado da planta e executar o despacho ótimo econômico. A diferença entre o PLD semanal e o PLD horário para o período simulado está exposto na Figura 4.

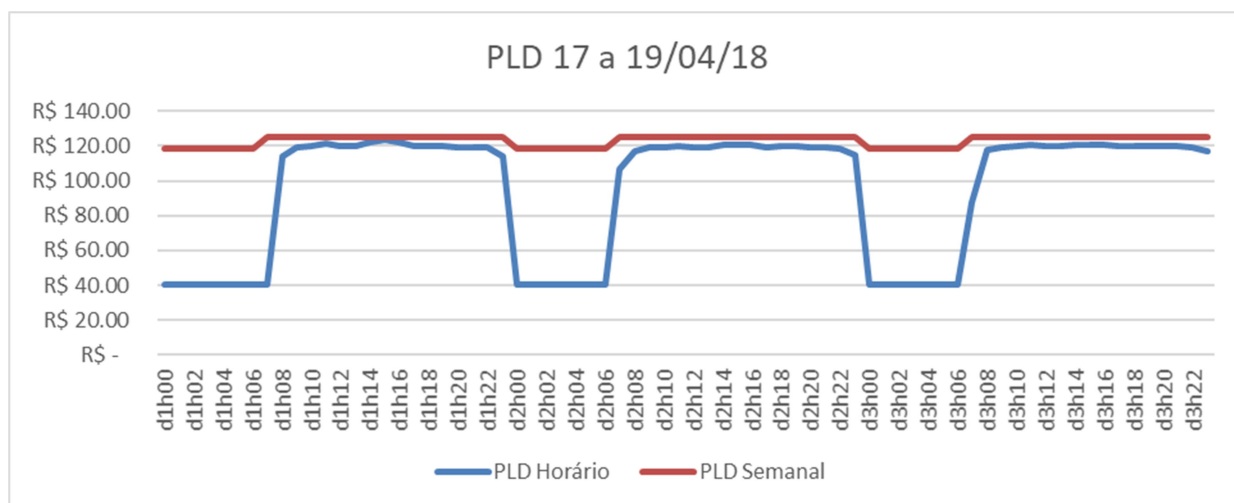


FIGURA 4 – Variação do PLD ao longo de três dias (Caso 1)

Para a simulação dos três despachos é importante que sejam determinadas algumas premissas. As mesmas estão expostas na Tabela 1.

Tabela 1 – Premissas da simulação de despacho ótimo

Caso 1 – Abril de 2018	Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
Nível de montante	194,0 m		
Meta de nível de montante	193,5 m		
Número máximo de partidas e paradas	3		
Previsão diária de vazão afluente	12 m ³ /s 15 m ³ /s 13 m ³ /s		
PLD	Não usa	PLD Semanal	PLD Horário

Ao não considerar o preço da energia o programa vai otimizar o despacho conforme a equação (1-a) entregando a maior quantidade de energia possível dentro das restrições impostas incluindo a função de produção hidráulica (4). Não usando PLD, o despacho previsto pela PLIM foi de 425 MWh. Este despacho é apresentado na Figura 5.

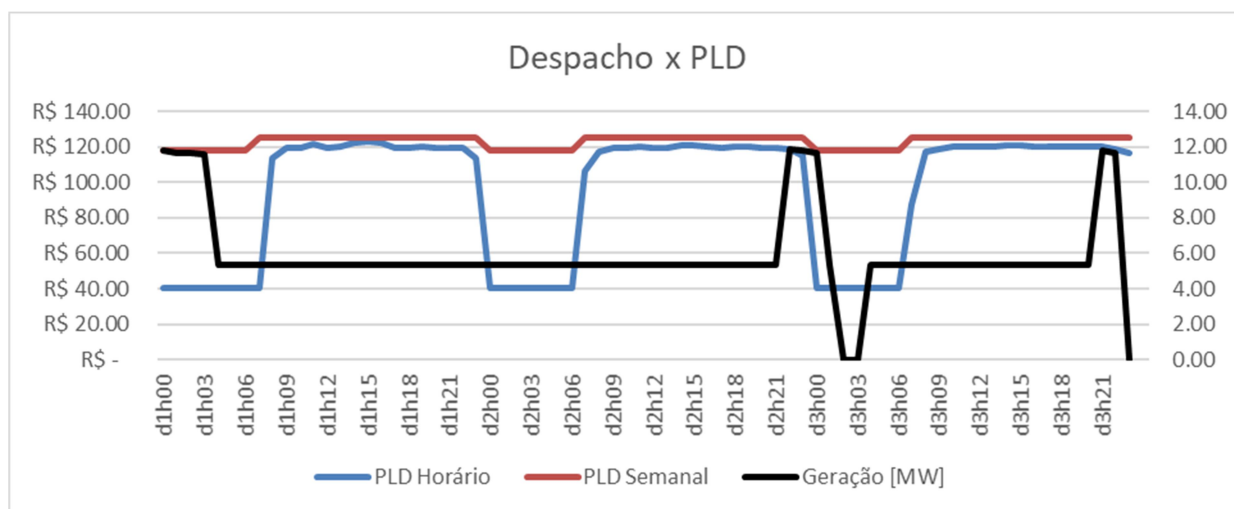


FIGURA 5 – Despacho da PCH sem levar em consideração o PLD

Observa-se que o despacho é descolado do preço da energia. Considerando o PLD horário, o despacho da Figura 5 geraria para empresa uma receita de aproximadamente R\$ 39.500,00. Se o PLD em vigor é o semanal, a receita seria de R\$ 52.284,08.

Ao considerar o PLD semanal, a um preço como o apresentado na Figura 4, na simulação de otimização, tem-se o despacho apresentado na Figura 6.

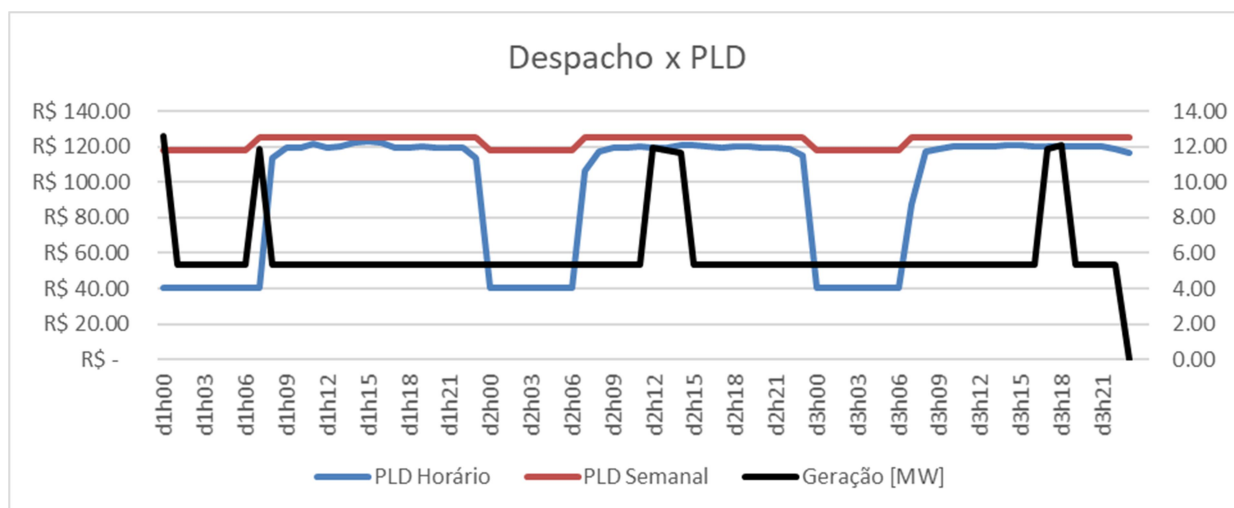


FIGURA 6 – Despacho da PCH levando em consideração o PLD semanal

Ao otimizar a maximização da receita, ao invés da maximização da potência por estágio (energia), a PLIM já privilegia o despacho nos horários onde a energia está mais cara. Como o PLD semanal é baseado em um preço de energia que pouco varia, a energia sugerida no final da simulação é semelhante ao caso anterior, 425 MWh, alterando apenas os estágios onde o despacho deve ser maior ou menor. No caso simulado, considerando o PLD semanal, a receita seria de R\$ R\$ 52.380,96. Ao executar o despacho deste modo, considerando PLD horário, a receita seria de R\$ 40.165,78.

Por outro lado, o despacho econômico que leva em consideração o PLD horário leva a uma receita de R\$ 43267,48, mesmo gerando menos, 415 MWh. No caso apresentado na Figura 4, há diferença de preços razoáveis entre o PLD horário e o PLD semanal. Quanto maior esta diferença de preço de energia maior será a diferença de receita. O despacho deste caso é apresentado na Figura 7.

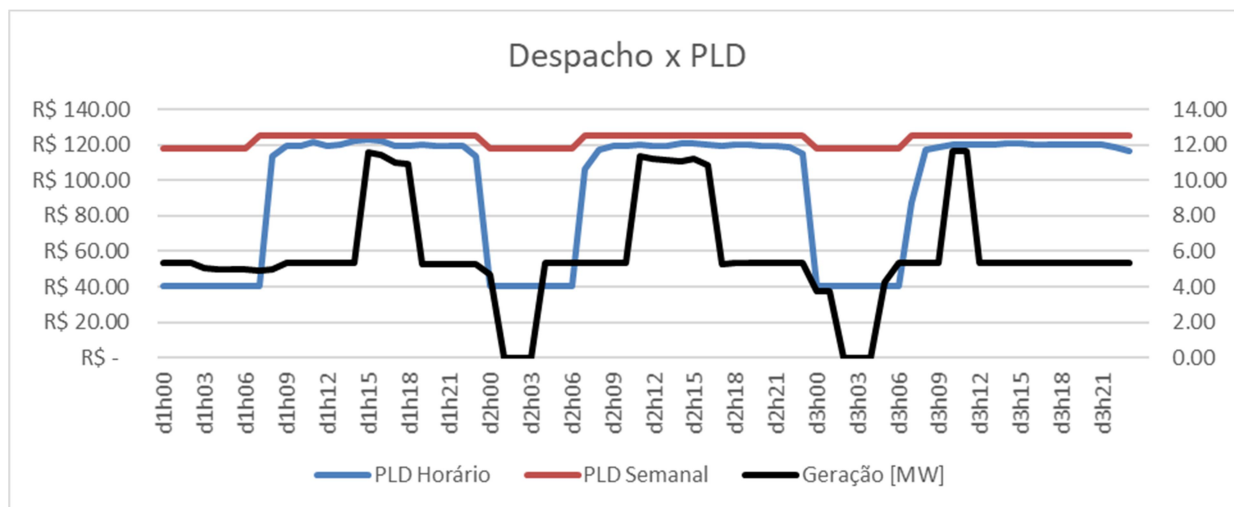


FIGURA 7 – Despacho da PCH levando em consideração o PLD horário

A Figura 7 mostra que o despacho econômico é aderente ao PLD horário prevendo o maior despacho de potência nos horários em que os preços são mais atrativos e economizando água nos horários de menor preço.

3.0 - CONCLUSÃO

Neste informe técnico foi apresentado um caso onde se comparou o despacho de uma PCH da Eletrosul considerando PLD semanal, horário e apenas o despacho energético. A ferramenta desenvolvida para esta simulação tem potencial para ajudar as empresas no cumprimento da própria política de operação. No caso apresentado verifica-se que após a implementação do PLD horário as empresas que dispuserem de ferramentas de otimização de despacho econômico terão vantagem competitiva, uma vez que, os softwares de otimização iria sugerir o despacho maior nos horários mais atrativos economicamente, respeitando as restrições operacionais como: eficiência das máquinas, perdas, meta de volume de reservatório ao longo do horizonte de simulação,

perdas hidráulicas e paradas de manutenção por exemplo. Considerando o PLD horário, a receita e a geração de energia da empresa em cada caso seriam conforme a Tabela 2.

Tabela 2 – Receita sugerida após a otimização do despacho considerando PLD horário

Caso 1 – Abril de 2018	Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
Geração	425 MWh	425 MWh	415 MWh
Receita	R\$ 39.559,63	R\$ 40.165,78	R\$ 43.267,45

Para um estudo completo sobre o tema, do ponto de vista da comercialização, deve-se ampliar a modelagem considerando todos os recursos (geração e contratos de compra) e requisitos (contratos de venda e consumo da usina). Consequentemente, a função objetivo também se ampliaria. Para o caso, do modo como foi apresentado, vale salientar que esta ótica de perdas e ganhos não é direta. As empresas normalmente estão cobertas por contratos. Porém, em um exercício de comparação que serve para uma análise qualitativa, ao considerar o PLD semanal, a receita da simulação 1 (despacho ótimo energético) seria de R\$ 52.284,08. Em um cenário de PLD horário, a empresa teria, para o caso apresentado, ter que enfrentar uma redução de receita para R\$ 39.55,63. Ainda, a entrada do PLD horário exigirá da empresa uma nova política de operação das plantas. Neste exercício de comparação a diferença de receita, para uma PCH fora do MRE, onde a energia é valorada no PLD, pode chegar a R\$ 30 mil por mês.

4.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) CANAL ENERGIA. Canal Energia, 2020. Disponível em: <<https://www.canalenergia.com.br/noticias/53107058/preco-horario-sera-implantado-pelo-ons-em-2020-e-pela-ccee-em-2021>>. Acesso em: 15 de ago. 2020.
- (2) ONS. Submódulo 26.2 - Critérios para Classificação da Modalidade de Operação de Usinas. [S.l.]. 2016.
- (3) MME. Portaria nº 440, de 23 de setembro de 2005. Brasília. 2005.
- (4) BORGHETTI, A. et al. An MILP Approach for Short-Term Hydro Scheduling and Unit Commitment With Head-Dependent Reservoir. IEEE Transaction on Power System, v. 23, p. 1115-1124, August 2008.
- (5) CHANG, G. W. et al. Experiences With Mixed Integer Linear Programming Based Approaches on Short-Term Hydro Scheduling. IEEE Transactions on Power Systems, v. 16, p. 743-749, November 2001.
- (6) NILSSON, O.; SJELVGREN, D. Mixed-Integer Programming Applied to Short-Term Planning of a Hydro-Thermal System. IEEE Transactions on Power Systems, v. 11, p. 281-286, February 1996.
- (7) FERREIRA, R. F.; Programação do Despacho de Geração de Unidades Hidrelétricas via Programação Linear Inteira Mista. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Florianópolis. 2018.
- (8) FREDO, G. L. M. Análise de Diferentes Representações da Função de Produção Hidrelétrica no Problema do Planejamento da Operação Energética de Médio Prazo. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Florianópolis. 2016.

5.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Rafael Freitas Ferreira nascido em 1985 na cidade de Recife, em Pernambuco. Graduou-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) em 2008 e obteve o título de Mestre em Sistemas de Energia pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) em 2018. Desde 2011 trabalha na Eletrosul, subsidiária da Eletrobrás, na Engenharia de Manutenção da Geração, atendendo preferencialmente aos seguintes sistemas: Geradores hidrelétricos e compensadores síncronos, proteção de máquinas, sistemas de média tensão, parques eólicos e usinas fotovoltaicas.



Cassiano Ricardo Perego nascido em 1977 na cidade de Canoinhas, em Santa Catarina. Graduou-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) em 2001. Desde 2005 trabalha na Eletrosul, subsidiária da Eletrobrás, onde atuou na Engenharia da Geração e atualmente na Engenharia de Manutenção da Transmissão, atendendo preferencialmente as seguintes áreas: projeto de sistemas e equipamentos elétricos de usinas hidroelétricas, eólicas e fotovoltaicas; e manutenção de equipamentos de subestações.



Giuliano Pereira nasceu em 1975 em Florianópolis, Santa Catarina. Graduiu-se em Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) em 2000. Possui pós-graduação MBA em Gerenciamento de Projetos em 2006. Desde 2005 trabalha na Eletrosul, subsidiária da Eletrobrás, na Engenharia de Manutenção de Sistemas de Geração e Transmissão, atuando como gerente das áreas de equipamentos de pátio de subestações, laboratórios, oficina de recuperação de equipamentos e geração hidrelétrica, eólica e fotovoltaica.



Marcio Ribeiro Faverão graduou-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de São Paulo (UNESP) em 1997 e obteve o MBA em gestão de negócios do setor elétrico pela Fundação Getúlio Vargas (FGV) em 2018. Desde 2006 trabalha na Eletrosul, subsidiária da Eletrobrás, onde atua na coordenação técnica da Engenharia de Manutenção.