



# Métodos Metaheurísticos para *Unit Commitment* de Turbinas Hidráulicas

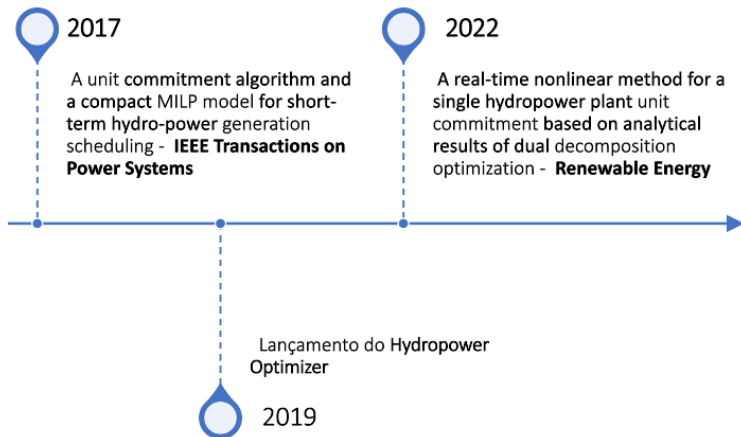
**Jerson dos Santos Carvalho**

**09 de Junho de 2022**

- 1 Introdução
- 2 Metodologia
- 3 Soluções Analíticas do *Unit Commitment*
- 4 Adaptação ao modelo DESSEM
- 5 Resultados Computacionais - Testes Práticos
- 6 Conclusões

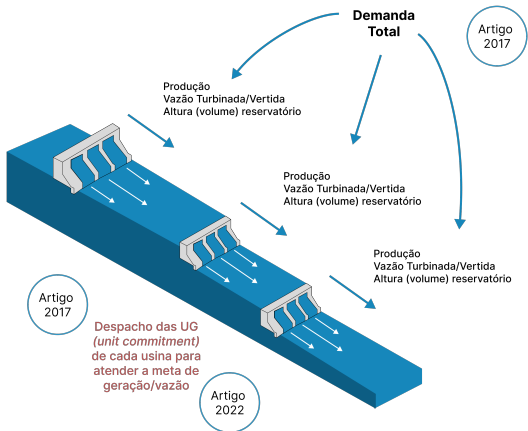
- Demonstrar a aplicabilidade da metodologia proposta;
- Mostrar a eficiência das técnicas apresentadas;
- Discutir formas de incorporá-las ao DESSEM.

# Histórico de trabalhos



- Objetivos
  - Atender a **demanda**;
  - **Utilizar a água** da melhor forma possível.

## Coordenação da geração e das vazões turbinadas das usinas com objetivo de atender a demanda total e maximizar os reservatórios



$$\max \sum_{i \in \Phi} w_i v_{i,T} \quad (1)$$

$$\sum_{i \in \Lambda_c} p_{i,t} = D_{c,t}, \quad \forall c, t, \quad (2)$$

$$\text{Balanco hídrico} \quad (3)$$

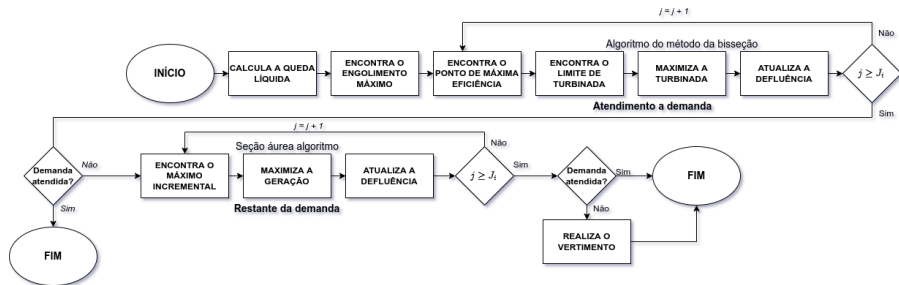
$$\text{Função de geração linear por partes} \quad (4)$$

$$\underline{q}_i \leq q_{i,t} \leq \bar{q}_i, \quad \forall i, t \quad (5)$$

$$\underline{v}_i \leq v_{i,t} \leq \bar{v}_i, \quad \forall i \in \Phi, t \quad (6)$$

$$p_{i,t} \geq 0, \quad \forall i, t. \quad (7)$$

# Fluxograma do Despacho de Unidades Geradoras (Guedes et al. 2017)





# Exemplo numérico

## Unidades iguais - 2017



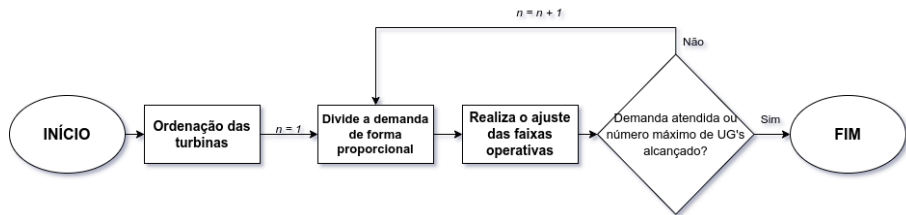
Figura: Unidades geradoras iguais com meta de turbinada de  $30\text{m}^3/\text{s}$ .

## Unidades diferentes - 2017



Figura: Unidades geradoras diferentes com meta de turbinada de  $30\text{m}^3/\text{s}$ .

# Fluxograma do Despacho de Unidades Geradoras (Vieira et al. 2022)



- 1 Unidades geradoras que podem operar no momento atual;
- 2 Unidades geradoras que estavam ativas no tempo anterior;
- 3 A potência no ponto de máxima eficiência (*hill curve*);
- 4 Unidades geradoras com prazo maior para manutenção programada.

- *Unit Commitment* baseado na geração máxima

$$\min_u f = - \sum_{j \in \mathbb{J}_t} \eta_{j,i}(\delta_{i,t}, u_{j,i,t}) u_{j,i,t} \quad (8)$$

$$s.a. \quad \sum_{j \in \mathbb{J}_t} u_{j,i,t} - \check{u}_{i,t} \leq 0 \quad (9)$$

$$\underline{u}_{j,i} \leq u_{j,i,t} \leq \bar{u}_{j,i}, \forall j \in \mathbb{J}_t, \quad (10)$$

onde:

- $\mathbb{J}_t$  conjunto de unidade disponíveis no tempo  $t$ ;
- $\check{u}_{i,t}$  demanda de vazão turbinada da usina  $i$  no tempo  $t$ .

- A função objetivo é composta pela soma da potência de cada unidade, e o problema é acoplado a uma restrição, a vazão turbinada total da usina.

- *Unit Commitment* com Decomposição Dual

O dual da função Lagrangiana pode ser escrito como:

$$\begin{aligned} \varphi(\mathbf{u}, \nu) = \min_{\mathbf{u}} \max_{\nu \geq 0} & - \sum_{j \in \mathbb{J}_t} \eta_{j,i} (\delta_{i,t}, u_{j,i,t}) u_{j,i,t} + \nu (\check{u}_{i,t} - \sum_{j \in \mathbb{J}_t} (u_{j,i,t})) \\ \text{s.a.} & \underline{u}_{j,i} \leq u_{j,i,t} \leq \bar{u}_{j,i}, \forall j \in \mathbb{J}_t, \end{aligned} \quad (12)$$

onde:

$\nu \in \mathbb{R}$  é o multiplicador de Lagrange.

- Reordenando os termos, um problema secundário pode ser definido para cada  $j \in \mathbb{J}_t$ :

$$\varphi_j(\underline{u}_j, \nu) = \min_{u_j} -\eta_{j,i}(\delta_{i,t}, u_{j,i,t})u_{j,i,t} - \nu u_{j,i,t} \quad (13)$$

$$s.a. \quad \underline{u}_{j,i} \leq u_{j,i,t} \leq \bar{u}_{j,i}. \quad (14)$$

- O problema primário dual é dado por:

$$\max_{\nu \geq 0} \sum_{j \in \mathbb{J}_t} \varphi_j(\nu), \quad (15)$$

e resolvido em uma única variável  $\nu$ .



## Teorema

A vazão ótima turbinada é proporcional ao coeficiente de rendimento da unidade geradora.



# Demonstração

Dada função de geração:  $-\eta_{j,i}(\delta_{i,t}, u_{j,i,t})u_{j,i,t} - \nu u_{j,i,t}$ , tem-se:

$$\frac{\partial \varphi_j}{\partial u_{j,i,t}} = -\frac{\partial \eta_j}{\partial u_{j,i,t}} u_{j,i,t} - \eta_{j,i}(\delta_{i,t}, u_{j,i,t}) - \nu. \quad (16)$$

$$\frac{\partial \varphi_j}{\partial u_{j,i,t}} = 0 \implies -\nu = \frac{\partial \eta_j}{\partial u_{j,i,t}} u_{j,i,t} + \eta_j(\delta_{i,t}, u_{j,i,t}), \quad (17)$$

$$\frac{\partial \eta_j}{\partial u_{j,i,t}} u_{j,i,t} + \eta_j(\delta_{i,t}, u_{j,i,t}) = \frac{\partial \eta_{j'}}{\partial u_{j',i,t}} u_{j',i,t} + \eta_{j'}(\delta_{i,t}, u_{j',i,t}) \quad (18)$$

$$\frac{\partial \eta_j}{\partial u_{j,i,t}} u_{j,i,t} + \eta_j(\delta_{i,t}, u_{j,i,t}) = \frac{\partial \eta_j}{\partial u_{j,i,t}} k_j u_{j,i,t} + \eta_j(\delta_{i,t}, k_j u_{j,i,t}), \quad (19)$$

o que implica em  $u_{j',i,t} = k_j u_{j,i,t}$ .

# Exemplo numérico

## Unidades iguais - 2022



Figura: Unidades geradoras iguais com meta de turbinada de  $30\text{m}^3/\text{s}$ .

## Unidades diferentes - 2022

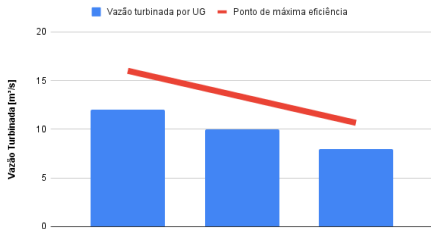
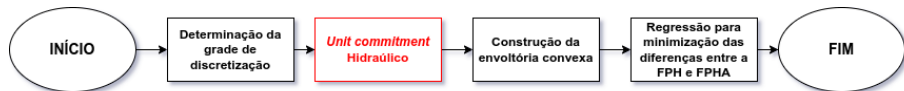


Figura: Unidades geradoras diferentes com meta de turbinada de  $30\text{m}^3/\text{s}$ .

# Adaptação ao modelo DESSEM



- Detalhamento da usina considerando curva colina e zonas proibidas;
- Problema solucionado levando em conta diversas restrições com possibilidade de cadastro de novas e edições;
- Pouco esforço de adaptação ao modelo DESSEM.

# Fluxo da programação



# Resultados Computacionais - Testes Práticos

- Dados de usinas reais
  - Teste 1 - Usina com 6 UGs iguais (Três Marias);
  - Teste 2 - Usina com 4 UGs (2+2) (Salto Grande).



# Teste 1 - Três Marias

- Simulação com condições iguais de afluência e nível inicial, com 4 casos de demanda diferentes.

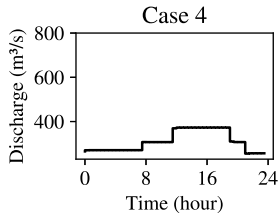
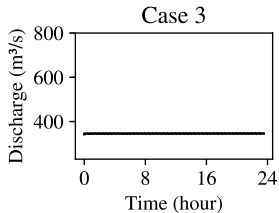
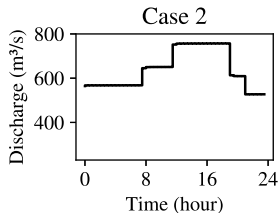
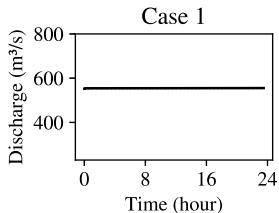
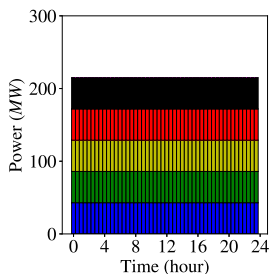


Tabela: Energia total produzida (GWh) em Três Marias.

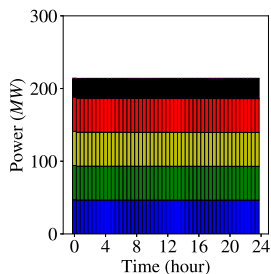
	Heurística 2022	Heurística 2017	Ganho em R\$ (PLD=R\$310,00)
Caso 1	5.160	5.134	8.060,00
Caso 2	5.913	5.899	4.340,00
Caso 3	3.240	3.237	930,00
Caso 4	2.897	2.890	2.170,00



# Teste 1 - Caso 1

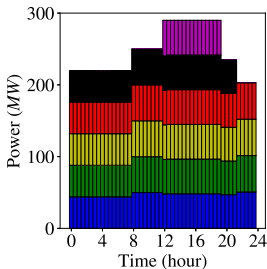


(a) Heurística 2022.

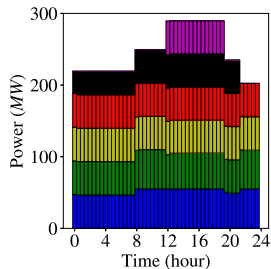


(b) Heurística 2017.

# Teste 1 - Caso 2

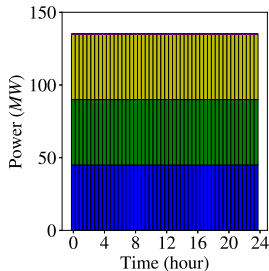


(a) Heurística 2022.

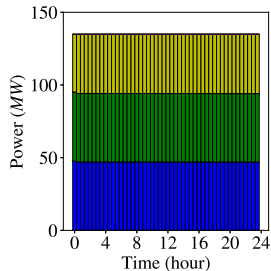


(b) Heurística 2017.

# Teste 1 - Caso 3

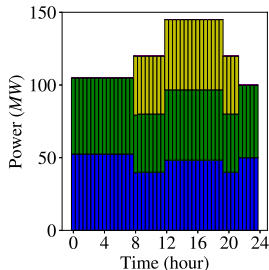


(a) Heurística 2022.

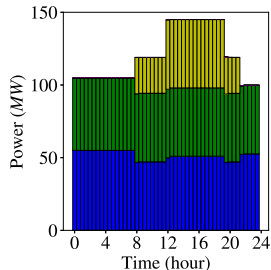


(b) Heurística 2017.

# Teste 1 - Caso 4



(a) Heurística 2022.



(b) Heurística 2017.

## Teste 2 - Salto Grande

- Simulação com condições iguais de afluência e nível inicial, com 4 casos de demanda diferentes.

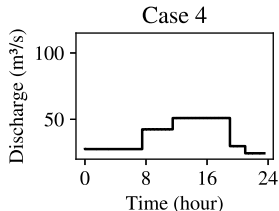
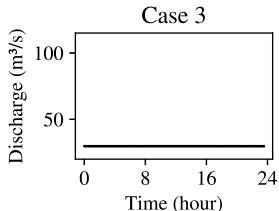
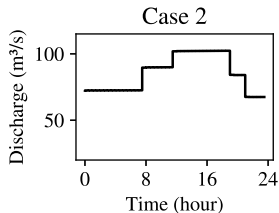
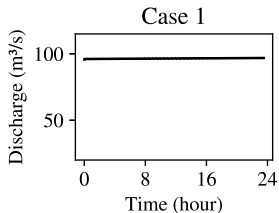
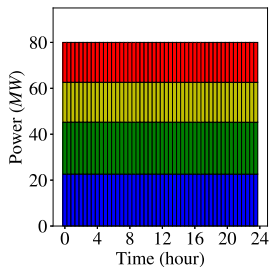


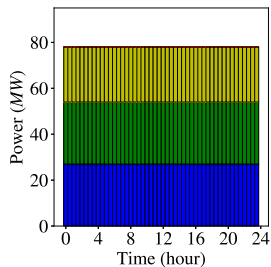
Tabela: Energia total produzida (GWh) em Salto Grande.

	Heurística 2022	Heurística 2017	Ganho em R\$ (PLD=R\$310,00)
Caso 1	1.920	1.813	33.170,00
Caso 2	1.695	1.591	32.240,00
Caso 3	0.600	0.600	-
Caso 4	0.735	0.723	3.720,00

# Teste 2 - Caso 1

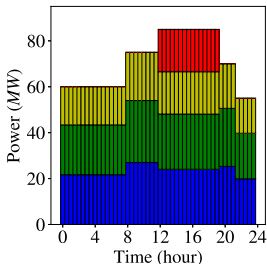


(a) Heurística 2022.

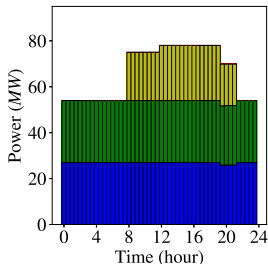


(b) Heurística 2017.

# Teste 2 - Caso 2



(a) Heurística 2022.



(b) Heurística 2017.



Tabela: Heurística 2022 x Heurística 2017

Demanda de vazão ( $m^3/s$ )	Heurística 2022 (s)	Heurística 2017 (s)
550	0.004	5.579
560	0.004	5.366
570	0.004	7.159
580	0.004	5.540
590	0.004	6.560

- As Heurísticas alcançam uma resposta satisfatória em um tempo computacional baixo;
- Modelagem completa (utilizando curva colina) mostra vantagens;
- Ganho econômico para os agentes;
- Baixa complexidade no acoplamento no modelo atual do DESSEM.



# Obrigado pela atenção!

[jerson.carvalho@optimalenergy.com.br](mailto:jerson.carvalho@optimalenergy.com.br)