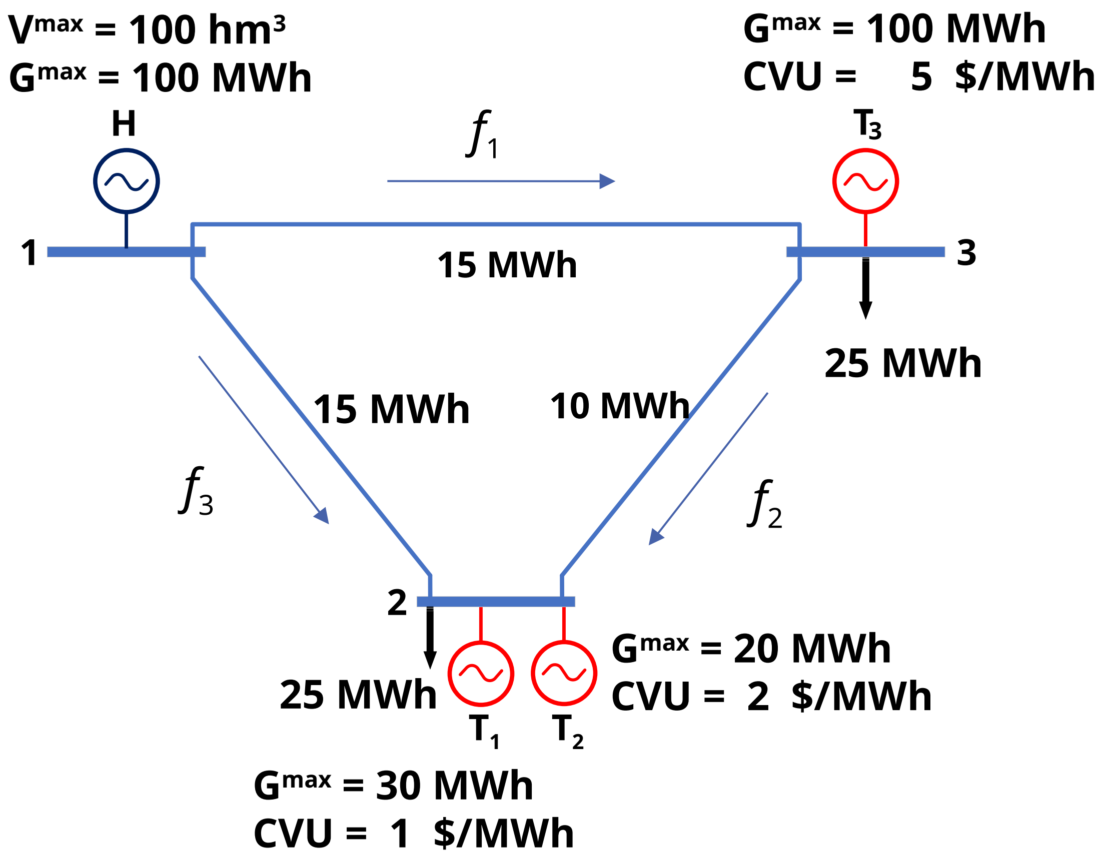
LabPlan
EEL / UFSC

UFSC
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

TUTORIAL: TRABALHO COMPUTACIONAL – OPERAÇÃO E FORMAÇÃO DE PREÇOS

Apresentação do Sistema



Função de Produção

Hidrelétrica

$gh = 0.90q + 0.1v$

q: volume turbinado (hm^3)

v: volume final (hm^3)

Função de Custo Futuro

$\alpha \geq 287{,}5 - 6v$, $\alpha \geq 237{,}5 - 4v$,

$\alpha \geq 112{,}5 - 1{,}5v$, $\alpha \geq 0$

α: custo futuro esperado (R$)

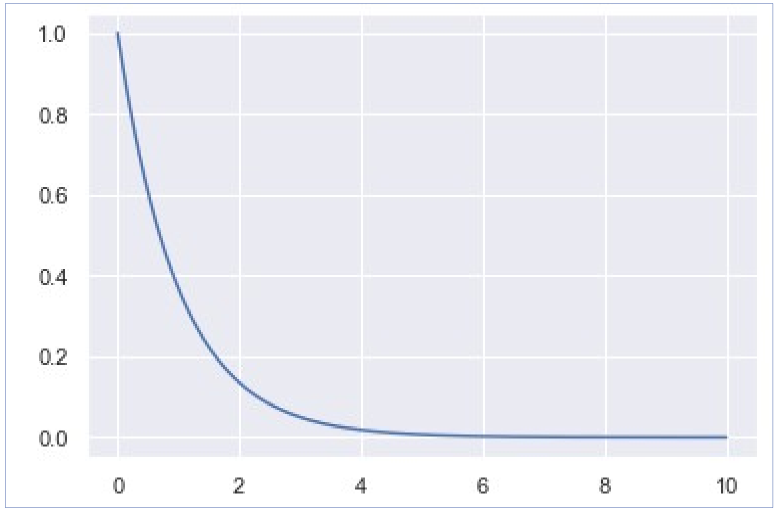
Condições iniciais

volume inicial = 0 (hm^3)

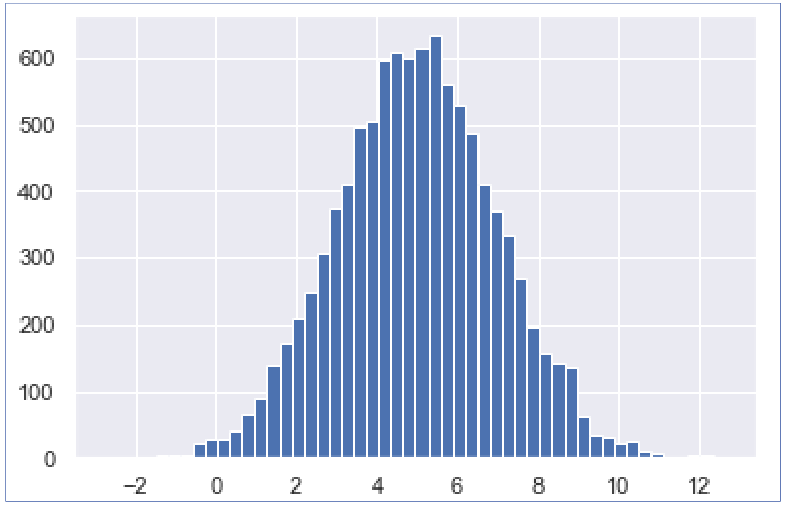
- As demandas em cada barra seguem uma Função de Densidade de Probabilidade (FDP) normal com média de 25 MWh e desvio padrão de 2 MWh
- O volume afluente pode variar entre 0 e 100 hm^3 de acordo com uma FDP

1. **Realize um sorteio para obter 20 “trios” com valores inteiros de volume afluente e demanda das barras**

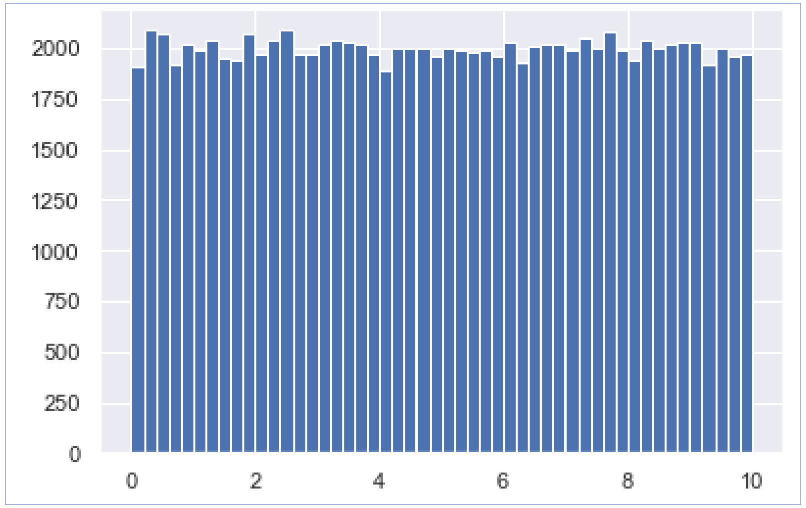
Relembrando alguns exemplos de Função de Densidade de Probabilidade:



Exponencial



Normal/Gaussiana



Uniforme

- As demandas em cada barra seguem uma **Função de Densidade de Probabilidade (FDP) normal com média** de 25 MWh e **desvio padrão** de 2 MWh
- O volume afluente pode variar entre 0 e 100 hm³ de acordo com uma **FDP uniforme**

1. Realize um sorteio para obter 20 “trios” com valores inteiros de volume afluente e demanda das barras

- Tanto o editor de planilhas Excel quanto diferentes linguagens de programação como MATLAB, Python, C#, Java etc... contém alguma função nativa que gera dados seguindo uma dada distribuição probabilística. Mas de forma geral, em qualquer ferramenta, a FDP uniforme e normal pode ser expressa como:

$$\boxed{Y = (\mathbf{b} - \mathbf{a}) \cdot RAND() + \mathbf{a}}$$

FDP uniforme

- Em que [a, b] é o domínio da distribuição. Logo, para o desvio da afluência, temos [0 100] hm^3.
- RAND() é uma função que gera um escalar randômico uniformemente distribuído entre 0 e 1. Ex: RAND() no Excel, rand(x,y) no MATLAB, np.random.uniform() no Python.

1. Realize um sorteio para obter 20 “trios” com valores inteiros de volume afluente e demanda das barras

- Para a demanda, é fornecido a média e desvio padrão. Assim como no caso da distribuição uniforme, existem funções pegam direto esses parâmetros, mas de forma geral é possível calcular da seguinte forma:

$$desv = (\mathbf{b} - \mathbf{a}) \cdot RANDN() + \mathbf{a}$$

FDP Normal

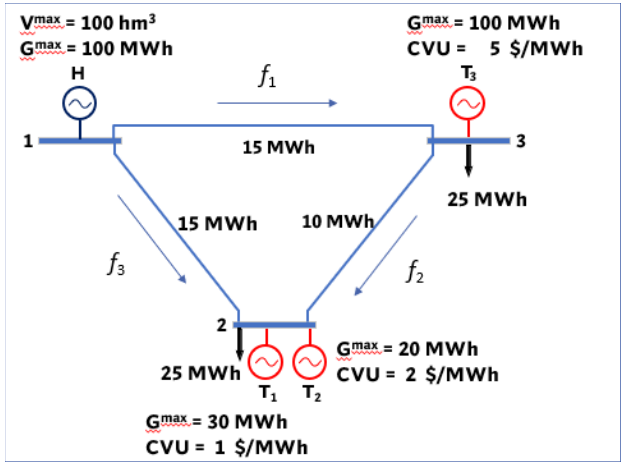
- Para o desvio padrão 2MW, [a, b] = [-2, 2]. Logo, temos temos.

$$desv = (\mathbf{2} + \mathbf{2}) \cdot RANDN() - \mathbf{2}$$

$$Demanda = 25 + desv$$

- RANDN() é uma função que gera um escalar randômico normalmente distribuído entre 0 e 1. Ex: NORMINV(RAND(),0,1)no Excel, randn (x,y) no MATLAB, **np.random.normal(mu, sigma, 20)** no Python. Essa opção utilizando o numpy no python entrega os 20 cenários com média um e desvio sigma

2. Para cada trio sorteado, obtenha o despacho ótimo de cada usina e o custo marginal de operação de cada barra



Modelo de otimização genérico para o problema:

$$\min f = \sum_{j=1}^{3} CVU_i \cdot gt_i + \alpha$$

Função objetivo – minimiza custo presente + futuro

s.a.:

$$\sum_{g \in \Omega_b} gt_g + \sum_{q \in \Omega_b} q_q \pm \sum_{l \in \Omega_b} f_l = \mathbf{L_b}$$

Balanço de potência nas barras

$$v + q + s = y$$

Balanço de volume

$$\alpha + c_1 v \geq c_2$$

Cortes da FCF

$$gt_i \leq G_i^{max}, \; f_l \leq F_l^{max}, v \leq V^{max}, q \leq Q^{max}, s \geq 0$$

Limite das variáveis

- A modelagem completa bem como a resolução de um problema similar podem ser vistos com detalhes no slide "*06 – Operação e Formações de Preço*" no Moodle e na aula "*Tópico II – Aula 2.mp4*" no link: https://drive.google.com/drive/folders/1IweriFj9IKSCwFRiZ6-MuBJXYP_xlad3

2. Para cada trio sorteado, obtenha o despacho ótimo de cada usina e o custo marginal de operação de cada barra

Onde implementar os modelos de otimização? Alguns exemplos:

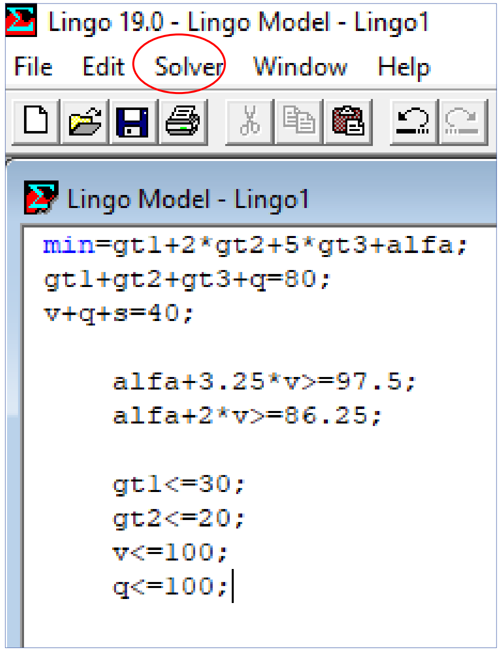
Linguagem/Solver	Aprendizado	Implementação	Vantagens	Desvantagens
Lingo	**Fácil**	Fácil	1. Feito especialmente para resolução de problemas de otimização numérica; 2. Interface fácil de utilizar.	1. Possui grande limitação no número de variáveis; 2. Ok para o Trabalho, mas você provavelmente não utilizará no futuro para problemas reais.
MATLAB/Linprog	Intermediário	Difícil	1. Linguagem mais conhecida entre os estudantes; 2. Necessita apenas de manipulação de matrizes e vetores, pouca codificação.	1. Esparcidade dos vetores e matrizes; 2. Difícil *debug*.
Python/Gurobi	Difícil	**Facílima**	1. Um dos *top solvers* mundiais para problemas de otimização junto com o CPLEX e outros.	1. Para quem não tem conhecimentos prévios em Python, pode ser mais difícil de utilizar no começo
Excel*	Intermediário	Dificílima	1. Melhor visualização dos dados finais	1. Excel não é apropriado para resolução de problemas de otimização (a não ser que algum plugin para otimização seja instalado).Esse ambiente normalmente requer discretização de todo domínio das variáveis para checar o valor da função *obj* e o cumprimento das restrições e ainda assim, a otimalidade não é garantida.

2. Para cada trio sorteado, obtenha o despacho ótimo de cada usina e o custo marginal de operação de cada barra

LINGO:

- O modelo de otimização retratado aqui não igual ao do trabalho! É um sistema simples de barra única, que apenas serve para entender cada uma das ferramentas

$$\min f = gt_1 + 2gt_2 + 5gt_3 + \alpha$$
$$sa: gt_1 + gt_2 + gt_3 + q = 80$$
$$v + q + s = 40$$
$$\alpha + 3.25v \geq 97.5$$
$$\alpha + 2v \geq 86.25$$
$$gt_1 \leq 30$$
$$gt_2 \leq 20$$
$$v \leq 100$$
$$q \leq 100$$



Variable	Value	Reduced Cost
GT1	30.00000	0.000000
GT2	19.00000	0.000000
GT3	0.000000	3.000000
ALFA	68.25000	0.000000
Q	31.00000	0.000000
V	9.000000	0.000000
S	0.000000	2.000000

```
Global optimal solution found.
Objective value:                136.2500
Infeasibilities:                0.000000
```

- Disponível em: https://www.lindo.com/index.php/ls-downloads/try-lingo
- Alternativa:

LINDO SYSTEMS INC.

Para aqueles que dentre as opções, escolheram o LINGO para o trabalho. As versões mais recentes assumem que as variáveis são não negativas (mesmo que você coloque o limite inferior negativo) por padrão. Isso precisa ser alterado porque o fluxo nas linhas pode ser tanto negativo quanto positivo para que o problema entenda que ele possa seguir ambos em sentidos.

Procedimento: Tem que ir em lá em cima na barra de tarefas Solver > Solver/Options > Aba: General Solver > Desmarque a opção "Variables Assumed Non-Negative" para o lingo permitir que variáveis sejam negativas. Ao fazer isso, no entanto, lembre declarar o limite inferior de todas as variáveis mesmo que seja 0 ou ele irá assumir que é -INF.

2. Para cada trio sorteado, obtenha o despacho ótimo de cada usina e o custo marginal de operação de cada barra

MATLAB:

$$\min_x f^T x \text{ such that } \begin{cases} A \cdot x \leq b, \\ Aeq \cdot x = beq, \\ lb \leq x \leq ub. \end{cases}$$

[x, fval] = linprog(f,A,b,Aeq,beq,lb,ub)

$$\min \text{ f } = gt_1 + 2gt_2 + 5gt_3 + \alpha$$
$$sa : gt_1 + gt_2 + gt_3 + q = 80$$
$$v + q + s = 40$$
$$\alpha + 3.25v \geq 97.5$$
$$\alpha + 2v \geq 86.25$$
$$gt_1 \leq 30$$
$$gt_2 \leq 20$$
$$v \leq 100$$
$$q \leq 100$$

```
    % gt1 gt2  gt3   v   q   s alfa
f = [1    2    5     0   0   0 1];
      % gt1 gt2  gt3    v   q    s    alfa
A = [0       0    0   -3.25 0    0    -1;
     0       0    0    -2   0    0    -1];
b = [-97.5;-86.25];
      % gt1 gt2  gt3    v   q    s    alfa
Aeq =[ 1    1    1      0   1    0    0;
       0    0    0      1   1    1    0];
beq = [80;40];

lb = [0 0 0 0 0 0 0];
ub = [30 20 1e9 100 100 1e9 1e9];

[x, fval] = linprog(f,A,b,Aeq,beq,lb,ub);
```

```
x =

   30.0000
   20.0000
         0
   10.0000
   30.0000
         0
   66.2500

>> fval

fval =

  136.2500
```


- Disponível em: https://www.mathworks.com/campaigns/products/trials.html/

2. Para cada trio sorteado, obtenha o despacho ótimo de cada usina e o custo marginal de operação de cada barra

ANACONDA/PYTHON/GUROBI:

$$\min f = gt_1 + 2gt_2 + 5gt_3 + \alpha$$

$$sa: gt_1 + gt_2 + gt_3 + q = 80$$

$$v + q + s = 40$$

$$\alpha + 3.25v \geq 97.5$$

$$\alpha + 2v \geq 86.25$$

$$gt_1 \leq 30$$

$$gt_2 \leq 20$$

$$v \leq 100$$

$$q \leq 100$$

```
from gurobipy import *


m = Model("EF")

#Declarando variáveis
m = Model("EF")
gt1 = m.addVar( lb=0, ub=30, name="ptermica 1")
gt2 = m.addVar( lb=0, ub=20, name="ptermica 2")
gt3 = m.addVar( lb=0, ub=GRB.INFINITY, name="ptermica 3")
alfa =m.addVar(lb=0, ub=GRB.INFINITY, name="alfa")
v = m.addVar(lb=0, ub=100, name="volume final")
s = m.addVar(lb=0, ub=1*10e8, name="vertimento")
q =m.addVar(lb=0, ub=100, name="vazão turbinada")

#Modelo


m.addConstr(gt1 + gt2 + gt3 + q == 80, "balanço de potência" )
m.addConstr( v +  q + s == 40, "balanço de volume ")

m.addConstr( alfa + 3.25*v >= 97.5, "corte 1")
m.addConstr( alfa + 2*v >= 86.25, "corte 2")

m.setObjective(gt1 +2*gt2 + 5*gt3 + alfa, GRB.MINIMIZE)
# m.write("retricoes2.lp")
m.Params.timeLimit = 120
m.params.MIPGap = 0.0000001
m.optimize()

if m.status == GRB.Status.OPTIMAL:
   fobj = m.objVal
   GT1 = m.getAttr("X",  m.getVars())

else:
    print("Inviável!!!")
```

```
Solved in 1 iterations and 0.01 seconds (0.00 work units)
Optimal objective  1.362500000e+02

In [11]: GT1
Out[11]: [30.0, 20.0, 0.0, 66.25, 10.0, 0.0, 30.0]
```

- Veja que os despachos são diferentes dos que foram encontrados pelo LINGO mas o custo total é o mesmo!!!
- Custo Marginal da Água = Custo de gt2 nessas condições. Ambas soluções estão corretas.

- Disponível em: https://www.gurobi.com/documentation/9.5/quickstart_windows/cs_anaconda_and_grb_conda_.html
- Licença acadêmica: https://www.gurobi.com/downloads/end-user-license-agreement-academic/

2. Para cada trio sorteado, obtenha o despacho ótimo de cada usina e o custo marginal de operação de cada barra

EXCEL:

- Discretiza-se as variáveis de decisão gt1, gt2 e gt3;
- Faça gt1 + gt2 + gt3 + q = Demanda Total para calcular o valor de "q". (Obs: esse seria o valor de "q" supondo *f* não ativo nas restrições de balanço - sistema de barra única*)*
- Verifique o volume final "v" que sobra para o estágio posterior por meio da restrição de balanço de volume;
- Verifique por meio dos cortes o valor de alfa e calcule o custo total da *fobj;*
- Agora, tornando "*f*" ativo Calcule os valores de *f* por meio das equações de balanço de potência;
- Aquele que refletir o menor custo e atender os limites de *f* **poderá*** ser a solução ótima.

2. Para cada trio sorteado, obtenha o despacho ótimo de cada usina e o custo marginal de operação de cada barra

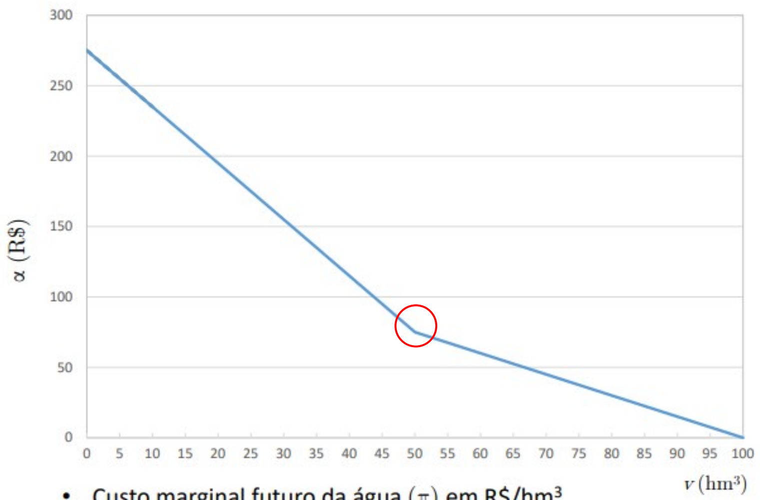
- ❑ Ao resolver o modelo apresentado no slide 6, a solução retorna o despacho ótimo, custo total etc... para **o cenário.**
- ❑ Como determinar o custo marginal de operação de cada barra? Duas formas: analiticamente ou utilizando seu modelo.

Não recomenda-se a forma analítica. Lembre que:

- ❑ Utilize o seu modelo! Simplesmente aumente em 1MW a potência em uma barra por vez. Depois faça:

$$\boxed{\mathrm{CMO_b} = \mathit{CustoNovo}_b - \mathit{CustoAnterior};\ \forall b = 1, 2, 3}$$

- ❑ Em que CMO_b é o custo marginal de operação na barra b, e $CustoNovo_b$ é o novo valor da função objetivo ao se aumentar em 1 MW a demanda na

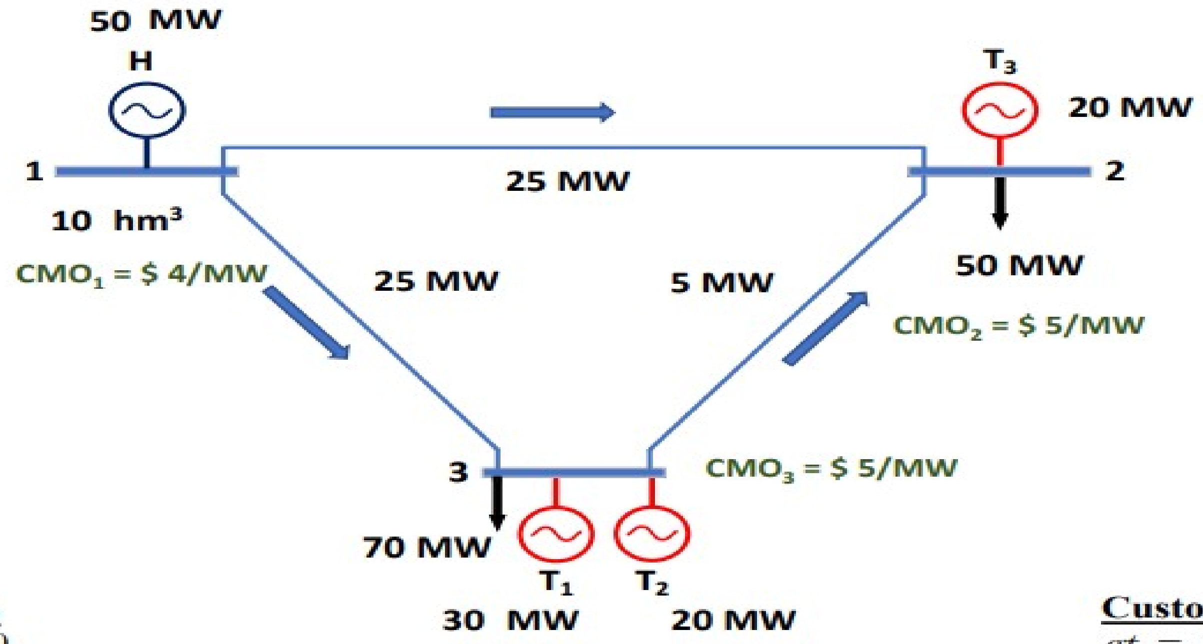


- Custo marginal futuro da água (π) em R$/hm³
  - $v < 50,\ \pi = -4{,}0$
  - $v > 50,\ \pi = -1{,}5$
  - $v = 50,\ -4{,}0 \le \pi \le -1{,}5$

3. Considerando a inexistência de contratação, apresenta para contabilização no mercado de curto prazo

- Revendo o exemplo da aula:

Solução do Problema



Solução

$gt_1 = 30$
$gt_2 = 20$
$gt_3 = 20$
$gh = 50$
$v = 30$
$\alpha = 155$
$f = 325$

Custo de Operação

$gt_1 = 30$
$gt_2 = 40$
$gt_3 = 100$
$gh = 155$
Total \$ = 325
Custo Médio = 2,71

3. Considerando a inexistência de contratação, apresente para cada trio os valores de EM e EMT, bem como a contabilização no mercado de curto prazo

- Revendo o exemplo da aula:

Preço e Excedente de Mercado

Preço?
Preço = CMO

Barra 1 = 4
Barra 2 = 5
Barra 3 = 5

Receita dos Geradores

$gt_1 = 30 \cdot 5 = 150$

$gt_2 = 20 \cdot 5 = 100$

$gt_3 = 20 \cdot 5 = 100$

$gh = 50 \cdot 4 = 200$

Total = \$550

Custo para o Mercado
$120 \cdot 5 = \$600$

Excedente de Mercado (EM)

EM = 600 – 325 = 275

Excedente de Mercado devido à Transmissão (EMT)

EMT = 600 – 550 = 50 (está embutido no EM)

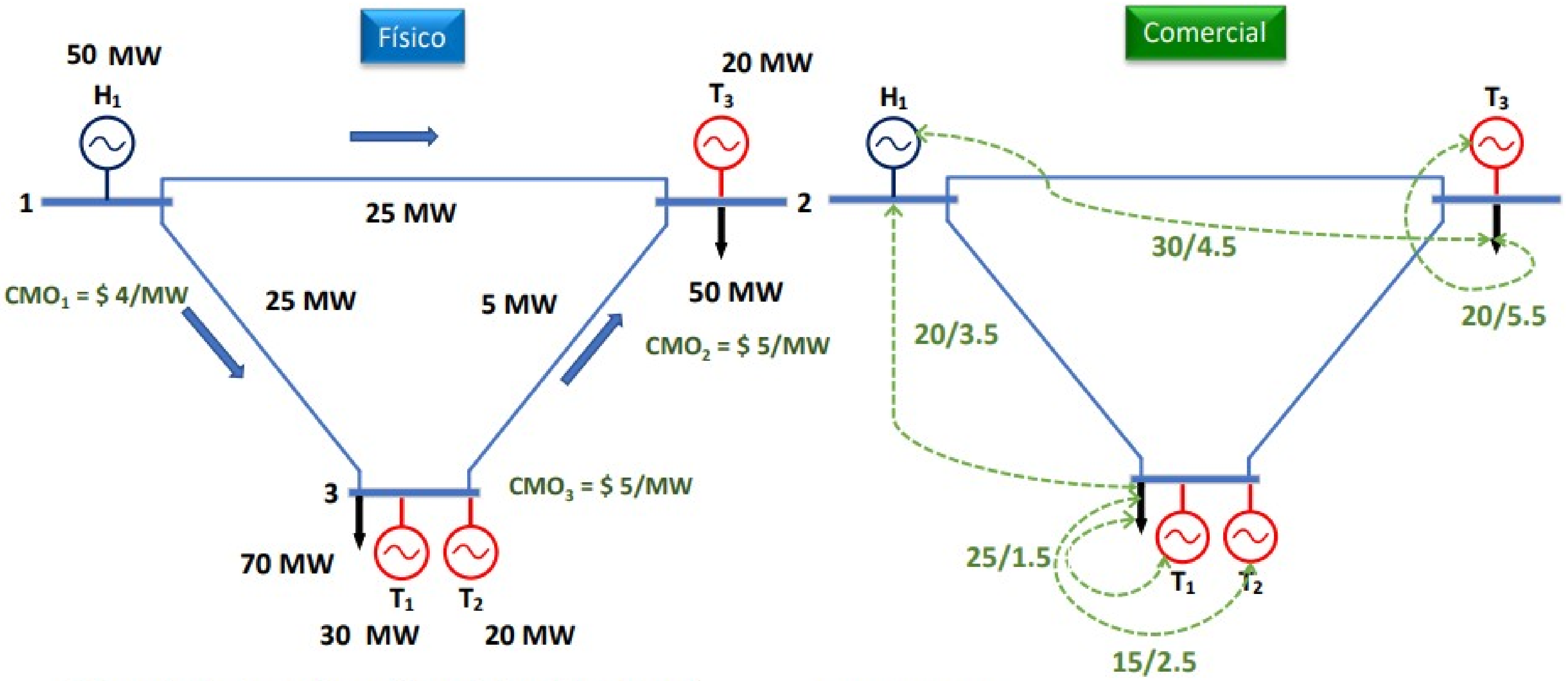
- Diferença entre a receita dos geradores e o custo de operação = 550 – 325 = 225 é apropriada pelos geradores eficientes e contribui para a recuperação do custo
  - ✓ Custo Total = CF + CVU·G

3 e 4. Contabilização no mercado de curto prazo com e sem contrato:

- Revendo o exemplo da aula:

Demanda	gt_1	gt_2	gt_3	gh
Barra 3	25/1.5	15/2.5	-	20/3.0
Barra 2	-	-	30/5.5	20/4.0

Restrições de Transmissão Ativas



Mercado de Curto Prazo (Exposição - Geradores)

- $T_1 \rightarrow (30-25) \cdot 5 = \$\ 25$
- $T_2 \rightarrow (20-15) \cdot 5 = \$\ 25$
- $T_3 \rightarrow (20-20) \cdot 5 = \$\ 0$
- $H \rightarrow (50-0) \cdot 4 + (0-20) \cdot 5 + (0-30) \cdot 5 = \$\ -50$

Consumidores

- $D_2 \rightarrow (50-50) \cdot 5 = \$\ 0$
- $D_3 \rightarrow (60-70) \cdot 5 = \$\ -50$

EMT = \$ 50!

51

5 e 6. Faça uma analise crítica dos resultados e Elabore um relatório técnico com as informações pedidas acima (e mais aquelas pertinentes para a compreensão do trabalho) – Enviar por e-mail até 25/11

Enviar dúvidas para: davidlucasbr@gmail.com

Versão final do trabalho para: davidlucasbr@gmail.com e erlon.finardi@ufsc.br