



Universidade Federal do Ceará
Marco Aurélio Holanda de Castro, PhD

PERDAS EM SISTEMAS DE
ABASTECIMENTO DE ÁGUA:

MASSA E ENERGIA

ETAPA 1:
MODELAGEM COMPUTACIONAL DE
SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE
ÁGUA: UMA INTERFACE ENTRE O
AUTOCAD E O EPANET

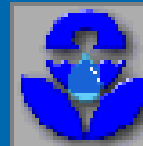


Uso direto do EPANET

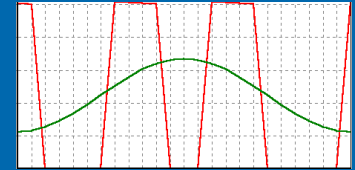
➤ EPANET



Entrada de dados
(INPUTS)



Saída de dados
(OUTPUTS)



Node ID	Demand LPS	Head m	Pressure m
Junc 1	0.00	528.63	15.63
Junc 2	0.00	528.57	17.73
Junc 3	0.00	528.57	19.23
Junc 4	0.00	529.70	27.89
Junc 5	0.00	529.70	27.38
Junc 6	0.00	529.70	27.40
Junc 7	0.00	529.70	27.49
Junc 8	0.00	529.70	27.52
Junc 9	0.00	529.70	27.32
Junc 10	0.00	529.70	27.82

PROBLEMAS:

1. QUANTIDADE DE DADOS DE ENTRADA INPRATICÁVEL PARA REDES REAIS (DEMORA E ERROS)
2. DADOS DE SÁIDA DA REDE NÃO DISPONÍVEIS NO AUTOCAD (INDISPONÍVEIS PARA IMPRESSÃO)

➤ Baseado no AutoCAD

- ➔ Bastante conhecido e utilizado na Engenharia;
- ➔ Grande flexibilidade ao se trabalhar com objetos gráficos;
- ➔ Suporte a linguagens de programação (AutoLISP e VBA)



Entrada de dados
(INPUTS)



SAÍDA de dados
(OUTPUTS)



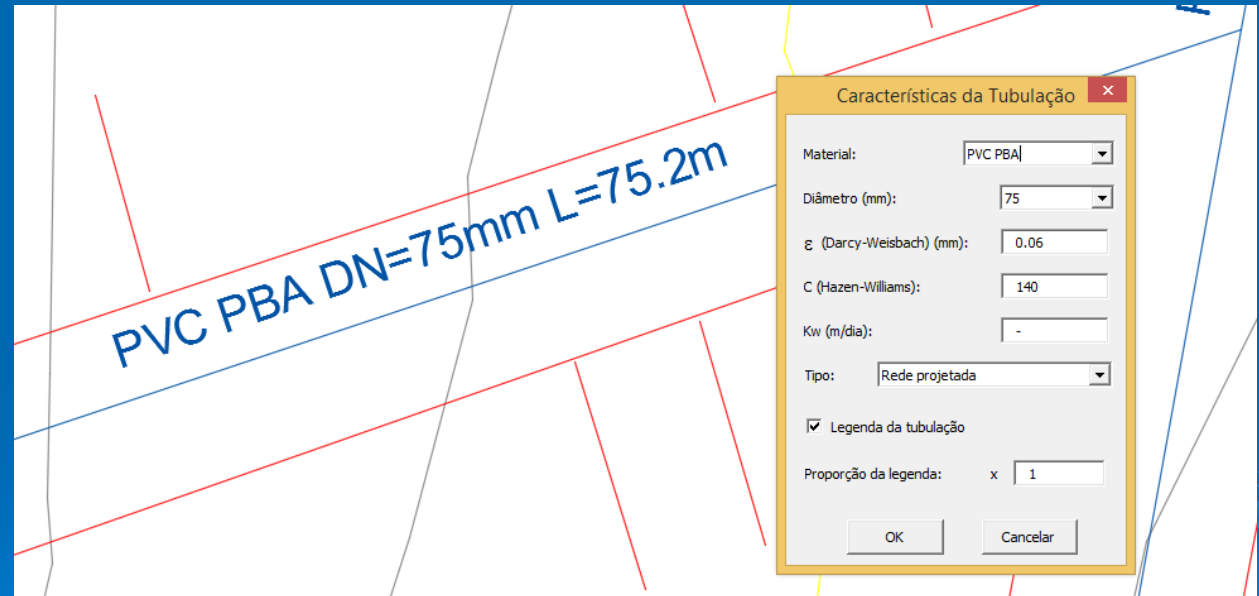
- ✓ Facilidade na inserção de dados da Rede;
- ✓ Interface amigável no próprio AutoCAD;
- ✓ Captura de dados da rede:
 - cotas;
 - Diâmetros internos, rugosidades e comprimento dos tubos;
 - Demandas (consumos nodais);
 - Tanques, reservatórios, etc.;
- ✓ Geração de um arquivo de entrada do EPANET de forma automatizada.
- ✓ Exportação da rede dimensionada no EPANET para o AutoCAD.

- Os demais elementos gráficos (Reservatórios circular e retangular, Booster, Poço Profundo, Estação de Bombeamento, Manancial, Registro, Válvula controladora de pressão, Conexão, Demanda especial e Aspersor) são blocos do AutoCAD, com atributos gravados a partir de valores digitados em uma caixa de diálogo específica.



Tubulação no AutoCAD

- Para representar um tubo da rede, o programa gera uma polyline em uma layer específica, esta layer possui os dados de diâmetro, material e rugosidade da tubulação;



As adutoras são criadas de forma semelhante, diferindo da rede nas cores e em sua numeração específica.

Exemplo de Reservatório Circular



The screenshot displays the AutoCAD 2002 interface with the 'Dados do Reservatório Circular de nível variável' dialog box open. The dialog box contains the following fields and values:

Field	Value
Diferença entre o N.A. mínimo e a cota do terreno (m):	12.00
Diferença entre o N.A. máximo e a cota do terreno (m):	15.00
Diferença entre o nível de entrada e a cota do terreno (m):	18.00
Diâmetro do tanque (m):	5.00
Nome do tanque:	teste01

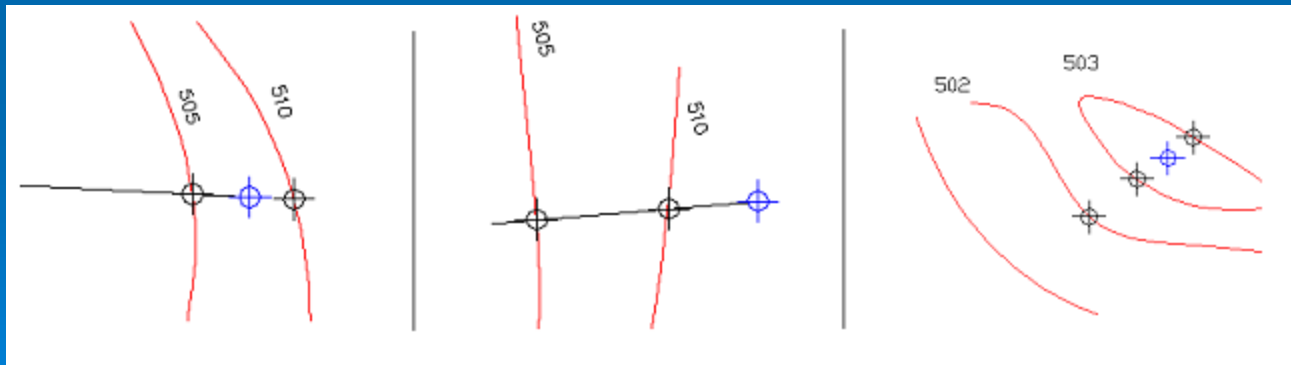
Below the dialog box, a 3D model of a cylindrical reservoir is shown with the following properties:

- Nome: teste01
- N.A. mín. (m): 12.00
- N.A. máx. (m): 15.00
- N.A. entrada (m): 18.00
- Diâmetro (m): 5.00

The software interface includes a menu bar (File, Edit, View, Insert, Format, Tools, Draw, Dimension, Modify, Image, Window, Help), a toolbar with various drawing and editing tools, and a command line at the bottom showing 'Command:'. The status bar at the bottom indicates the current layer is 'Model' and shows various system variables like SNAP, GRID, ORTHO, POLAR, OSNAP, OTRACK, LWT, and MODEL.

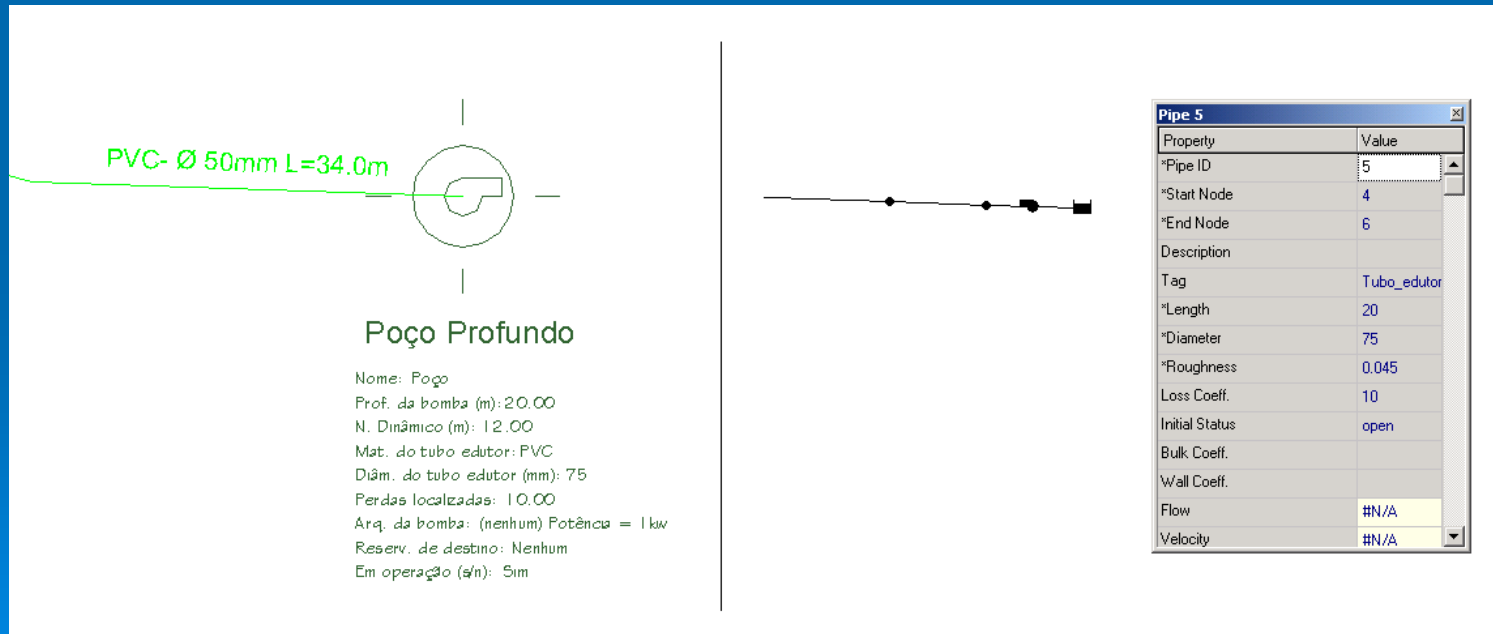
Cálculo das Cotas

- Para determinação das cotas topográficas do terreno, utilizamos curvas de nível. Os pontos são então interpolados automaticamente, encontrando assim os valores de cota.



➤ As bombas aparecem na modelagem de Poços Profundos, Estações de Bombeamento e Boosters.

➤ Exemplo:



The diagram shows a cross-section of a well labeled "Poço Profundo" with a PVC pipe of 50mm diameter and 34.0m length. A detailed list of well parameters is provided below the diagram. To the right, a schematic shows the pipe layout with nodes and a pump symbol. A table titled "Pipe 5" lists the specific properties of the pipe, such as its ID, length, diameter, and status.

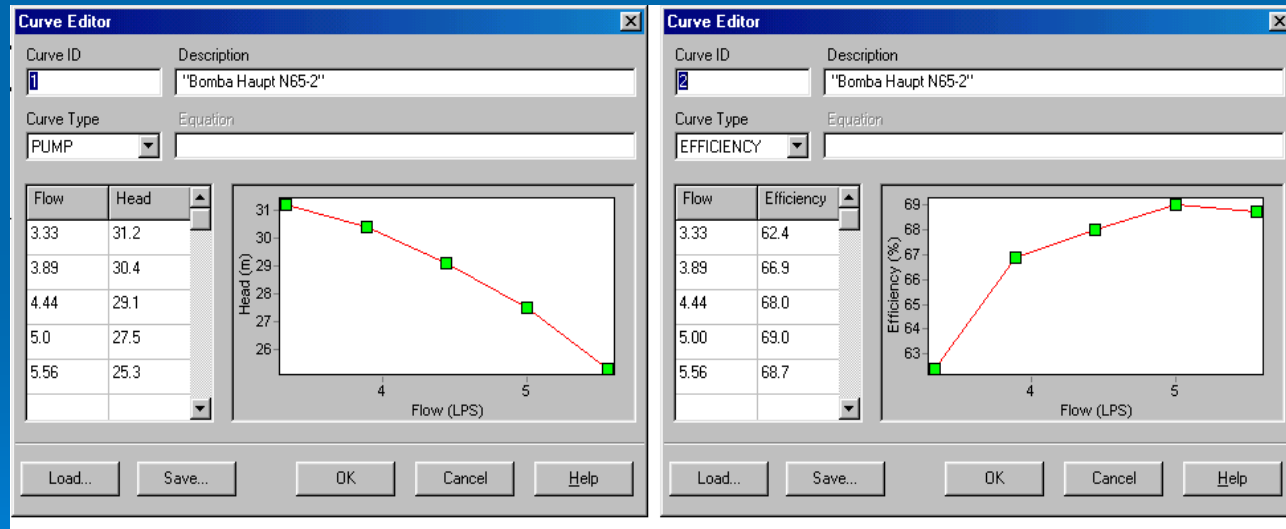
PVC- Ø 50mm L=34.0m

Poço Profundo

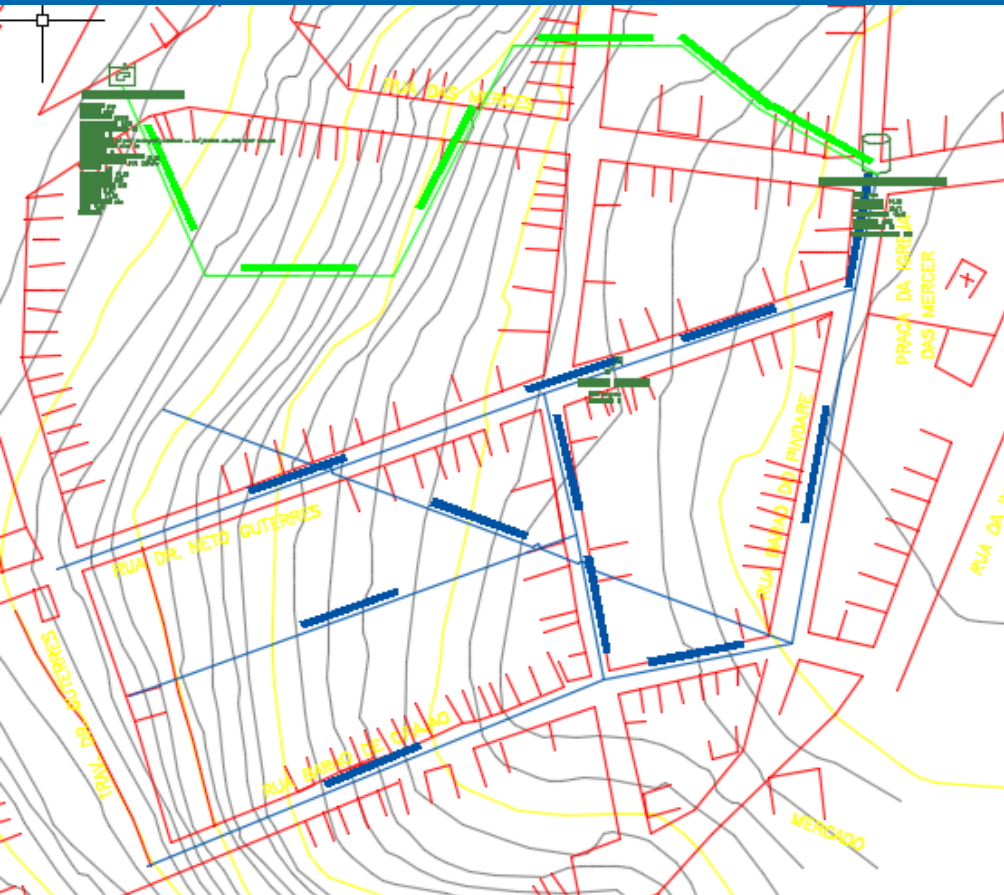
Nome: Poço
Prof. da bomba (m): 20.00
N. Dinâmico (m): 12.00
Mat. do tubo edutor: PVC
Diâm. do tubo edutor (mm): 75
Perdas localizadas: 10.00
Arq. da bomba: (nenhum) Potência = 1 kw
Reserv. de destino: Nenhum
Em operação (s/n): Sim

Property	Value
*Pipe ID	5
*Start Node	4
*End Node	6
Description	
Tag	Tubo_edutor
*Length	20
*Diameter	75
*Roughness	0.045
Loss Coeff.	10
Initial Status	open
Bulk Coeff.	
Wall Coeff.	
Flow	#N/A
Velocity	#N/A

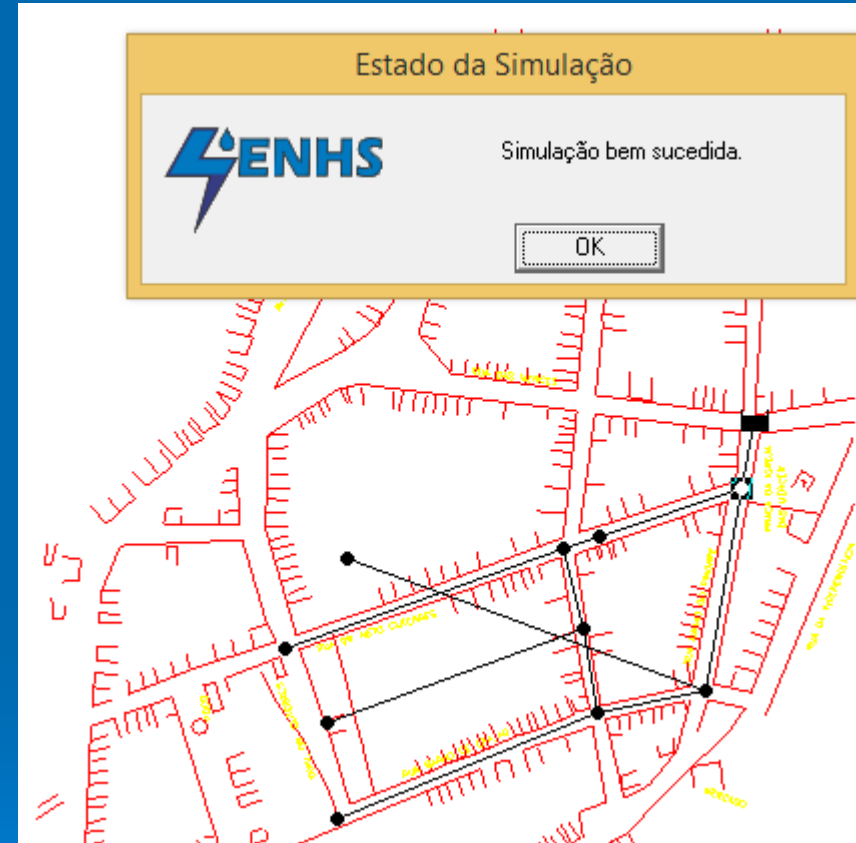
- O principal parâmetro para as bombas é sua curva característica, que é a relação entre a carga e a vazão que essa bomba pode ofertar em seu estado nominal de velocidade.



AutoCAD



EPANET





UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ

ETAPA 2: Calibração de rugosidade
em redes de abastecimento a partir
do Método Iterativo de Gradiente
Hidráulico MIGH

MIGH na calibração de coeficientes de rugosidade

O MIGH corrige o coeficiente de rugosidade a cada iteração pela expressão:

$$C_j^{j+1} = C_j \frac{|\nabla h_j^{calc}|}{|\nabla h_j^{obs}|}$$

Critério de convergência:

$$\cos \varphi_j = \frac{\nabla h_j^{obs} \cdot \nabla h_j^{calc}}{|\nabla h_j^{obs}| |\nabla h_j^{calc}|}$$

MIGH na calibração de coeficientes de rugosidade

Os ângulos maiores que este valor não são considerados até que as rugosidades dos trechos vizinhos induzam a diminuição deste ângulo nas próximas iterações.

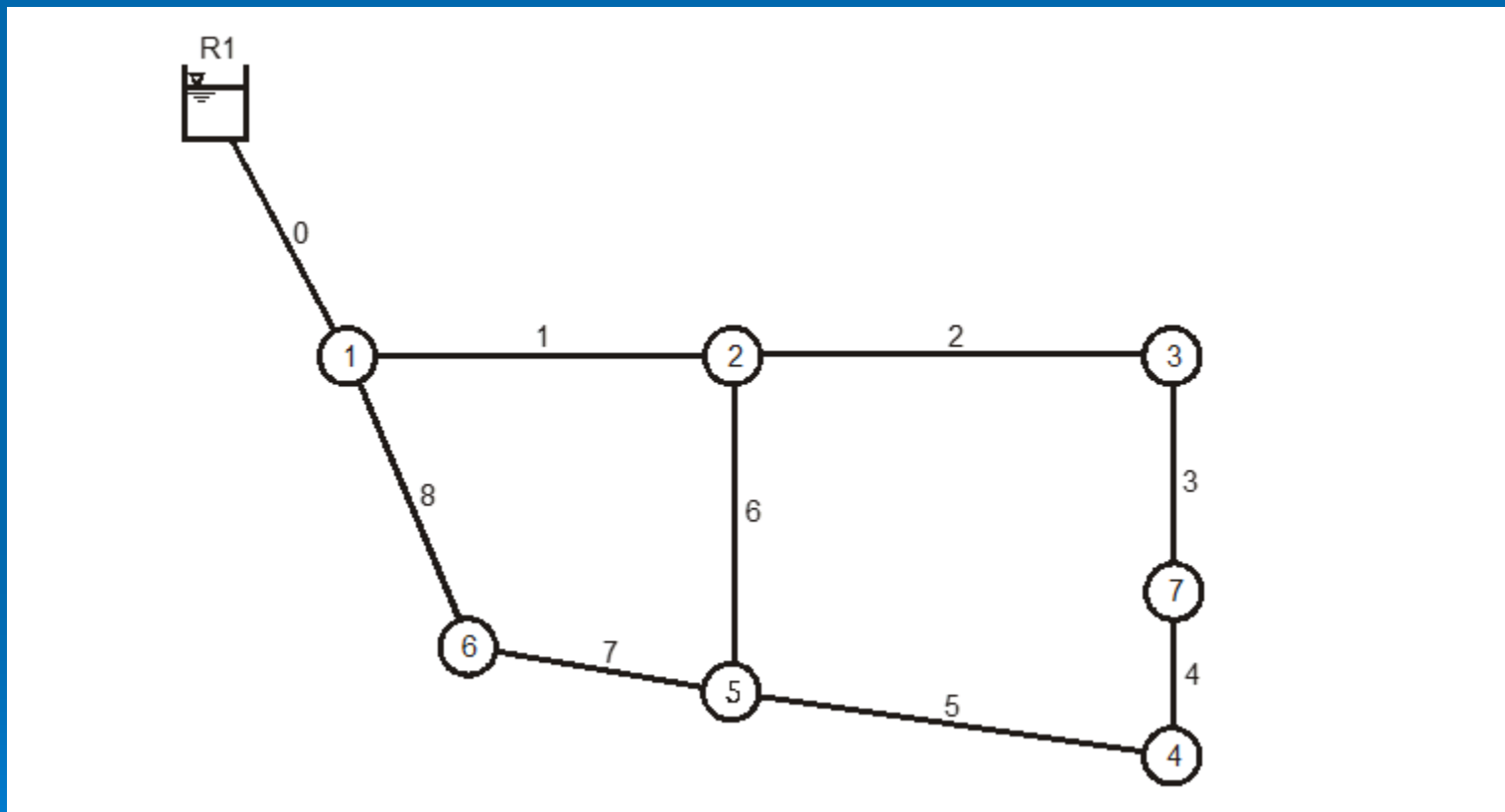
$$\text{Então } \begin{cases} \text{Se } \varphi < 60^\circ & C_j^{i+1} = C_j \frac{|\nabla h_j^{i \text{ calc}}|}{|\nabla h_j^{i \text{ obs}}|} \\ \text{Se } \varphi \geq 60^\circ & C_j^{i+1} = C_j \end{cases}$$

Função objetivo:
$$\text{F.O} = \sum (\nabla h_j^{i \text{ calc}} - \nabla h_j^{i \text{ obs}})^2$$

No caso de estarem disponíveis também dados de vazões, podemos usá-los para calcular os coeficientes da perda de Carga através de:

$$C = \left[\frac{10,65 \left(\frac{Q}{1000} \right)^{1,85} D^{-4,87}}{J} \right]^{1/1,85}$$

Rede Exemplo



Tubo	Nó inicial	Nó final	Diâmetro (mm)	Comprimento (m)	Rugosidade $c(m^{0,3676}/s)$
0	R1	1	250	520	110
1	1	2	150	1850	122
2	2	3	125	790	105
3	3	7	100	700	133
4	7	4	100	600	130
5	4	5	100	980	129
6	5	2	100	850	121
7	5	6	200	650	83
8	6	1	200	850	107

Foram considerados dois cenários de demandas não proporcionais indicados na tabela a seguir.

Nó	Demanda (L/s)	
	Cenário 1	Cenário 2
1	0,00	0,00
2	15,00	36,00
3	62,50	120,00
4	15,00	10,00
5	47,50	80,00
6	30,00	80,00
7	37,50	37,50

Nó	Pressões reais (m)	
	Cenário 1	Cenário 2
1	58,74	56,44
2	55,75	48,37
3	56,08	48,72
4	53,77	47,03
5	53,35	41,80
6	54,27	44,12
7	53,03	42,88

Critérios de aceitação de calibração do WATER RESEARCH CENTRE (1989)

**$\pm 0,50$ m para 85% das
medidas de pressão**

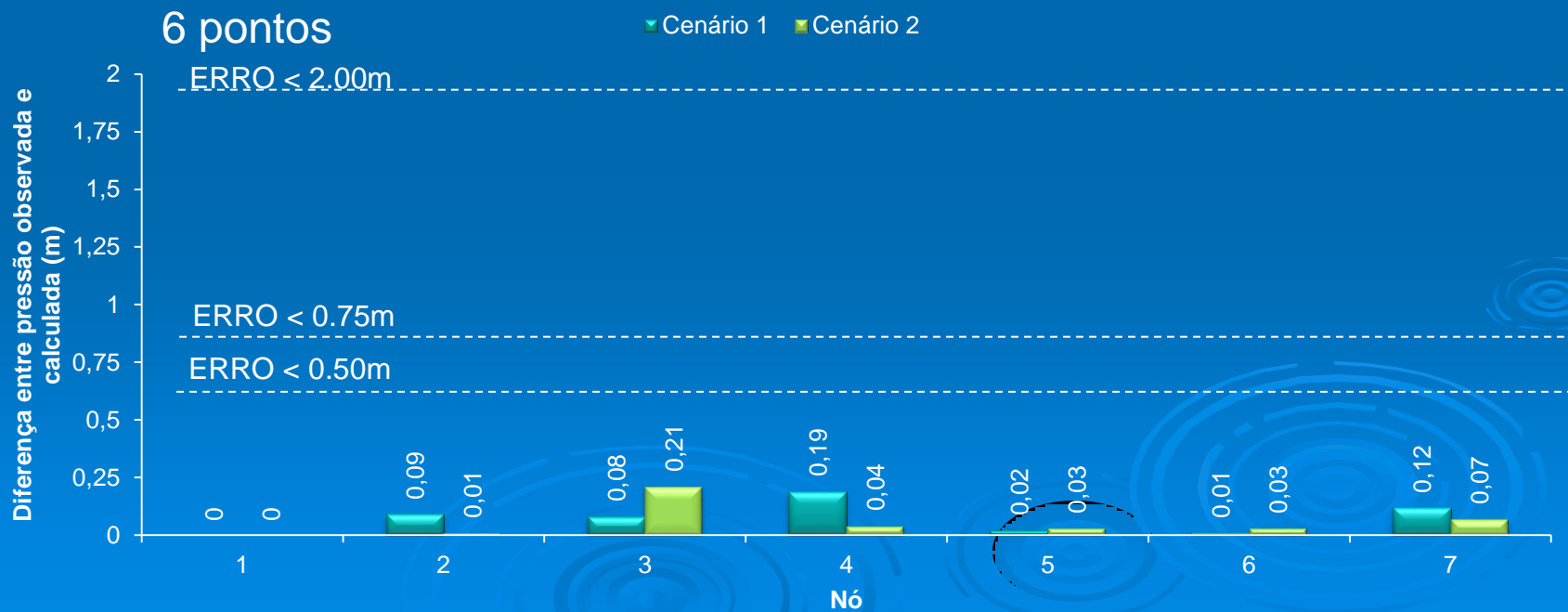
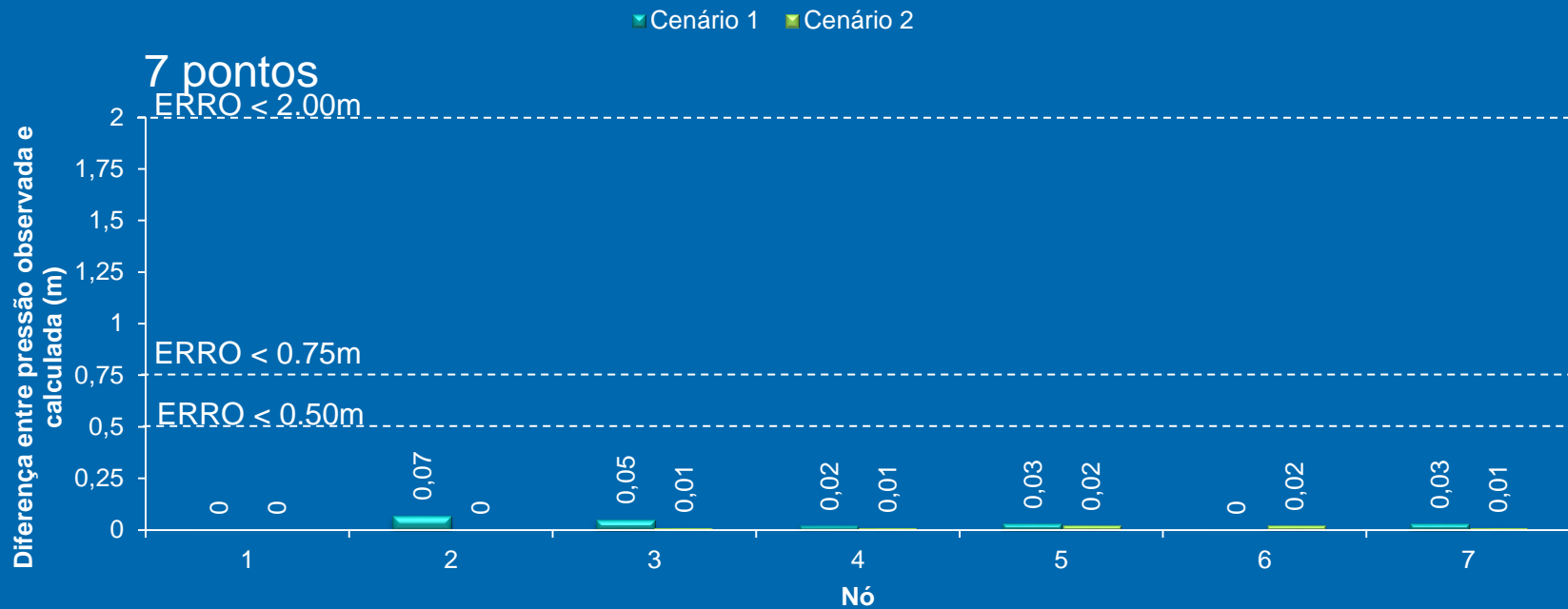
**$\pm 0,75$ m para 95% das
medidas de pressão**

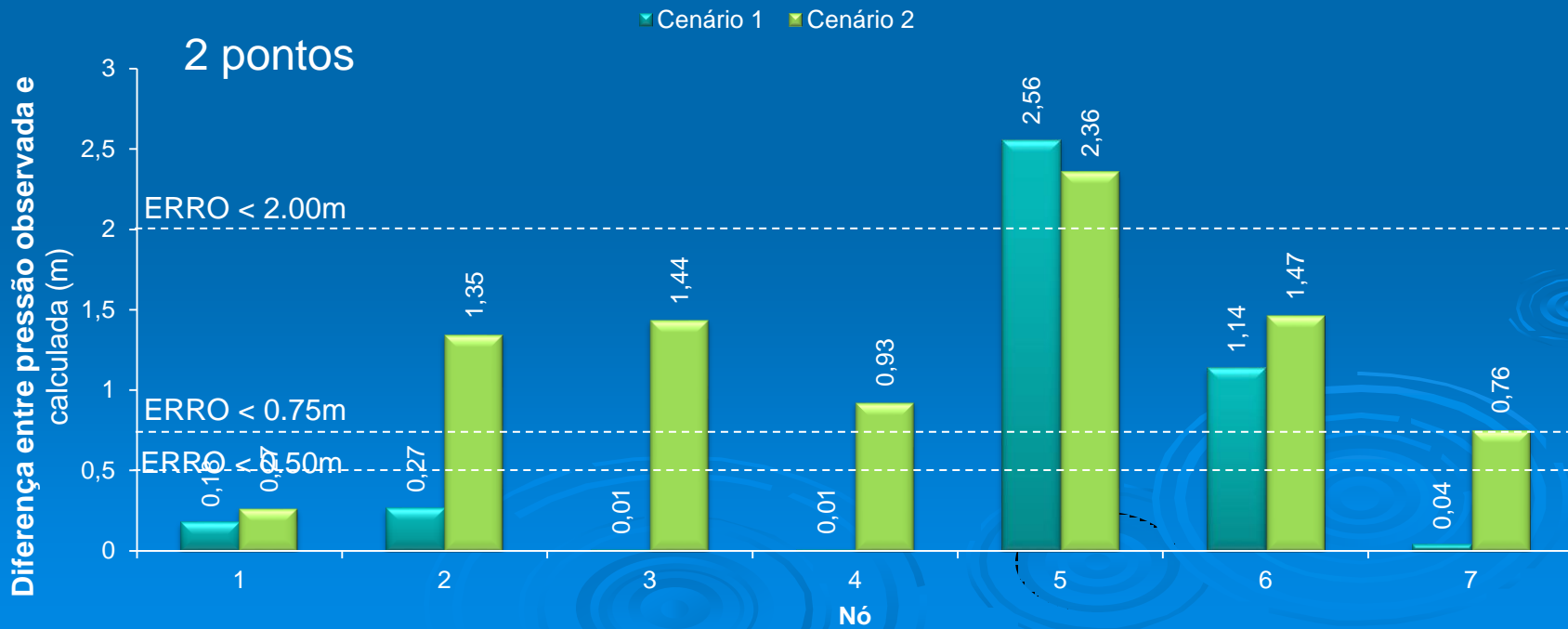
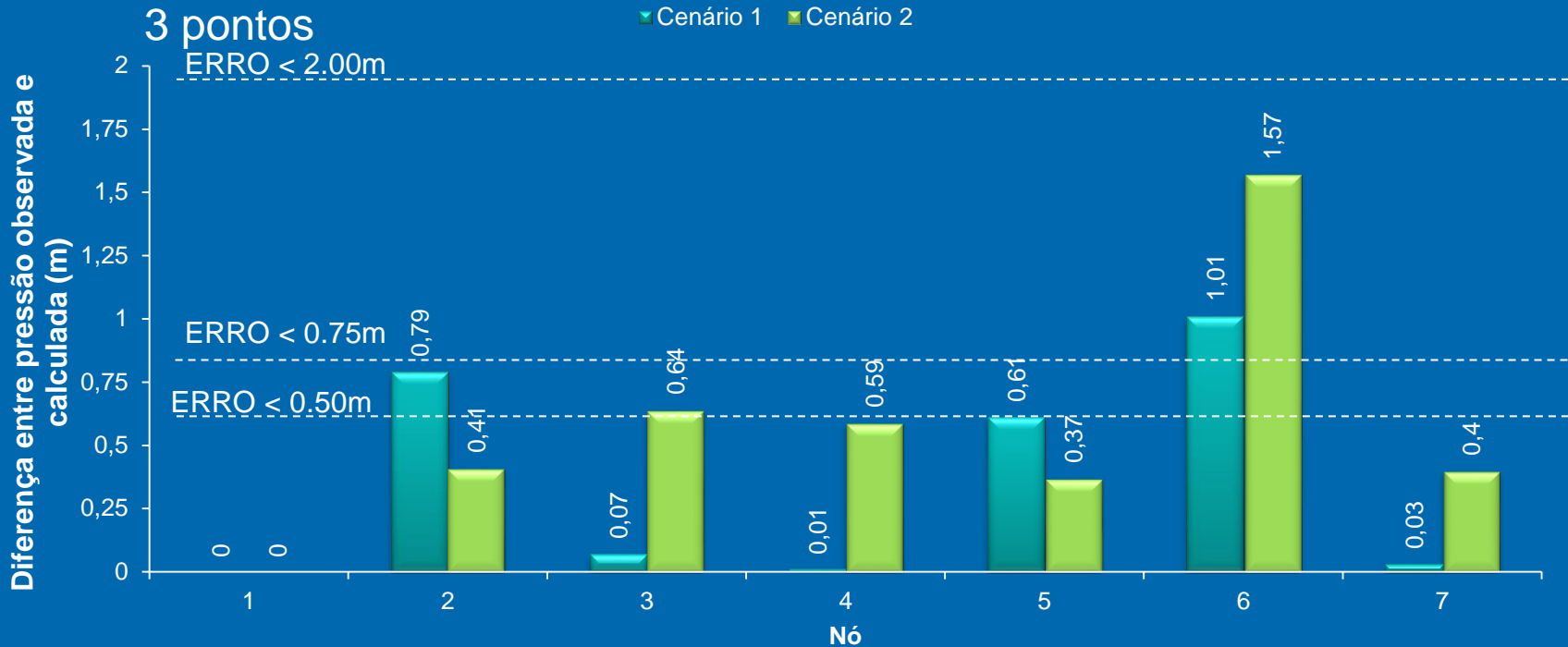
**$\pm 2,00$ m para 100% das
medidas de pressão**

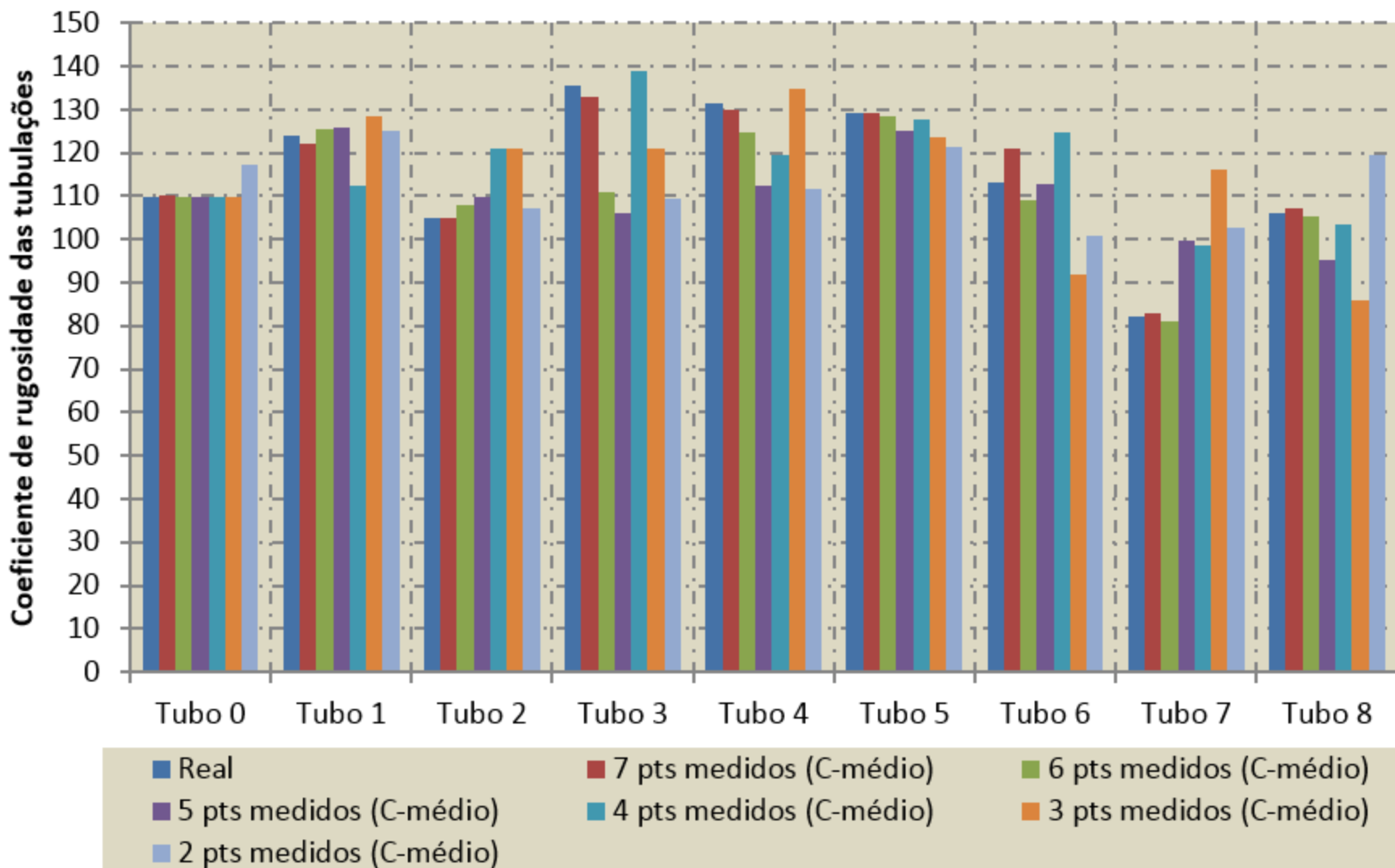
?

**Garante
calibração das
Rugosidades ?**

Parâmetro	Possibilidades analisadas
Influência do número de pontos de pressão medida	<ul style="list-style-type: none">• Todos os pontos – sete pontos• Seis pontos medidos• Cinco pontos medidos• Quatro pontos medidos• Três pontos medidos• Dois pontos medidos
Comparação do método com os algoritmos genéticos	

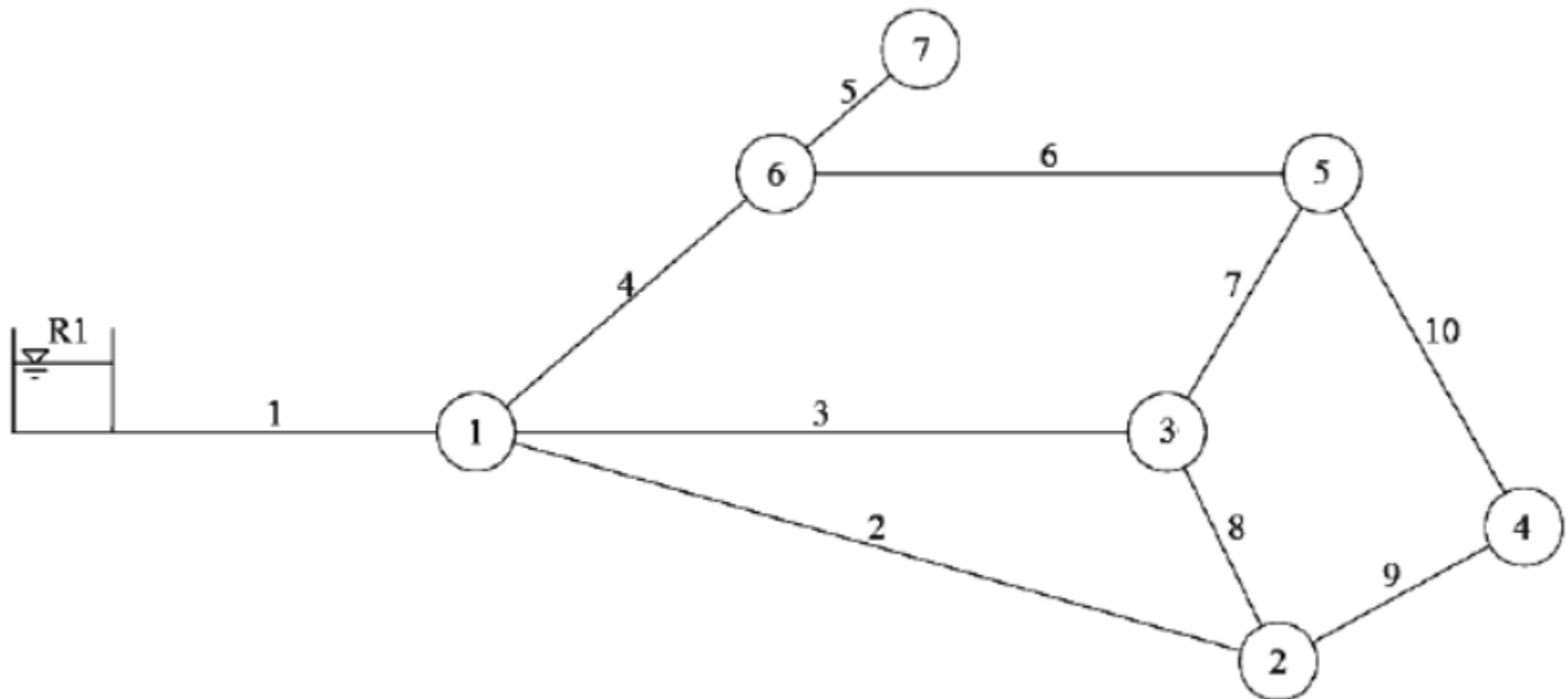






Comparação com o Algoritmo Genético

- Para a comparação do MIGH com os algoritmos genéticos usou-se o MIGHA-C com pressões conhecidas em todos os pontos.
- Os resultados foram comparados com aqueles obtidos por algoritmos genéticos (AG) em SILVA (2006).
- Para esta comparação foi utilizada a rede hipotética adotada em seu trabalho que foi criada por WALSKI (1983b) e adaptada por GAMBALE (2000) e está ilustrada na figura abaixo.



TUBO	DIÂMETRO (<i>mm</i>)	COMPRIMENTO (<i>m</i>)	RUGOSIDADE
			C ($m^{0.3676}/s$)
1	500	700	140
2	250	1800	110
3	400	1520	130
4	300	1220	135
5	300	600	90
6	200	1220	110
7	250	920	120
8	150	300	115
9	200	600	85
10	100	1220	80

Nó	Demanda (L/s)	
	Cenário 1	Cenário 2
1	0,00	0,00
2	15,00	36,00
3	62,50	120,00
4	15,00	10,00
5	47,50	80,00
6	30,00	80,00
7	37,50	37,50

Nó	Pressões reais (m)	
	Cenário 1	Cenário 2
1	58,74	56,44
2	55,75	48,37
3	56,08	48,72
4	53,77	47,03
5	53,35	41,80
6	54,27	44,12
7	53,03	42,88

Comparação com o Algoritmo Genético

Foram realizadas doze calibrações pelo MIGH, sendo seis no cenário 1 e seis no cenário 2.

Calibração		Coeficiente de rugosidade calculado por tubo - C de Hazen-Williams									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
MIGH	1	139,90	117,90	131,50	129,80	89,90	74,40	129,60	75,20	84,70	73,70
	2	139,90	106,70	134,00	130,70	90,00	80,60	127,40	132,10	85,60	92,40
	3	139,90	114,00	130,30	133,00	90,00	96,50	122,80	100,00	86,30	107,20
	4	139,90	106,60	128,30	138,90	90,00	136,80	112,50	132,10	85,60	91,80
	5	139,90	108,10	129,90	136,10	90,10	117,80	117,40	126,70	85,90	98,60
	6	139,90	101,00	134,30	132,40	90,20	93,20	124,70	155,40	84,70	71,90
	7	139,90	116,90	127,20	136,50	90,00	120,30	115,30	79,00	91,60	107,70
	8	139,80	118,90	130,10	131,40	90,50	84,60	123,70	76,00	95,70	125,90
	9	140,20	109,60	129,50	135,70	90,00	115,00	115,40	151,30	96,30	128,10
	10	139,90	104,10	134,10	131,40	90,10	84,10	127,70	150,80	82,00	65,80
	11	140,20	111,60	129,30	135,10	90,10	111,30	117,80	119,30	91,40	106,80
	12	140,20	115,50	129,00	134,10	90,20	104,00	120,30	82,90	89,50	98,60
MÉDIA MIGH		139,97	110,91	130,63	133,76	90,09	101,55	121,22	115,07	88,28	97,38
σ		0,14	5,80	2,36	2,76	0,16	19,08	5,59	31,08	4,58	19,81
Real		140,00	110,00	130,00	135,00	90,00	110,00	120,00	115,00	85,00	80,00
Erro		0,02%	0,83%	0,48%	0,92%	0,10%	7,68%	1,01%	0,06%	3,85%	21,72%
										Erro médio por tubo	4,07%

Comparação com o Algoritmo Genético

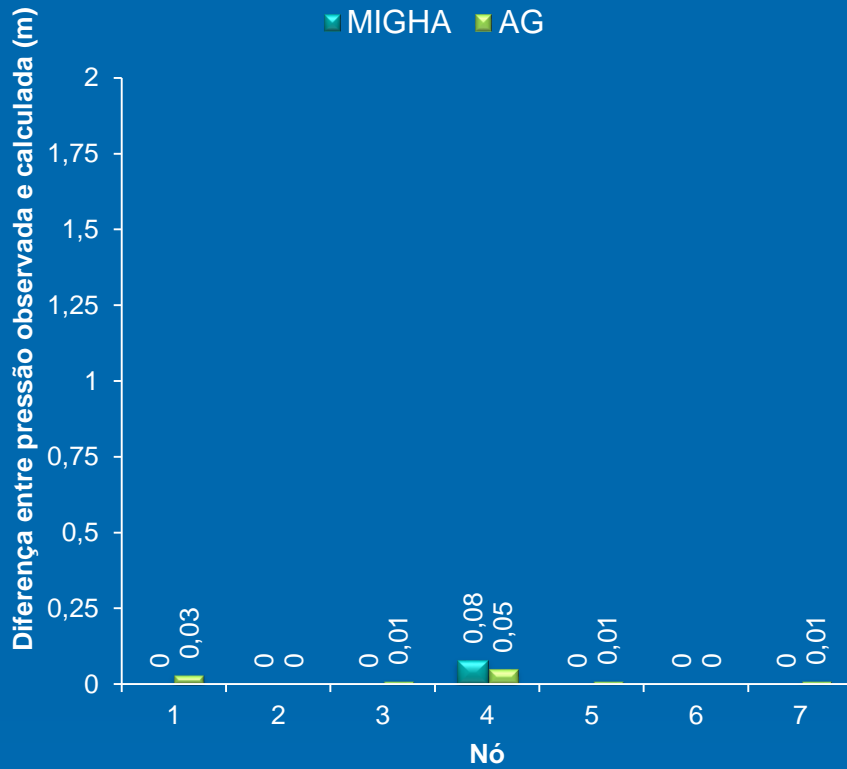
Os resultados da calibração com AG, utilizados na comparação, são valores de coeficiente de rugosidade de *Hazen-Williams* médios de doze execuções do algoritmo em 1000 iterações realizadas com os seguintes operadores:

Os coeficientes de rugosidade estimados pelo AG estão apresentados abaixo.

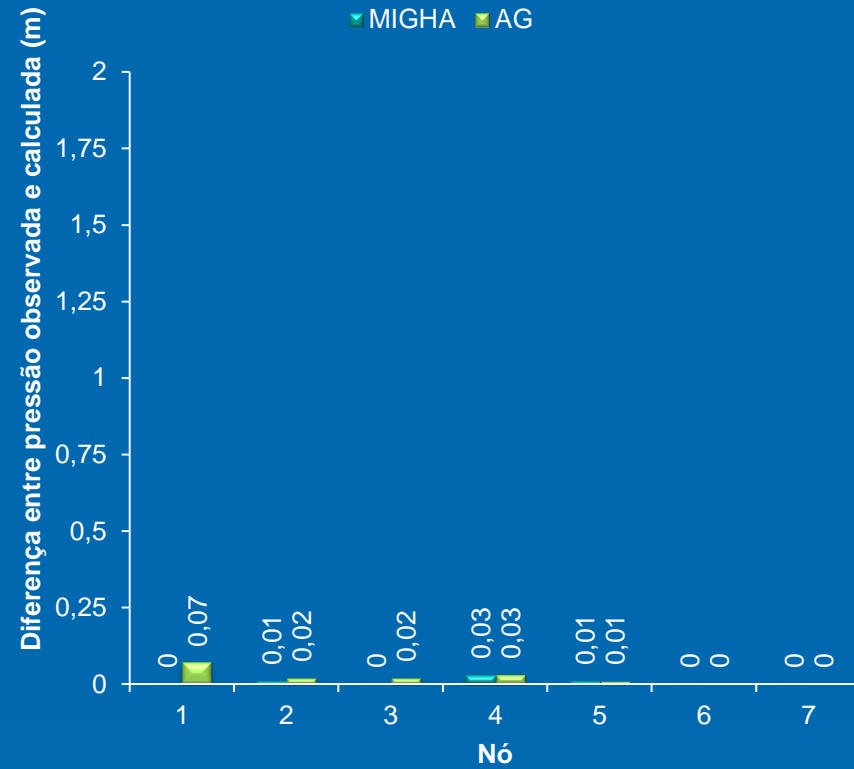
Calibração	Coeficiente de rugosidade calculado por tubo - C de Hazen-Williams									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
MÉDIA AG	138,41	113,30	131,06	134,11	90,22	100,62	121,19	105,09	87,31	97,57
REAL	140,00	110,00	130,00	135,00	90,00	110,00	120,00	115,00	85,00	80,00
σ	2,52	3,34	2,36	1,46	0,26	8,75	2,43	17,62	1,99	7,76
Erro	1,14%	3,00%	0,82%	0,66%	0,24%	8,53%	0,99%	8,62%	2,72%	21,96%
Erro médio por tubo										5,28%

Comparação com o Algoritmo Genético

Cenário 1

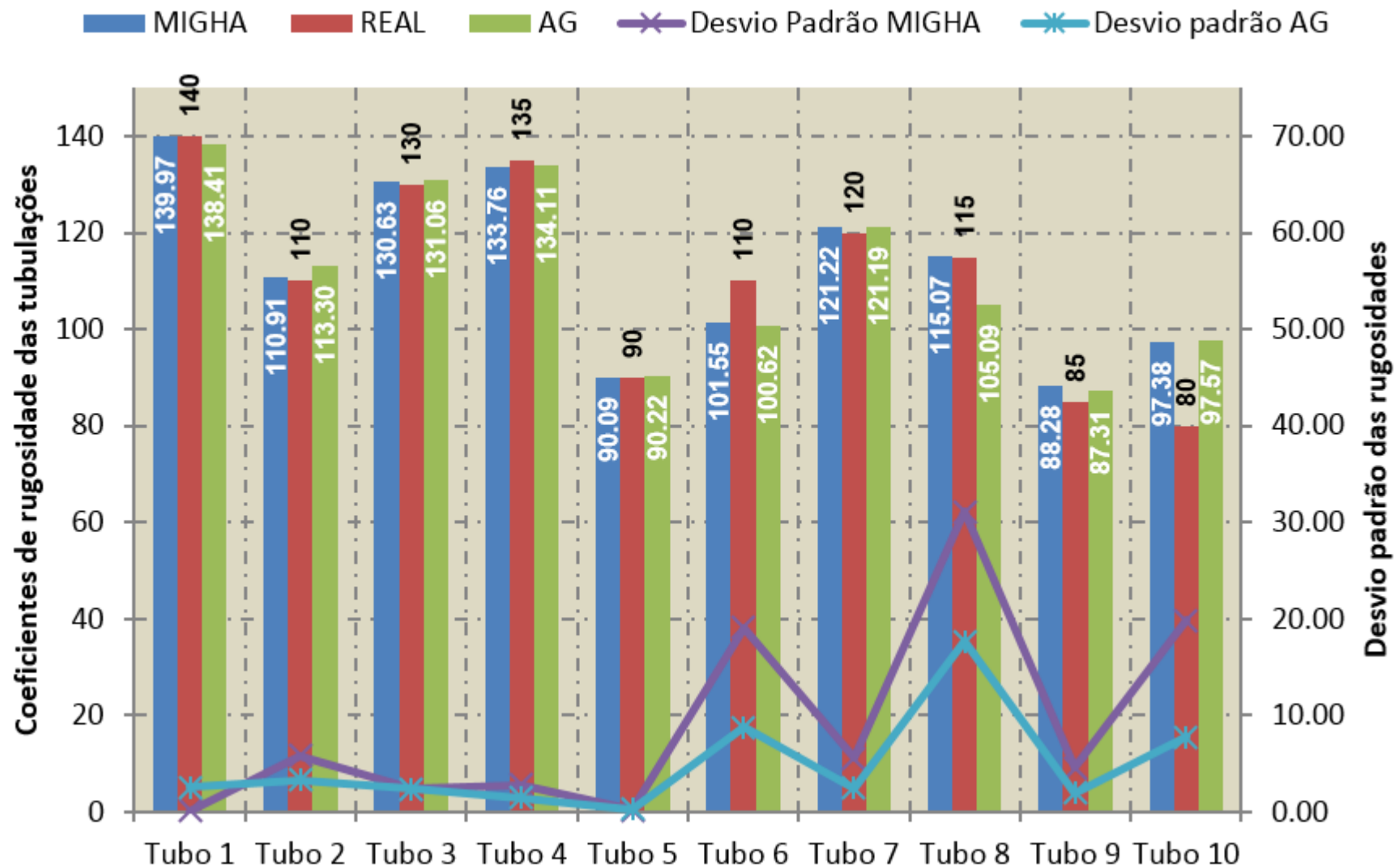


Cenário 2



- Os erros absolutos foram bem próximos a zero nos dois cenários para os dois métodos onde as diferenças foram menores que 0,1m em todos os nós, porém o MIGHA apresentou diferenças menores ainda que o AG.

Comparação com o Algoritmo Genético



- O modelo proposto pode ser utilizado como ferramenta de calibração já que as pressões calculadas apresentaram erros absolutos dentro dos limites de tolerância definidos pelo WATER RESEARCH CENTRE (1989).
- O MIGH apresenta uma grande vantagem em relação a outros métodos, seu tempo de processamento, que é bastante inferior, por exemplo, ao algoritmo genético.

ESTUDO DE CASO

- Rede de Abastecimento de Água que sofre com problemas no abastecimento é o da cidade de Várzea Alegre/CE, que segundo a CAGECE teve um aumento de aproximadamente 29% nas ligações novas entre 2005 e 2009, e atualmente tem dificuldade em atender as demandas de água com um nível de pressões adequado (ARCE, 2012).

- ▶ Nesse estudo, a rede de abastecimento de água da cidade de Várzea Alegre/CE foi analisada tendo como objetivo fazer um diagnóstico do funcionamento da mesma e apresentar intervenções possíveis para o melhor funcionamento da rede.
- ▶ O simulador hidráulico usado foi o UFC2/EPANET.



Área de Estudo

- O município de Várzea Alegre localiza-se a 467 km da capital do estado, Fortaleza. Segundo o IBGE (2010), a cidade possui uma área de aproximadamente 836 km², e têm uma população de 38.434 habitantes.



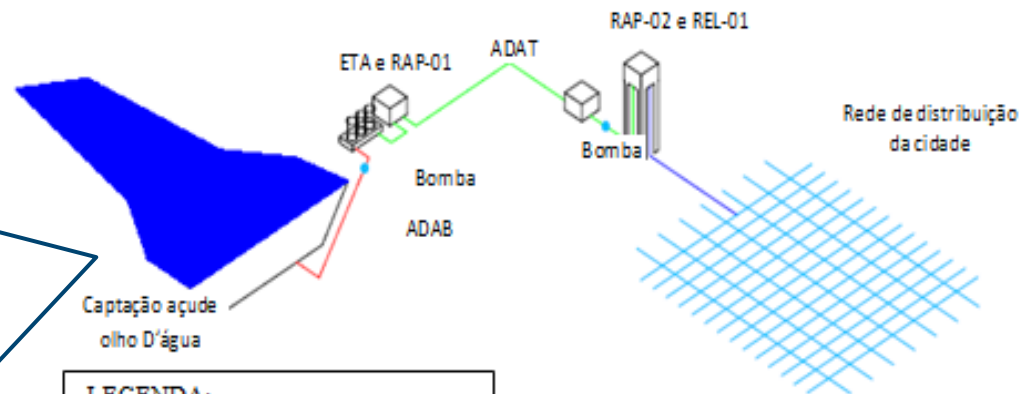
Mapa de localização da cidade de Várzea Alegre

Área de Estudo

➤ Rede de Abastecimento de Água da cidade de Várzea Alegre



Manancial da cidade (área destinada à captação)



LEGENDA:
ETA: Estação de Tratamento de Água
RAP: Reservatório Apoiado
REL: Reservatório Elevado
ADAB: Adutora de Água Bruta
ADAT: Adutora de Água Tratada

Representação simplificada da rede de abastecimento de água de Várzea Alegre - CE

Metodologia



Fluxograma das etapas metodológicas

Metodologia

➤ Visita de Campo



Vista do manancial captação



Reservatório Elevado principal
(REL-01)



Detalhe das tubulações
na ETA compacta



Reservatório Apoiado
(RAP - 01)



Vista lateral dos filtros da
ETA compacta



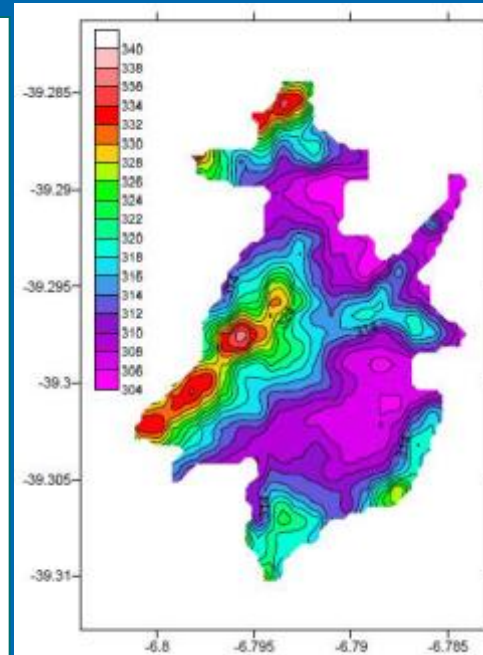
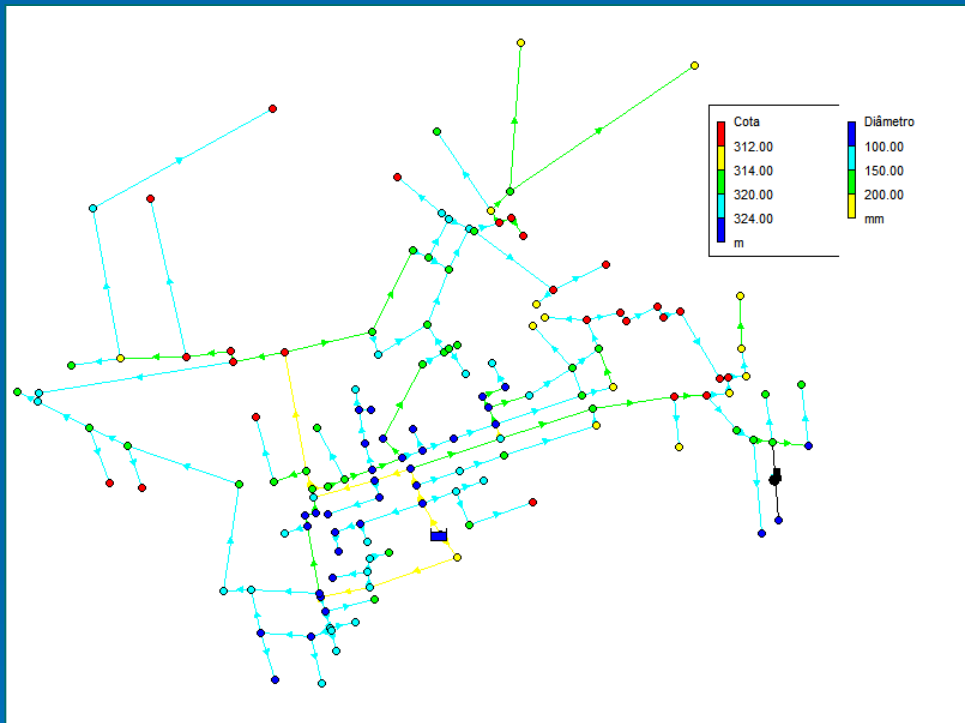
Conjunto de motor-bombas de recalque do
Reservatório Apoiado (RAP-02) para o
Reservatório Elevado (REL-01)

Imagem do sistema de abastecimento de água obtida durante a visita de campo ao Sistema de Abastecimento de Água de Várzea Alegre/CE realizada em 19/04/2012.

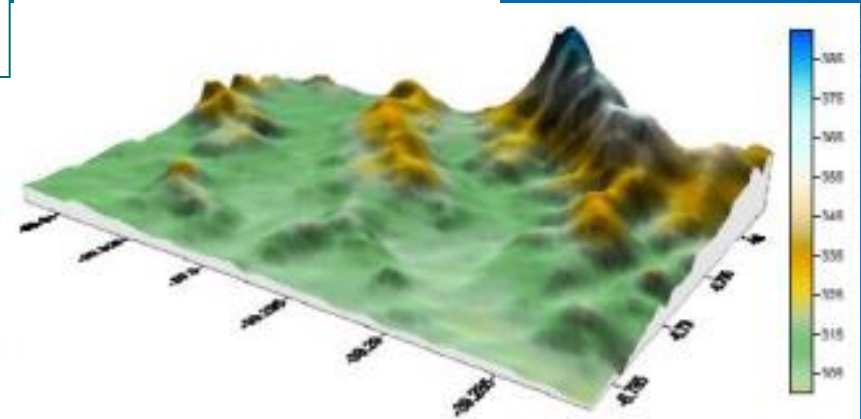
Metodologia

➤ Caracterização da área de estudo

A.



Curvas de nível (A) modelo numérico do terreno (B) da cidade de Várzea Alegre-CE elaborada a partir de imagem de satélite. Datum WGS-84



Rede de água de Várzea Alegre-CE de acordo com o cadastro fornecido pela CAGECE.

• Lançamento: AutoCAD®/UFC2

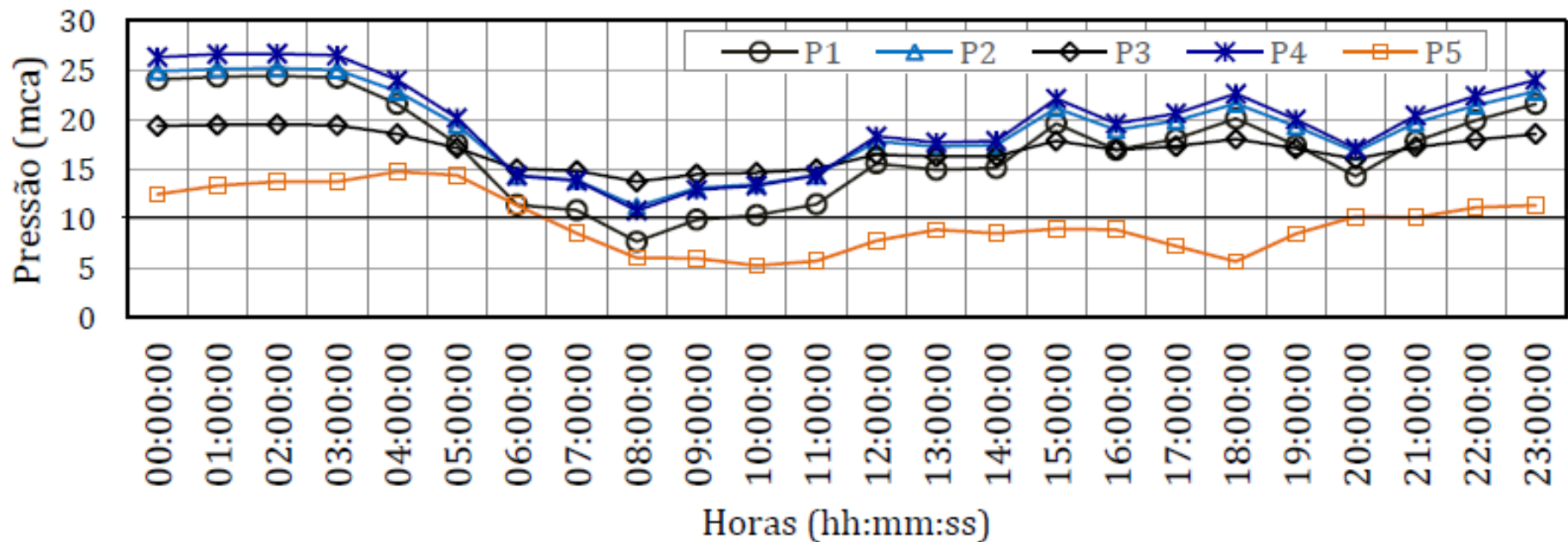
• Modelo Numérico do Terreno:

<http://www.zonums.com/gmaps/terrain.php>

Interpolação: método de krigagem Surfer®

Pressões diárias observadas

(Necessárias para a Calibração das Rugosidades)



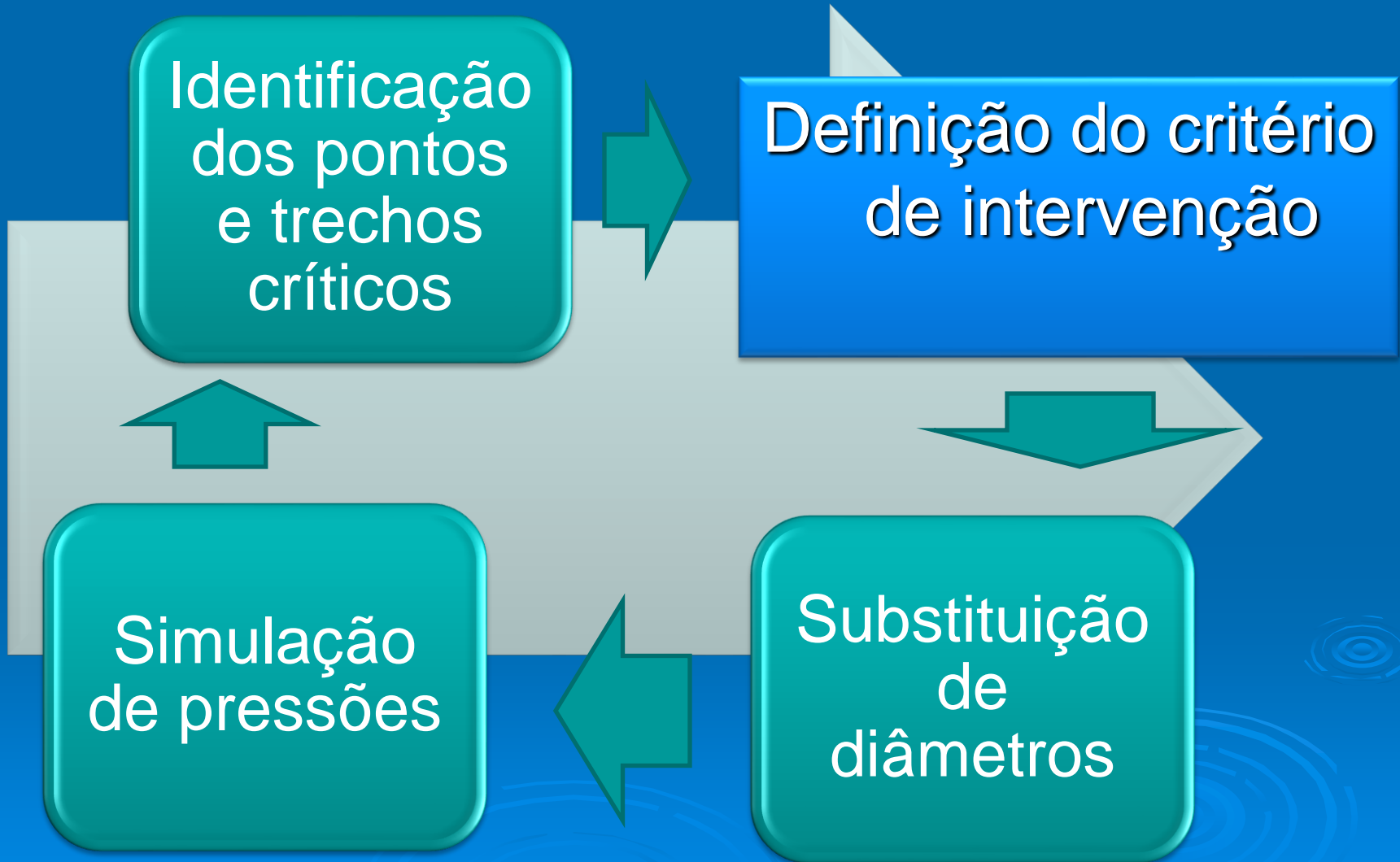
Lançamento da rede com indicação dos pontos com dados observados e trechos analisados



Distribuição das cotas nos pontos de consumo (nós), diâmetros da tubulação (trechos entre nós) e indicação dos pontos em que a pressão foi observada na rede de abastecimento de água da cidade de Várzea Alegre, CE.

- A partir dos dados observados de pressão horária foi constatada a existência de pressões abaixo do valor mínimo recomendado por norma;
- Constatou-se também que os problemas de deficiência de pressões observadas nos pontos avaliados foram ocasionados principalmente pelo crescimento da demanda, representado pelo aumento no número de ligações domiciliares, que ocasionou redução das pressões nos pontos mais críticos da rede;
- Os pontos críticos são pontos de topografia mais alta, tubulação com diâmetro inadequados e pontos muito distantes do reservatório.

Intervenções físicas na rede de água



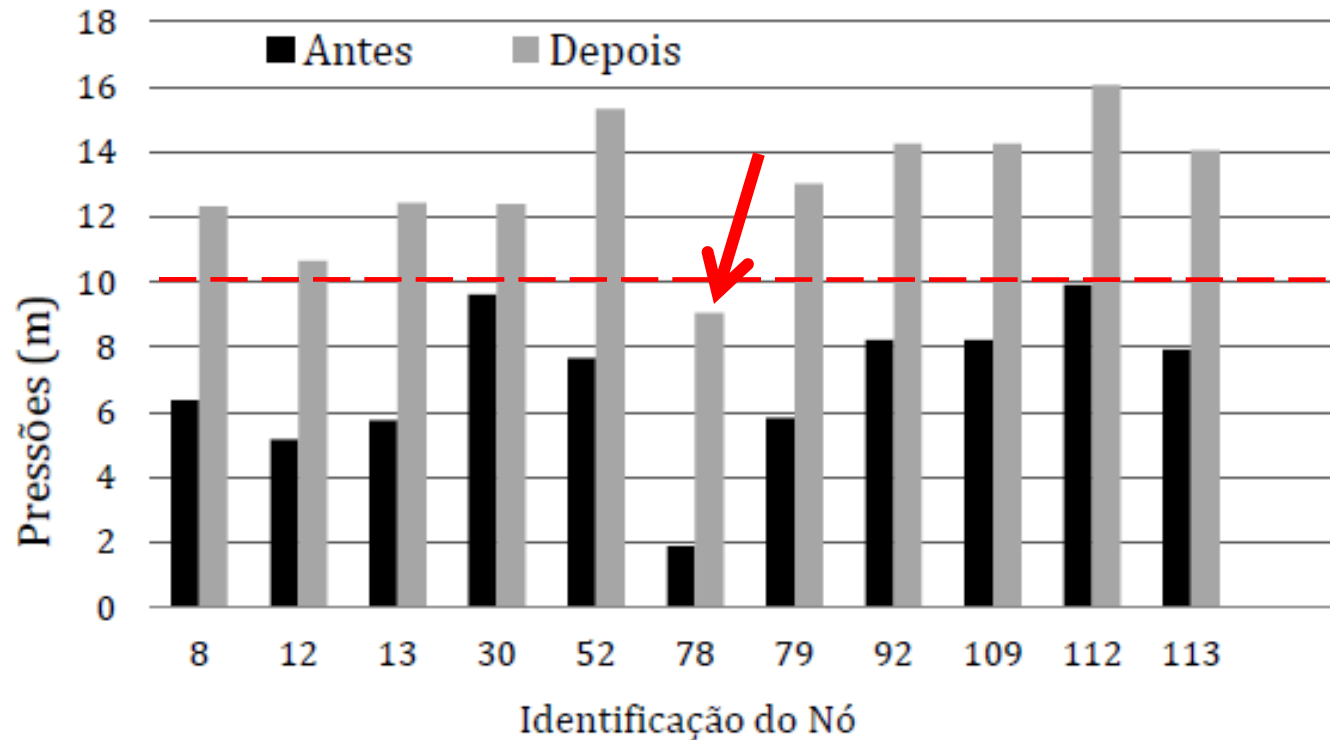
➤ Impacto das alterações nos diâmetros pelo critério da vazão e velocidade máxima

Descrição		Valores recomendados		Antes das intervenções			Após as intervenções			
Trecho	DN (mm)	Q _{max} (L/s)	V _{max} (m/s)	Q (L/s)	V (m/s)	J (m/km)	DN (mm)	Q (L/s)	V (m/s)	J (m/km)
7	150	14,1	0,8	14,7	0,8	6,51	200	14,5	0,46	1,20
10	200	28,3	0,9	77,8	2,5	38,47	300	86,5	1,22	4,01
11	200	28,3	0,9	66,0	2,1	27,82	300	75,0	1,06	2,63
41	200	28,3	0,9	32,3	1,0	6,84	250	24,0	0,49	3,04
51	100	4,7	0,6	5,8	0,7	6,06	150	5,8	0,33	0,87
81	100	4,7	0,6	22,6	2,9	62,06	200	30,1	0,96	3,70
154	200	28,3	0,9	85,8	2,7	46,71	300	96,4	1,36	7,18
156	200	28,3	0,9	143,7	4,6	113,02	400	134,1	1,07	3,11
76	100	4,7	0,6	7,7	0,9	8,95	150	7,2	0,41	1,28

Resultados e Discussões

➤ Intervenções físicas na rede de água

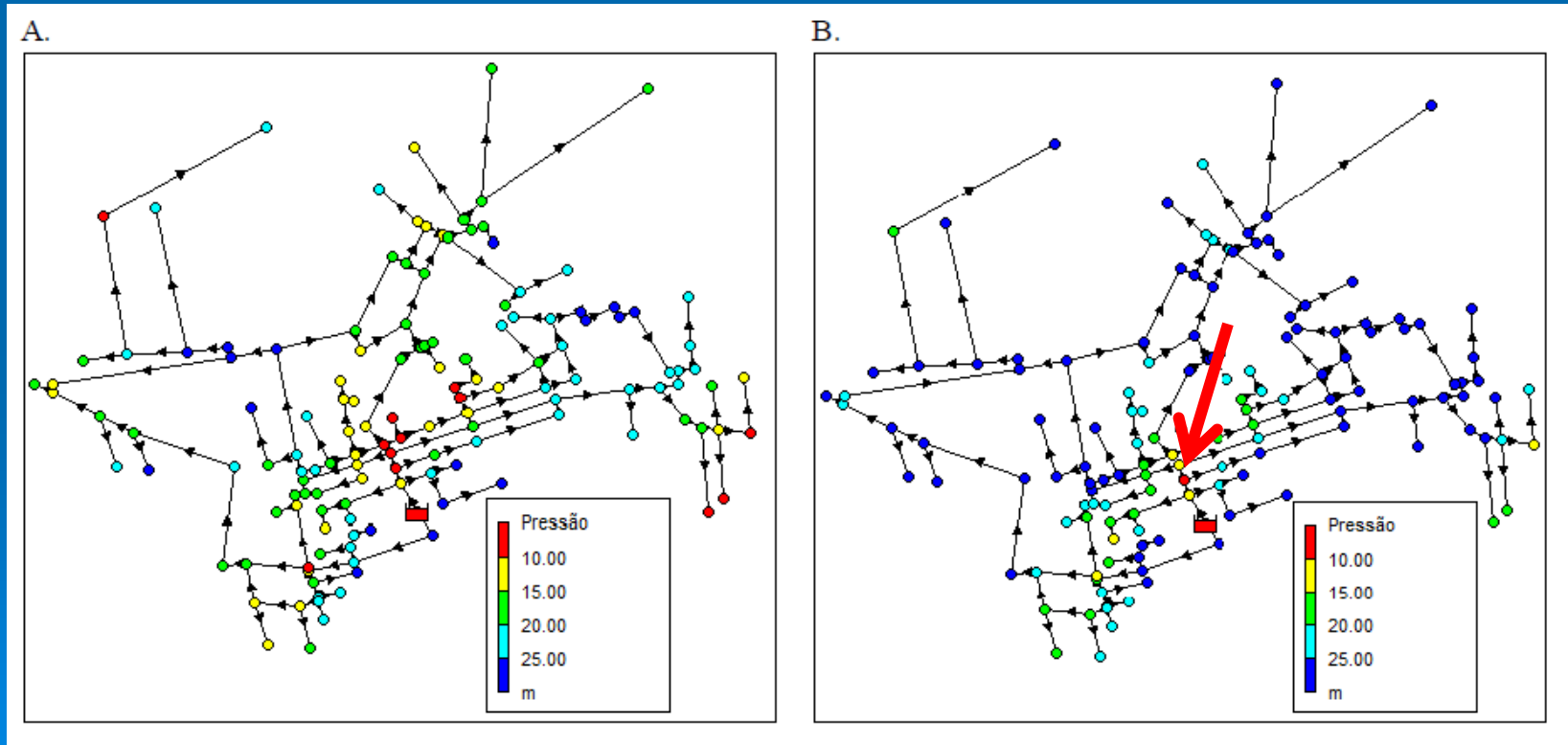
Impacto das intervenções nos pontos (nós) críticos da rede de água.



Resultados e Discussões

➤ Intervenções físicas na rede de água

Distribuição de pressões na rede para o horário de 08:00h antes (A) e após as intervenções (B).



- As intervenções físicas apresentadas se mostraram eficientes no aumento das pressões e poderiam ter maiores impactos caso fossem adotadas intervenções não estruturais, como atualização das regras operacionais e campanhas para o uso eficiente da água, apesar de essas ações também serem necessárias

RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Coleta rotineira de dados observados de pressão e vazão em escala horária em diferentes pontos da rede de água;
- Simulação hidráulica do impacto da inserção de um segundo reservatório de compensação da rede;
- Aperfeiçoar os algoritmos de busca dos diâmetros ótimos;



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ

Prof. Marco Aurélio Holanda de Castro, PhD

UFC12

OTIMIZAÇÃO DO CUSTO ENERGÉTICO DE ESTAÇÕES ELEVATÓRIAS DE ÁGUA

SANEAMENTO E ENERGIA ELÉTRICA

Consumo de energia elétrica no abastecimento de água

- ✓ Entre dois e três por cento do consumo de energia do mundo são usados no bombeamento e tratamento de água para o setor urbano e industrial.
- ✓ Mais de 90% dos gastos com energia elétricas em empresas de saneamento devem-se as estações elevatórias de água e esgoto.
- ✓ O consumo de energia elétrica, na maioria dos sistemas de abastecimento de água (SAA) em todo o mundo, poderia ser reduzido em pelo menos 25%, por meio de ações com desempenho em eficiência energética (Watergy).

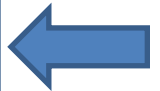


SANEAMENTO E ENERGIA ELÉTRICA

Fatores para o elevado consumo de energia no saneamento

- ✓ Ausência de medição e monitoramento dos principais parâmetros que regulam o sistema;
- ✓ Falta de um melhor compartilhamento dos dados entre várias gerências de companhia;
- ✓ Equipamentos antigos e ultrapassados;
- ✓ Envelhecimento das tubulações;
- ✓ Elevado desperdício de água utilizável;
- ✓ Falta de uma política de manutenção e substituição;
- ✓ Complexidade das redes de condutos;
- ✓ Má política de gerenciamento operacional das elevatórias;
- ✓ Falta de investimento na área operacional.

- Baixo Investimento
- Retorno em curto prazo



SANEAMENTO E ENERGIA ELÉTRICA

Consumo anual de energia (em 2010) por tipo de sistema

Sistemas de Água - TWh/ano	9,47
Sistemas de Esgotos - TWh/ano	1,12
Total - MWh/ano	10,59

Fonte: Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento

✓ 2,32% do consumo total do País (em 2010)

SANEAMENTO E ENERGIA ELÉTRICA

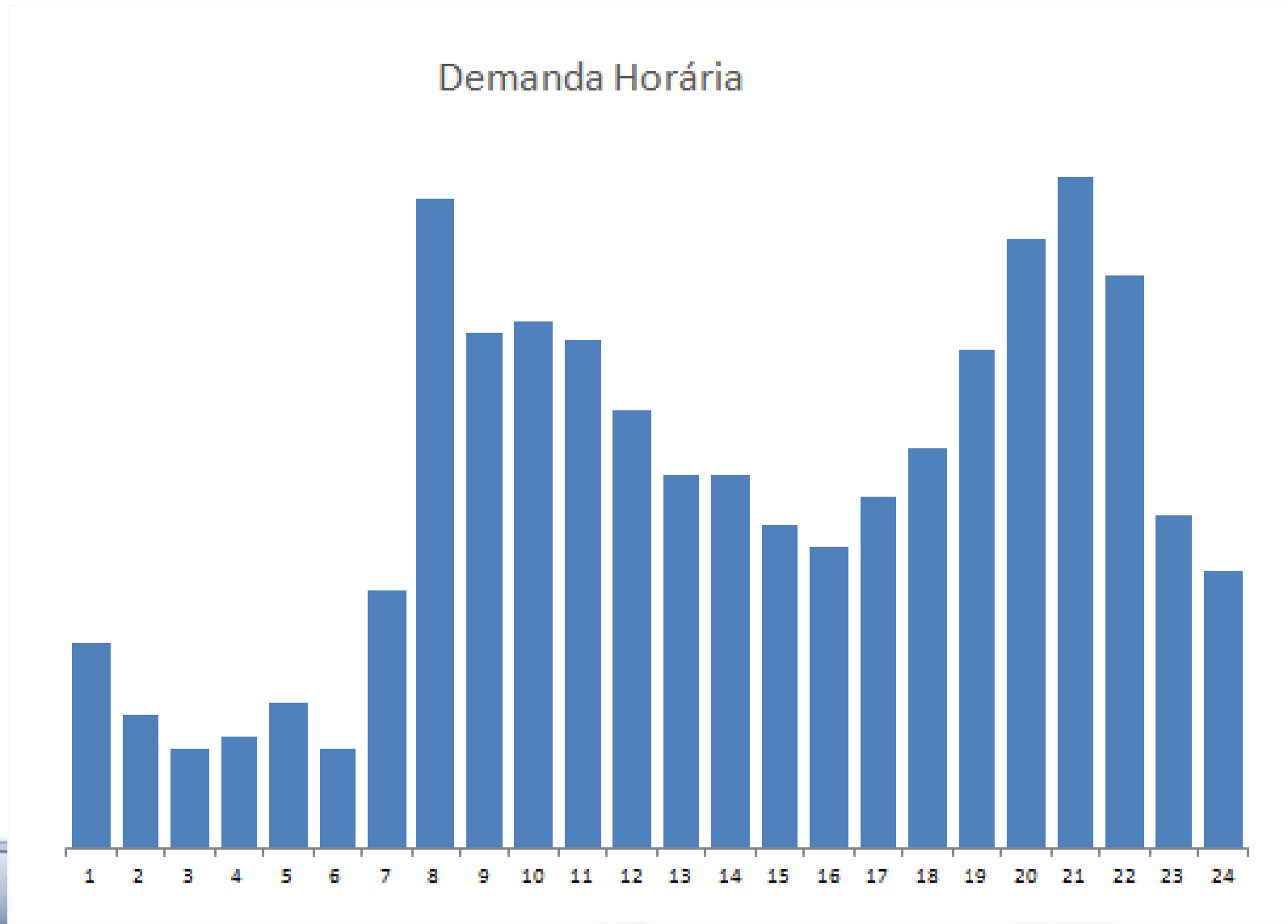
Consumo de energia elétrica do setor público em 2010 (BEN, 2011)	37,00 TWh
Consumo de energia elétrica do setor saneamento em 2010 (SNIS, 2010)	10,59 TWh
Peso relativo do saneamento (água e esgoto) no setor público, em termos de consumo de energia elétrica	28,62%

Fonte: Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento

- ✓ Cerca de 95% do consumo de energia elétrica nos sistemas de abastecimento de água é atribuído aos sistemas de bombeamento. A menor parcela é destinada a sistemas auxiliares e à iluminação.

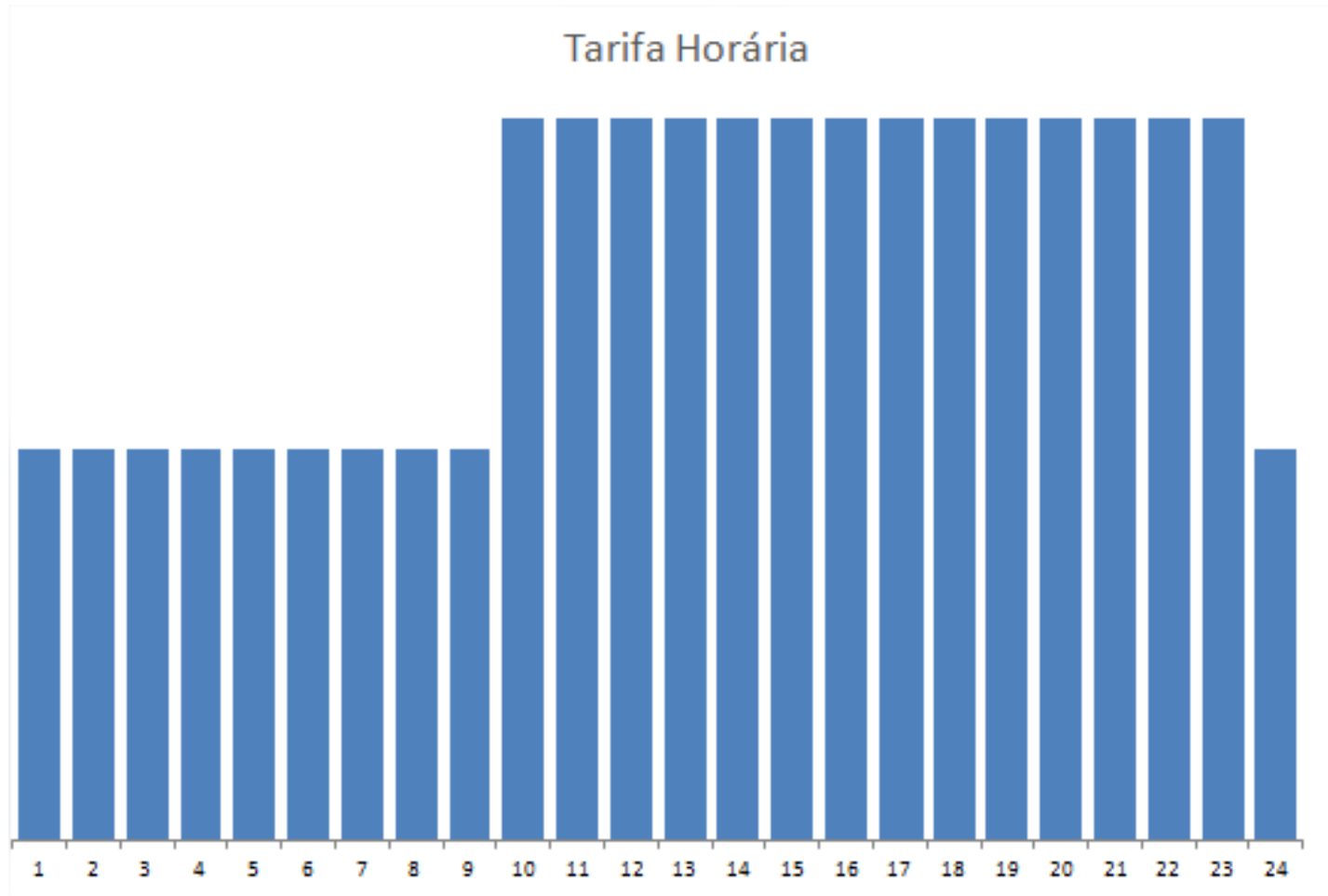
SANEAMENTO E ENERGIA ELÉTRICA

Demanda x tarifa energética x limitações hidráulicas



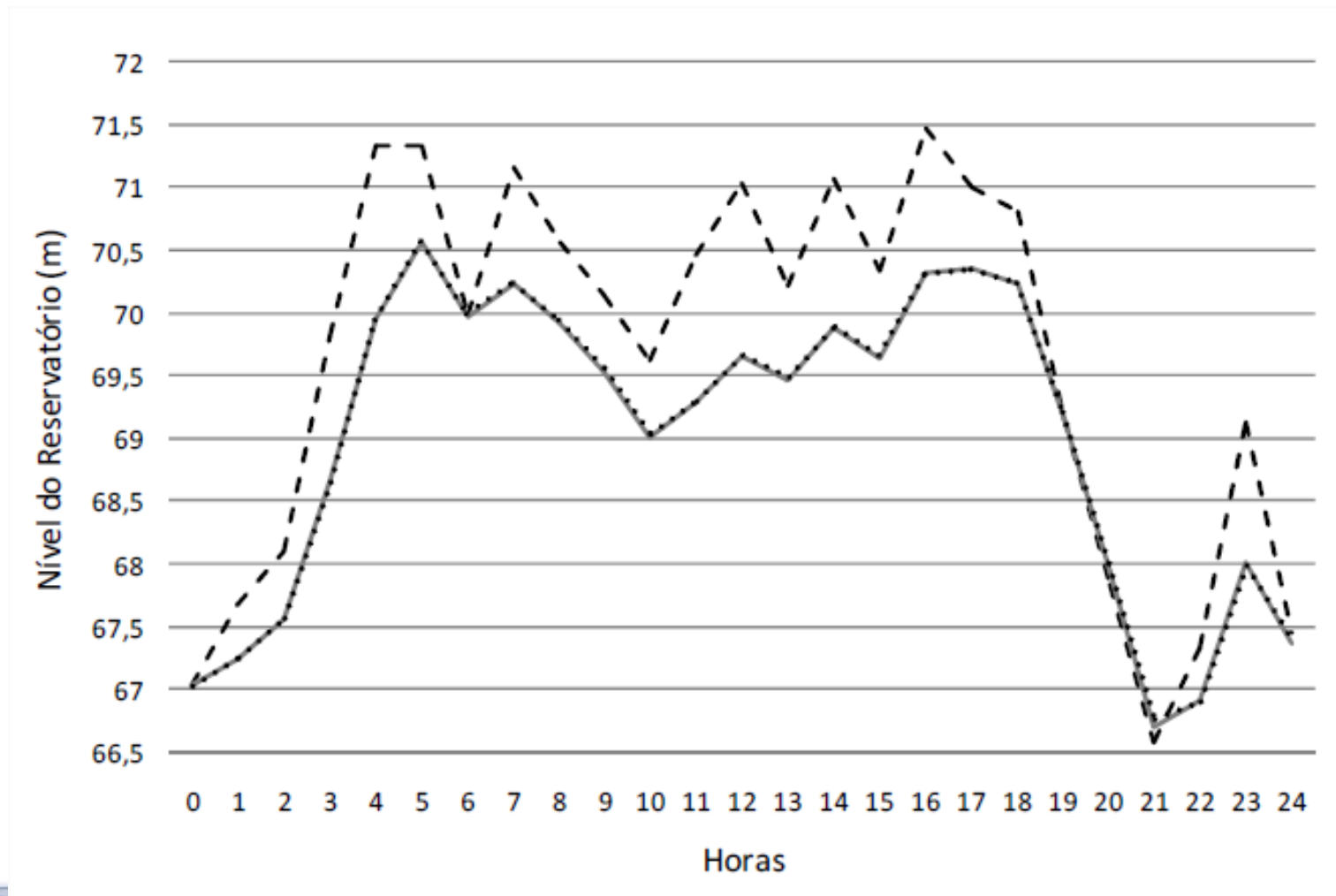
SANEAMENTO E ENERGIA ELÉTRICA

Demanda x **tarifa energética** x limitações hidráulicas



SANEAMENTO E ENERGIA ELÉTRICA

Demanda x tarifa energética x **limitações hidráulicas**



SANEAMENTO E ENERGIA ELÉTRICA

Demanda x tarifa energética x limitações hidráulicas

Regra de Operação: Definir as horas em que as bombas ficarão ligadas e desligadas ao longo do dia.

Como definir uma regra de operação (liga/desliga) para as bombas de forma a atender a demanda da rede de distribuição e os limites dos níveis dos reservatórios, contemplando o **menor custo energético possível?**



- Modelagem Hidráulica
- Otimização

MODELAGEM COMPUTACIONAL

Definição

✓ É a área de conhecimento que estuda a simulação de fenômenos reais a partir do computador, a fim de replicar e prever o comportamento dos mesmos.

Como isso é possível?



$$\frac{d^2x}{dt^2} = \begin{cases} -\Omega^2(x_R \cos(\Omega t) - y_R \sin(\Omega t)) - 2\Omega \left(\frac{dx_R}{dt} \sin(\Omega t) + \frac{dy_R}{dt} \cos(\Omega t) \right) \\ + \frac{d^2x_R}{dt^2} \cos(\Omega t) - \frac{d^2y_R}{dt^2} \sin(\Omega t) \end{cases}$$
$$\frac{d^2y}{dt^2} = \begin{cases} -\Omega^2(x_R \sin(\Omega t) + y_R \cos(\Omega t)) + 2\Omega \left(\frac{dx_R}{dt} \cos(\Omega t) - \frac{dy_R}{dt} \sin(\Omega t) \right) \\ + \frac{d^2x_R}{dt^2} \sin(\Omega t) + \frac{d^2y_R}{dt^2} \cos(\Omega t) \end{cases}$$

Equações Matemáticas

Algoritmos
computacionais

```
%Wind Curtailment
for i=1:num_variables
    if dNhw_S(i)>NQP
        dNhw_S(i)=NQP;
    end
end

% Inequality constraints.
% Guarantee supply in the upper reservoir maintaining it's minimum required
% level
for i = 1:num_variables
    A1(i,:) = [-1*ones(1,i) zeros(1,num_variables-i)];
    B1(i) = N_INITU-NMINU-sum(NCU(1:i))+sum(NIU(1:i));
end

% Guarantee that the upper reservoir doesn't spill over
for i = 1:num_variables
    A2(i,:) = [1*ones(1,i) zeros(1,num_variables-i)];
    B2(i) = NMAXU-N_INITU+sum(NCU(1:i))-sum(NIU(1:i));
end

% Guarantee supply in the lower reservoir while maintaining it's minimum
% required level
for i = 1:num_variables
    A3(i,:) = [1*ones(1,i) zeros(1,num_variables-i)];
    B3(i) = N_INITL-NMINL-sum(NCL(1:i))+sum(NIL(1:i));
end
```

MODELAGEM HIDRÁULICA

Definição

✓ A modelagem hidráulica é a principal maneira de replicar, de forma mais correta possível, o comportamento real de um Sistema de Abastecimento de Água. Utiliza-se a modelagem nestes sistemas devido a possibilidade de se avaliar, facilmente e rapidamente, diferentes cenários sem a necessidade de realizar experimentos no próprio sistema construído.



MODELAGEM HIDRÁULICA

Aplicação

Dimensionamento

Reabilitação

**Avaliação do sistema para
diferentes demandas**

**Estudos de
Ampliação**

**Detecção de
Vazamentos**

Análise Operacional



MODELAGEM HIDRÁULICA

Aplicação

Dimensionamento

Reabilitação

**Avaliação do sistema para
diferentes demandas**

**Estudos de
Ampliação**

**Detecção de
Vazamentos**

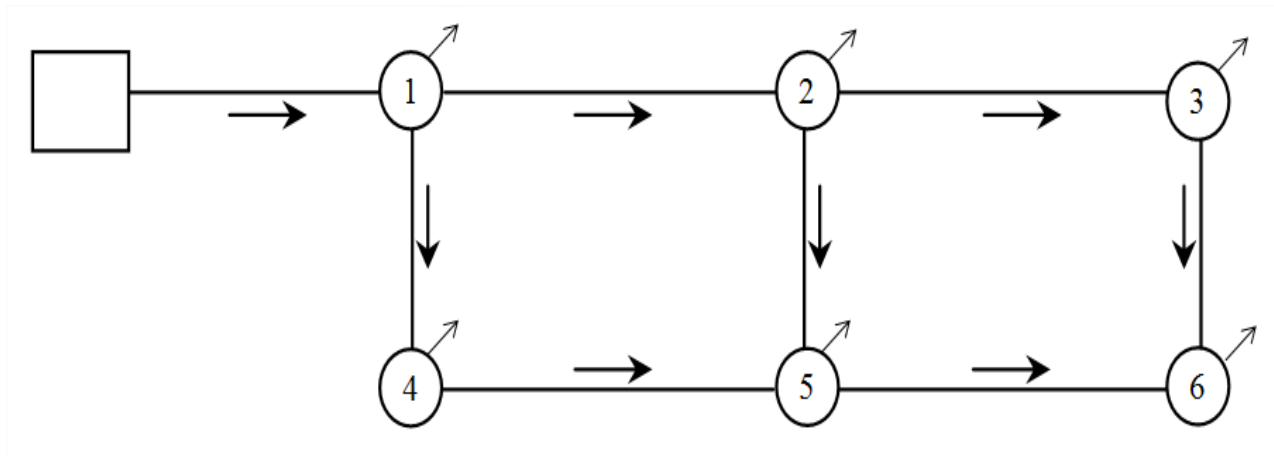
Análise Operacional

MODELAGEM HIDRÁULICA

Princípios físicos

Conservação de Massa

Conservação de Energia



Nó 5

$$Q_{45} + Q_{25} = Q_{56} + d_5$$

Anel da esquerda

$$\Delta h_{12} + \Delta h_{25} - \Delta h_{45} - \Delta h_{14} = 0$$

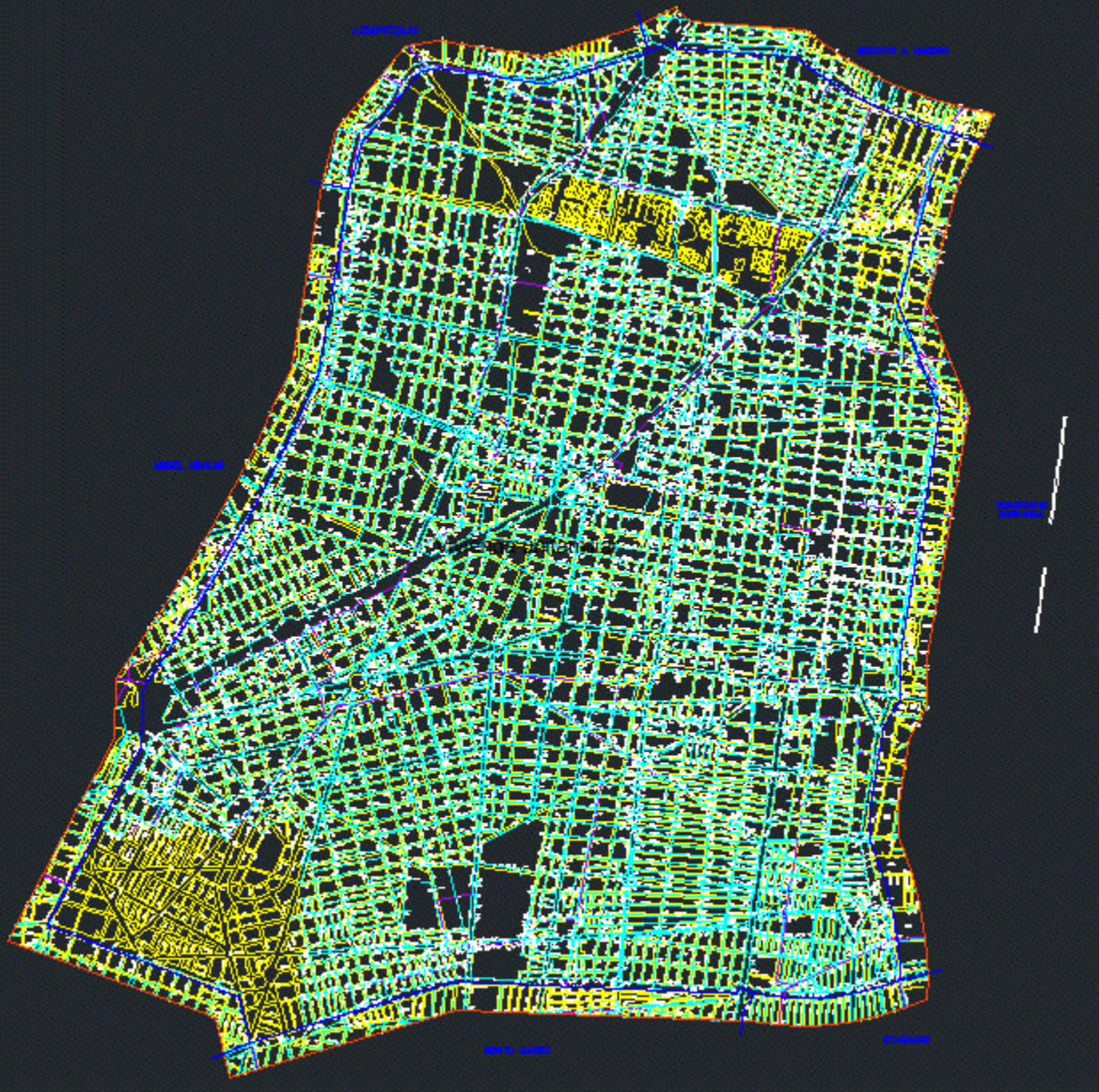
Quantas equações no exemplo?

8 equações!!!

$$\Delta h = \frac{10,64 LQ^{1,85}}{C^{1,85} D^{4,87}}$$

Balanceamento Hidráulico

MODELAGEM HIDRÁULICA



Milhares de equações!!!

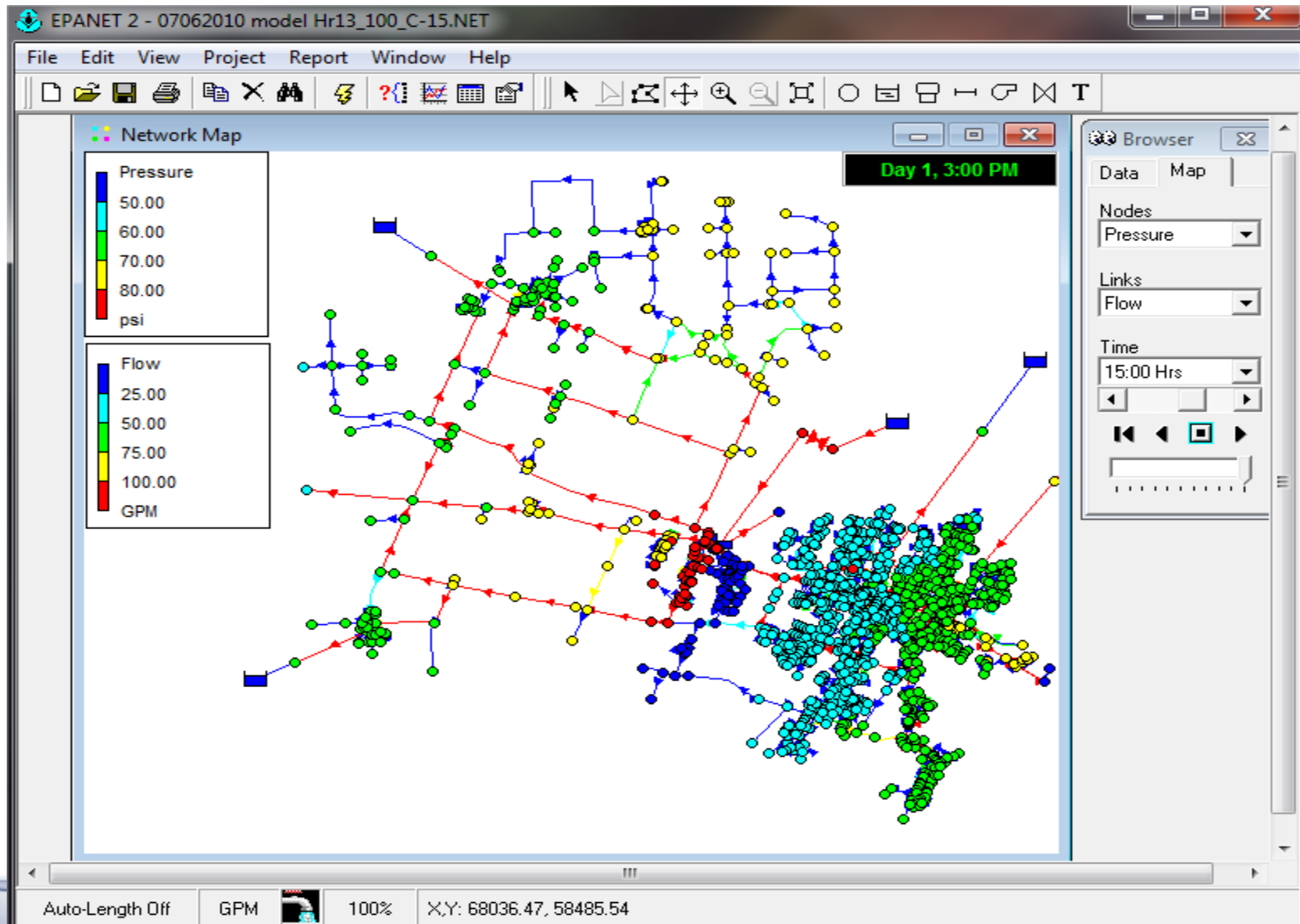


Como resolver?

Simulador
Hidráulico

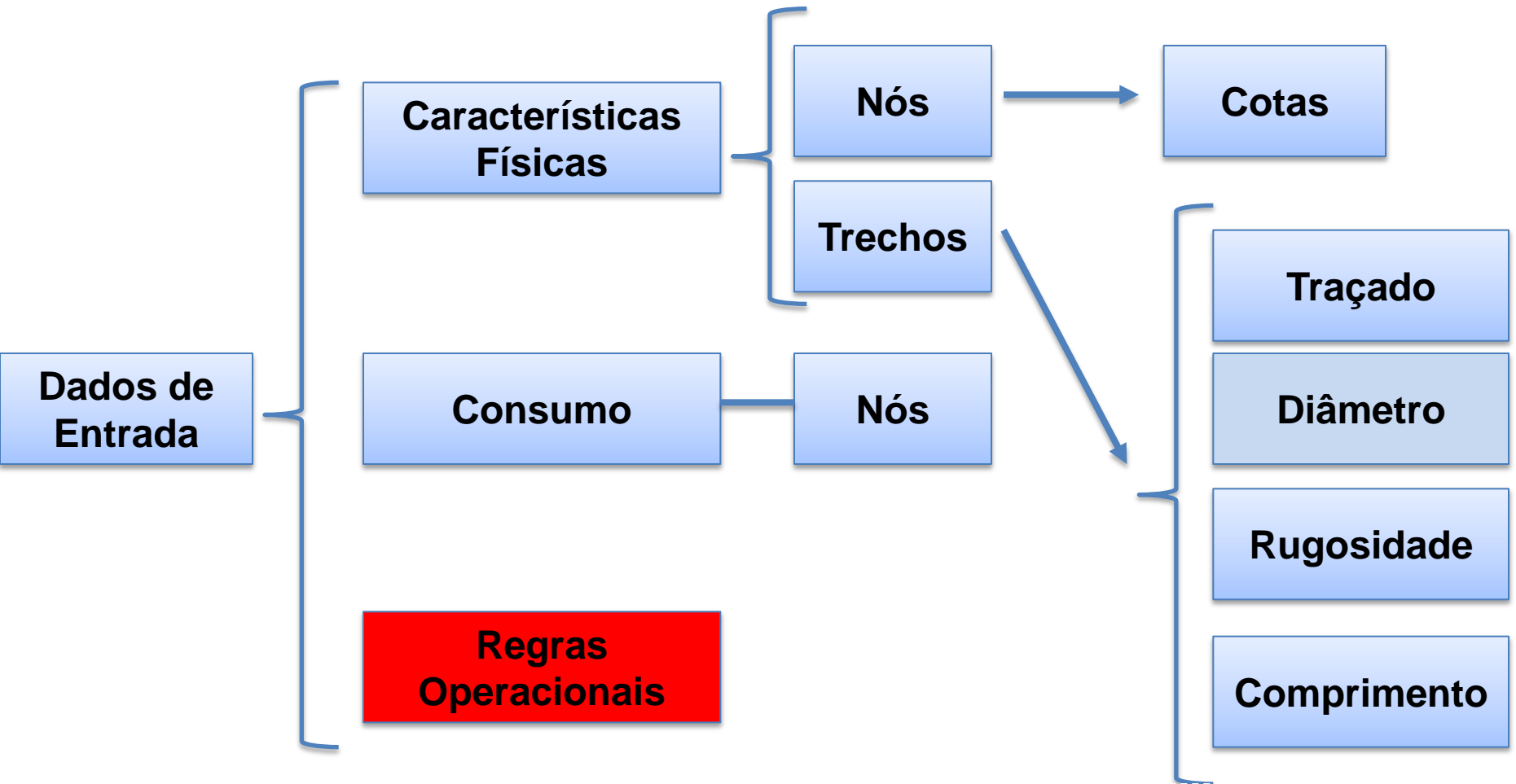
MODELAGEM HIDRÁULICA

EPANET



MODELAGEM HIDRÁULICA

EPANET- DADOS DE ENTRADA



Como definir a regra operacional no EPANET que resulte em um custo energético reduzido?

OTIMIZAÇÃO

Como definir a regra operacional no EPANET que resulte em um custo energético reduzido?

OTIMIZAÇÃO!!!

FUNÇÃO OBJETIVO

- MINIMIZAR O CUSTO ENERGÉTICO DIÁRIO DA OPERAÇÃO DAS BOMBAS

VARIÁVEIS DA FUNÇÃO OBJETIVO

- A ESTRATÉGIA OPERACIONAL

RESTRICÇÕES

- LIMITES MÁXIMO E MÍNIMO DOS RESERVATÓRIOS

OTIMIZAÇÃO

FUNÇÃO OBJETIVO

Minimizar o custo energético diário da operação das bombas.

EQUACIONAMENTO

$$\text{Min } CE = \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^{24} C_{nt} E_{nt}(X_{nt})$$

n: bomba selecionada;

t: passo de tempo;

CE: custo energético diário (\$);

C_{nt} : custo tarifário (\$/kWh);

E_{nt} : energia consumida (kWh);

X_{nt} : estado de funcionamento da bomba (0:desligada,1:ligada);

N: quantidade de bombas do SAA;

OTIMIZAÇÃO

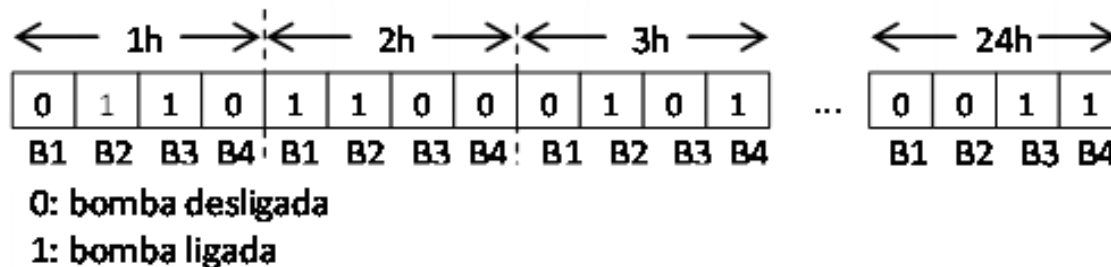
VARIÁVEL DA FUNÇÃO OBJETIVO

X_{nt} : estado de funcionamento da bomba (0:desligada,1:ligada)

FORMATO DA VARIÁVEL

Um vetor de tamanho $24 \times N$ (quantidade de bombas) contendo números inteiros (0 ou 1).

Exemplo para uma estação elevatória com 4 bombas

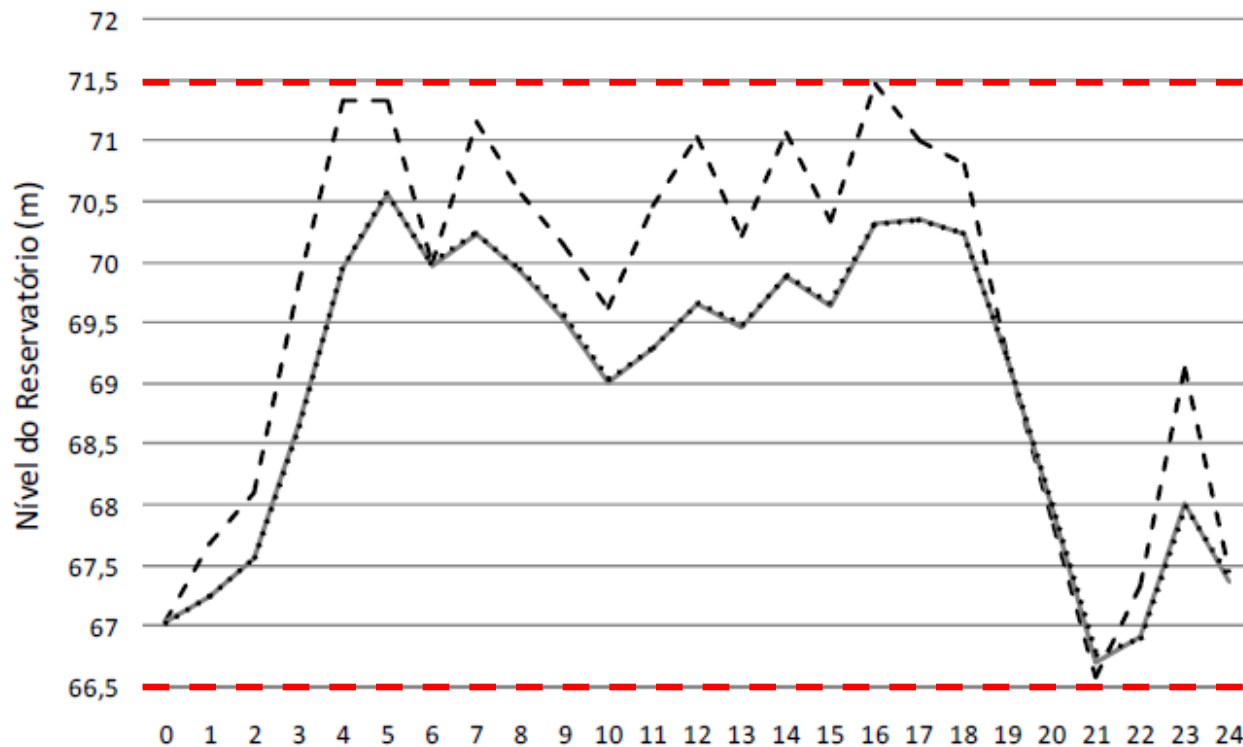


OTIMIZAÇÃO

RESTRIÇÕES

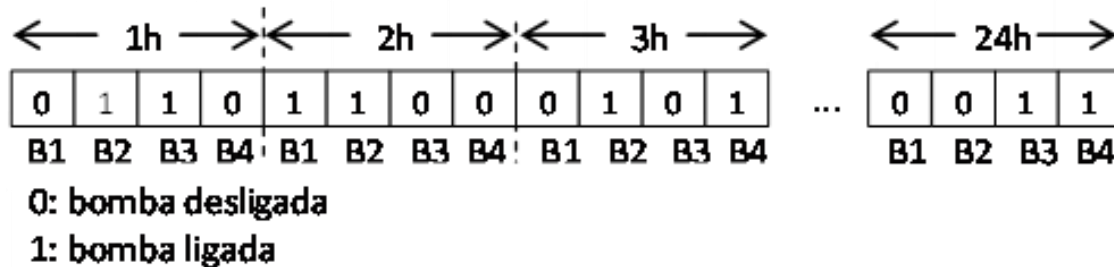
O nível dos reservatórios ao longo do dia deve ficar entre os limites máximo e mínimo

Exemplo para um sistema com 3 reservatórios o os limites máximo e mínimo de 71,5m e 66,5m



OTIMIZAÇÃO

✓ De que forma vamos encontrar o vetor X contendo um estratégia de custo energético reduzido?



**ALGORITMOS DE
OTIMIZAÇÃO!**



**ALGORITMO
GENÉTICO**

ALGORITMO GENÉTICO

Os Algoritmos Genéticos, criado por Holland (1975), desenvolvido e consolidado por Goldberg (1989), são métodos estocásticos de busca global e que realizam tal busca através da evolução de uma população de indivíduos.

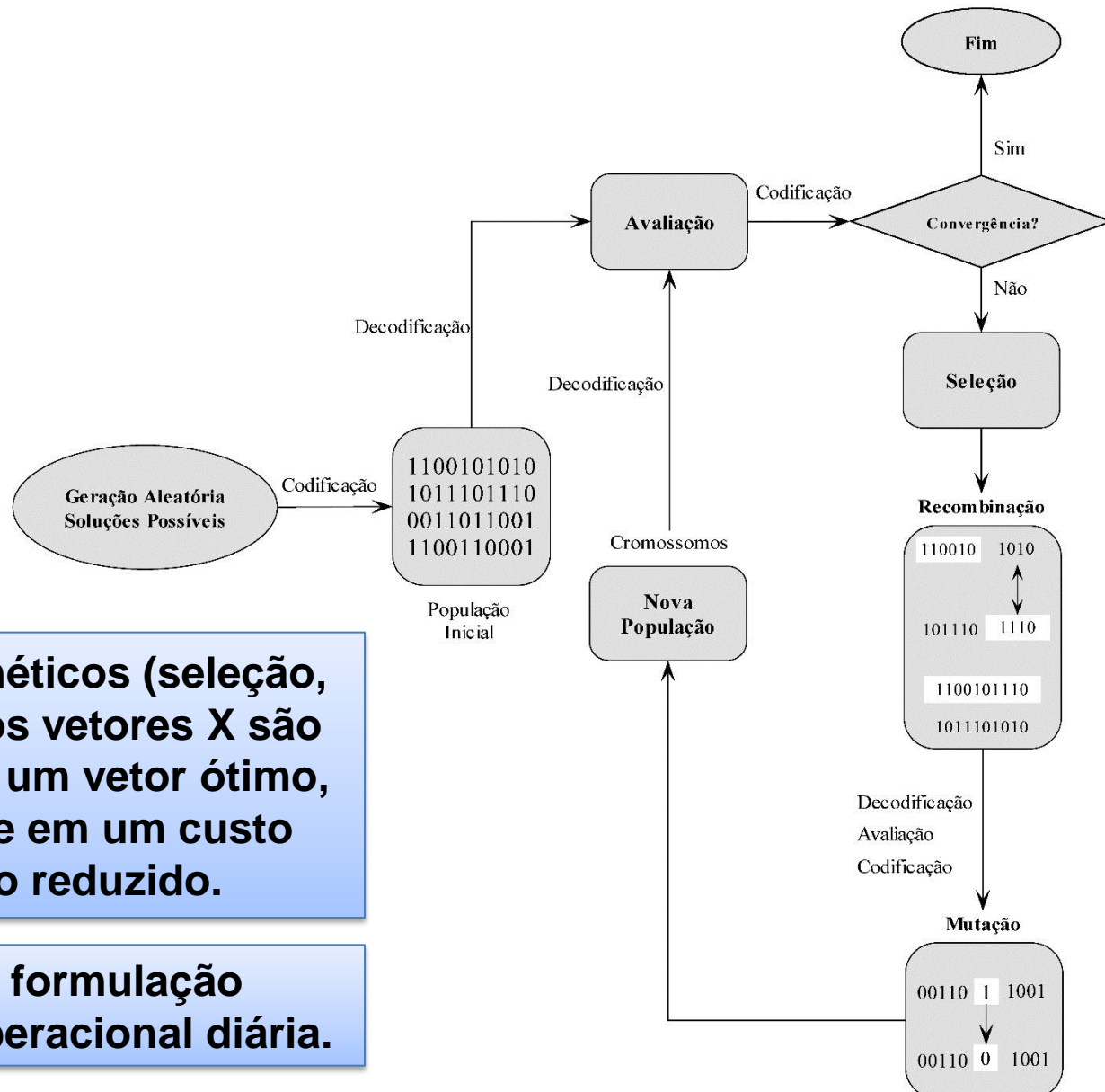
Definições:

- ✓ Indivíduo
- ✓ Gene
- ✓ População
- ✓ Geração
- ✓ Aptidão
- ✓ Operadores Genéticos

“ Quanto melhor um indivíduo se adaptar ao seu meio ambiente, maior será sua chance de sobreviver e gerar descendentes.” (DARWIN,1859)

ALGORITMO GENÉTICO

FLUXOGRAMA GERAL



A partir dos operadores genéticos (seleção, recombinação e mutação) os vetores X são alterados afim de encontrar um vetor ótimo, ou seja, aquele que resulte em um custo energético de operação reduzido.

LEMBRETE: Vetor X é a formulação matemática da estratégia operacional diária.

ALGORITMO GENÉTICO

GERAÇÃO DA POPULAÇÃO INICIAL

Indivíduo 1:	1	0	1	1	1	1	0	1
Indivíduo 2:	1	1	0	1	1	0	0	0
Indivíduo 3:	0	1	1	0	0	0	1	1
Indivíduo 4:	1	1	1	0	1	1	0	0
Indivíduo 5:	1	0	1	0	1	1	1	0
Indivíduo 6:	0	1	0	0	1	0	1	0

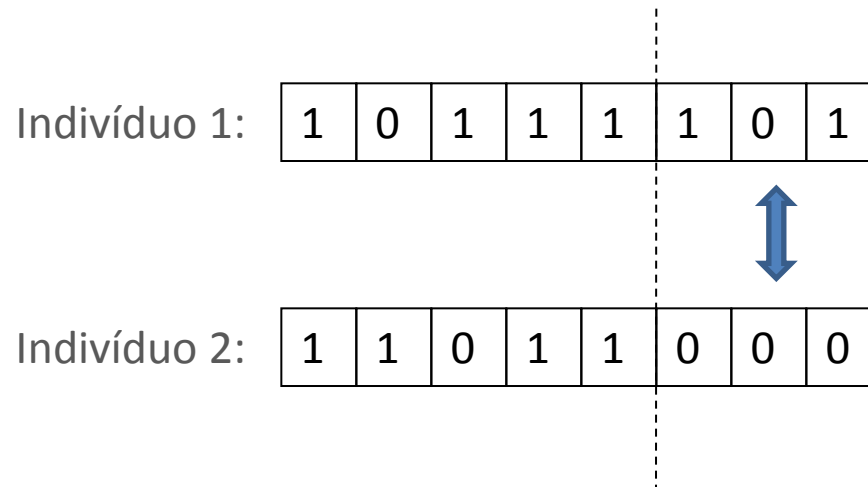
ALGORITMO GENÉTICO

SELEÇÃO (TORNEIO)

População	Representação Numérica	Aptidão	n números aleatórios	Nova População
10111101	189	0.733	1 e 3	01100011
11011000	216	0.471	2 e 6	01001010
01100011	99	0.937	4 e 1	10111101
11101100	236	0.243	5 e 6	10101110
10101110	174	0.845	2 e 4	11011000
01001010	74	0.788	5 e 2	10101110

ALGORITMO GENÉTICO

CRUZAMIENTO



ALGORITMO GENÉTICO

MUTAÇÃO

Indivíduo 1:

1	0	1	1	1	1	0	1
---	---	---	---	---	---	---	---

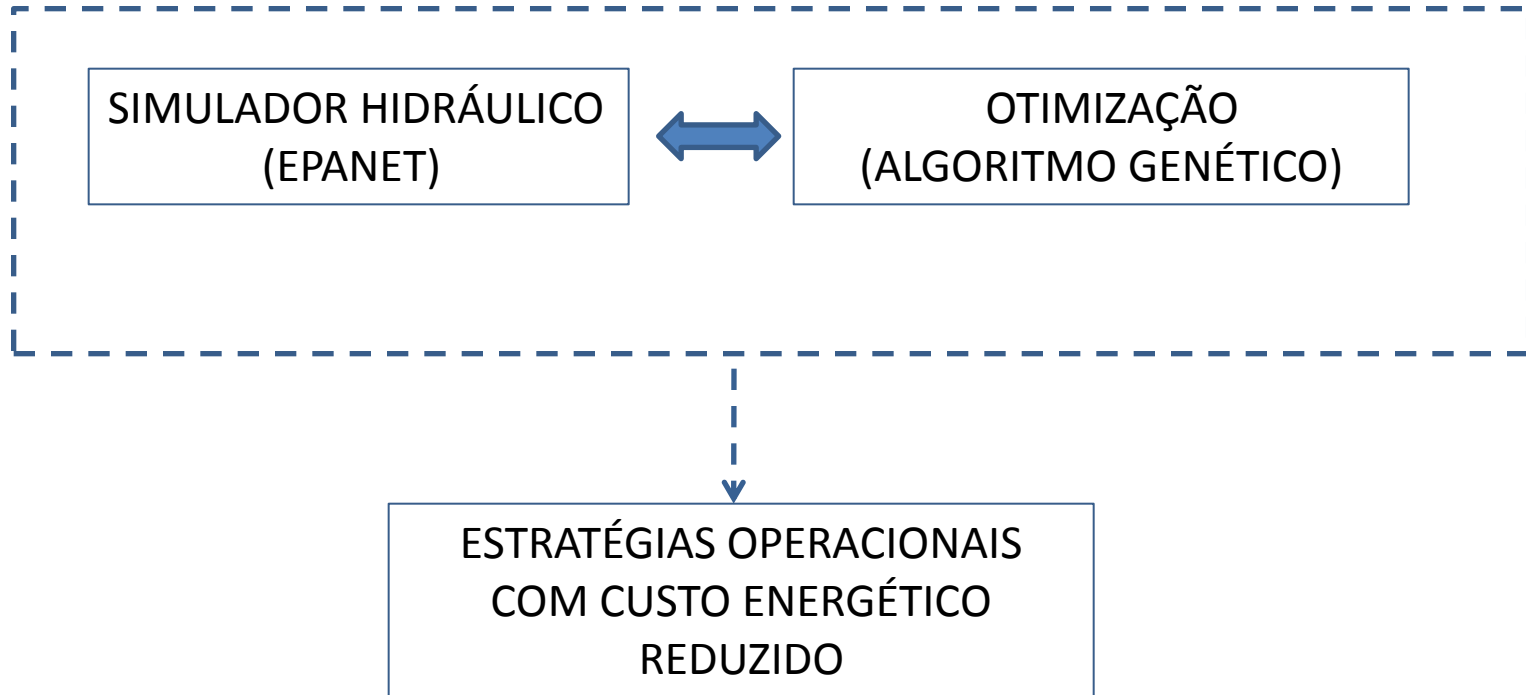


Indivíduo 1:

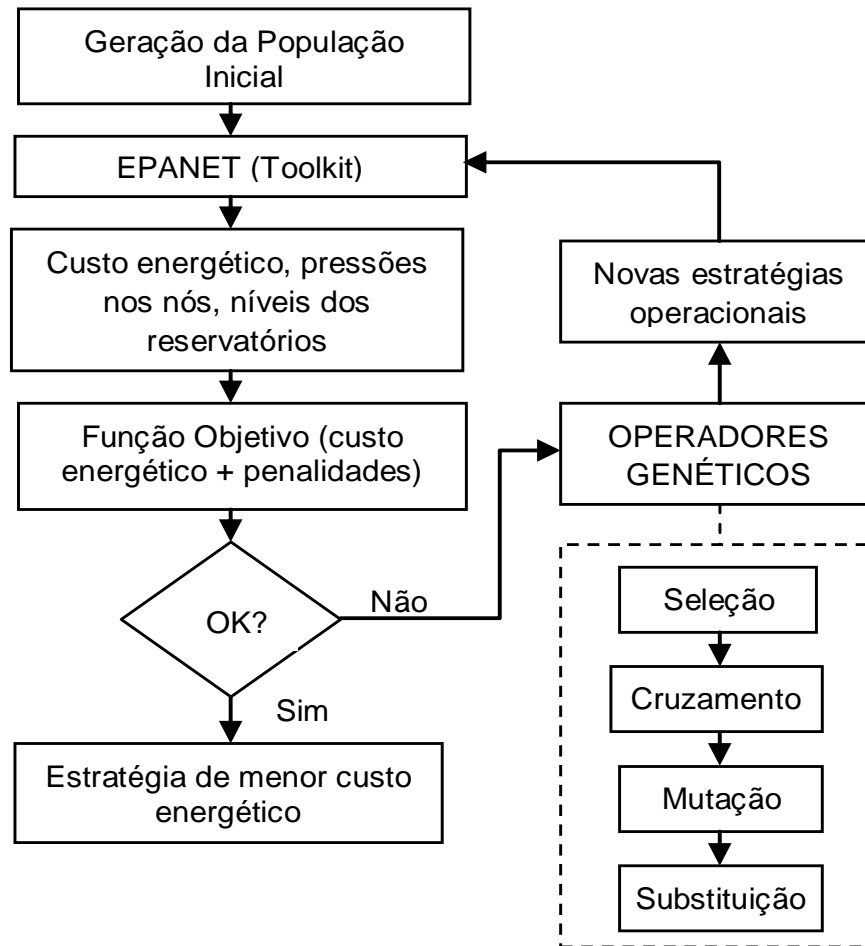
1	0	1	1	0	1	0	1
---	---	---	---	---	---	---	---

UFC 12

Estrutura computacional simplificada



Estrutura Computacional



UFC 12

INTERFACE PRINCIPAL

UFC12 - OTIMIZAÇÃO DA OPERAÇÃO DE ESTAÇÕES ELEVATÓRIAS DE ÁGUA

DADOS DA REDE

ABRIR ARQUIVO


Nome do arquivo:

Quantidade de bombas;

Quantidade de Reservatórios

Passo de tempo de cálculo hidráulico (min):

Quantidade max de acionamentos



NÍVEL FINAL DOS RESERVATÓRIOS

Nível final maior que o inicial

Nível final acima em X% da altura útil

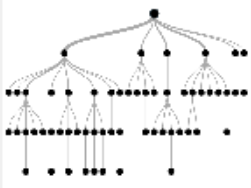
Nível final abaixo em X% da altura útil

Nível final livre


OTIMIZAÇÃO

[Selecione o algoritmo](#)


Branch and Bound



Algoritmo Genético



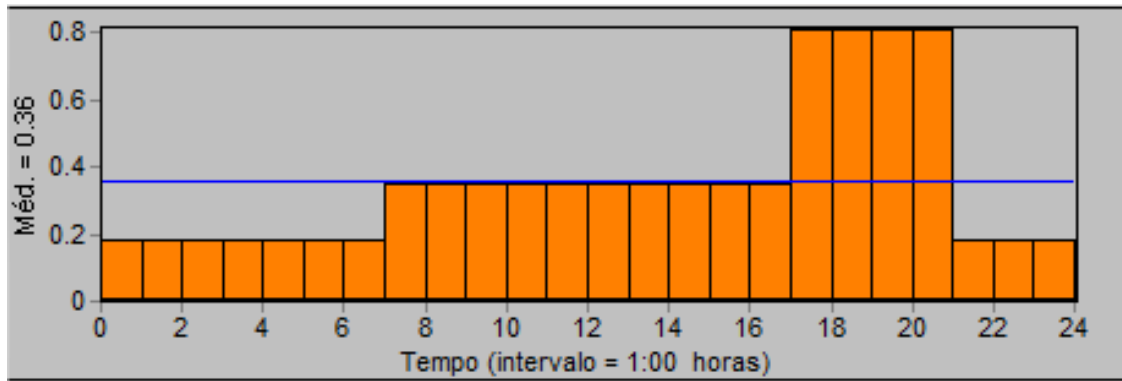
Particle Swarm Optimization



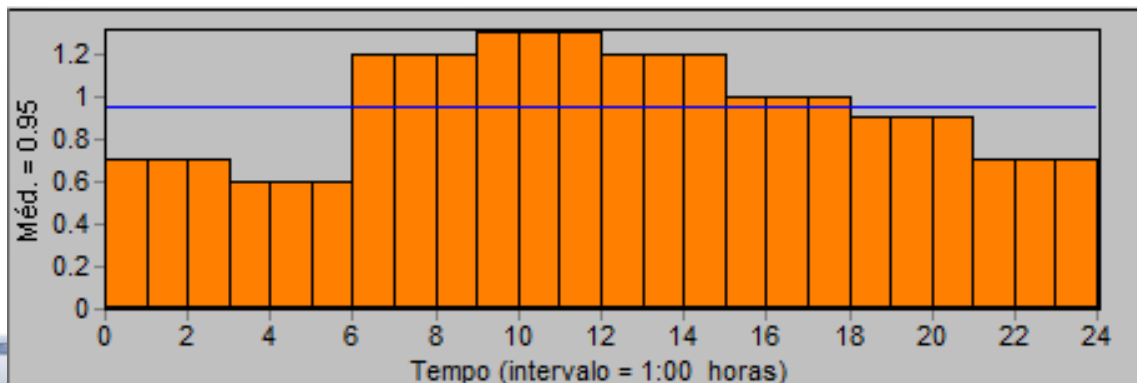
APLICAÇÃO 1 – ESTUDO DE CASO HIPOTÉTICO

- ✓ Estação elevatória com 3 bombas
- ✓ Quantidade máxima de acionamento por bomba: 3
- ✓ Três reservatórios (nível max: 71.53 e mim: 66.53m)

Tarifa energética

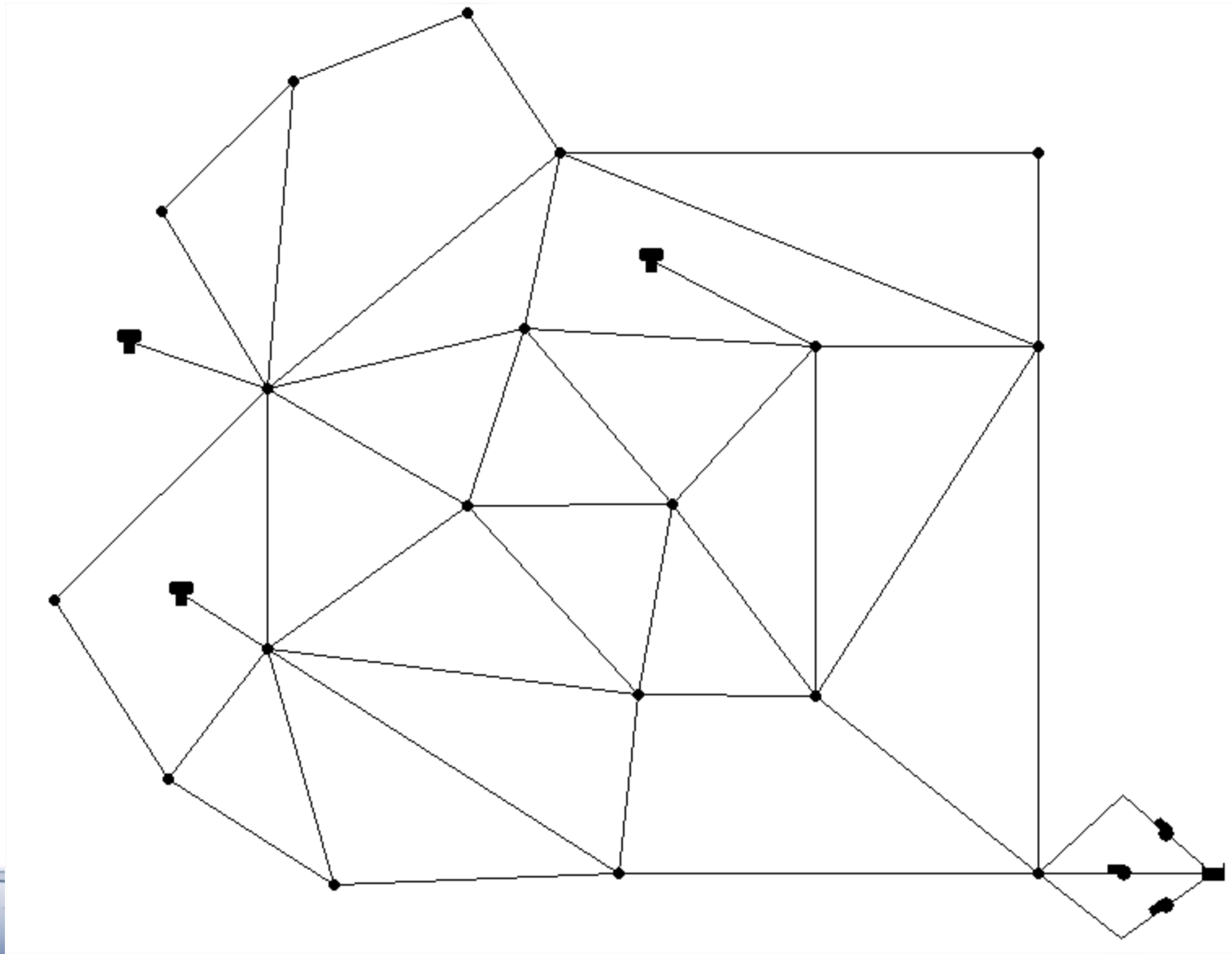


Demanda



APLICAÇÃO 1 – ESTUDO DE CASO HIPOTÉTICO

Layout

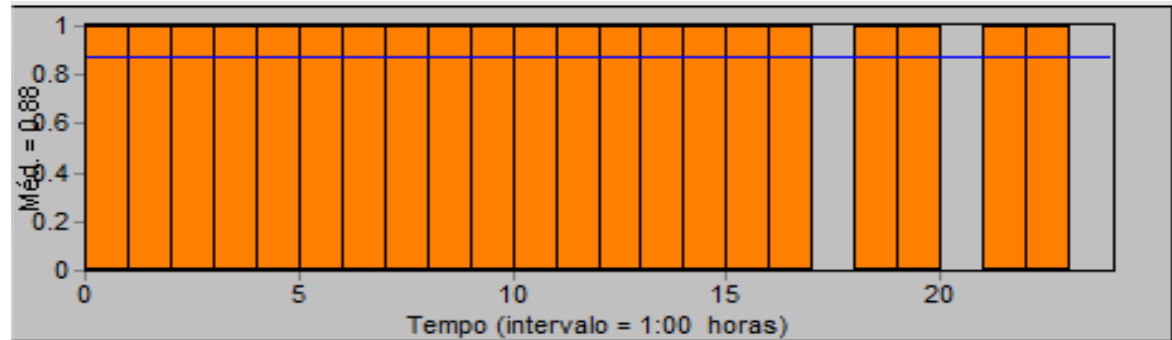


APLICAÇÃO 1 – ESTUDO DE CASO HIPOTÉTICO

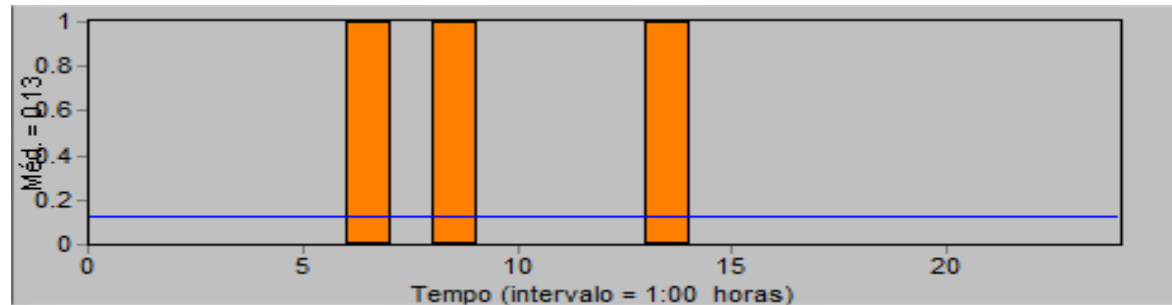
Solução encontrada pelo UFC12

✓ Custo energético de um dia de operação: 4.012 \$

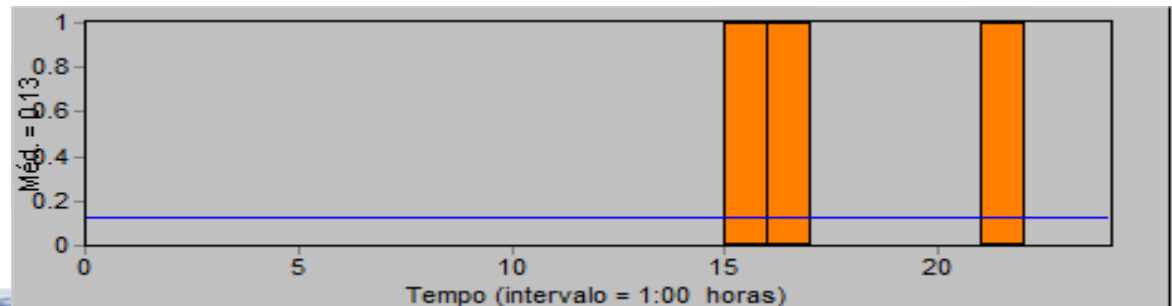
Estratégia Bomba 1



Estratégia Bomba 2



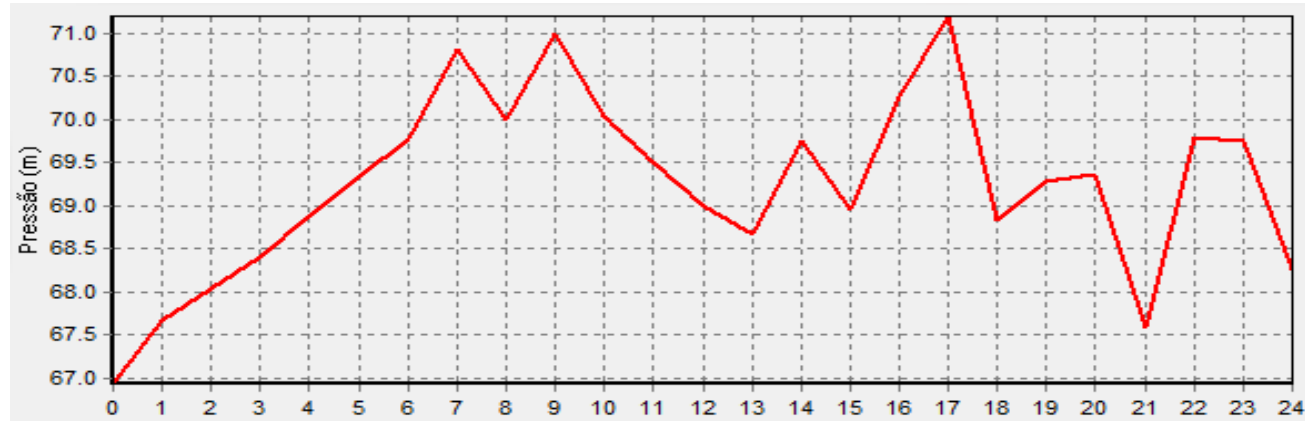
Estratégia Bomba 3



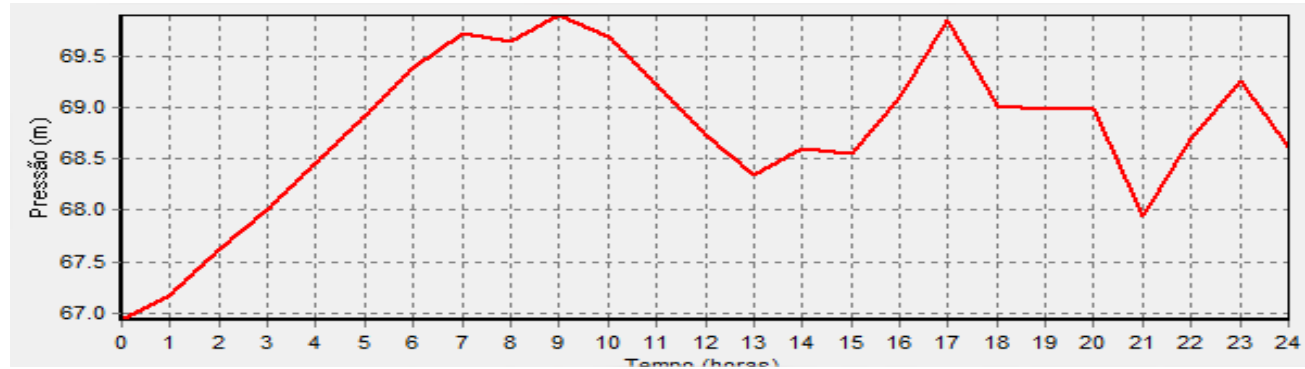
APLICAÇÃO 1 – ESTUDO DE CASO HIPOTÉTICO

Variação dos níveis dos reservatórios

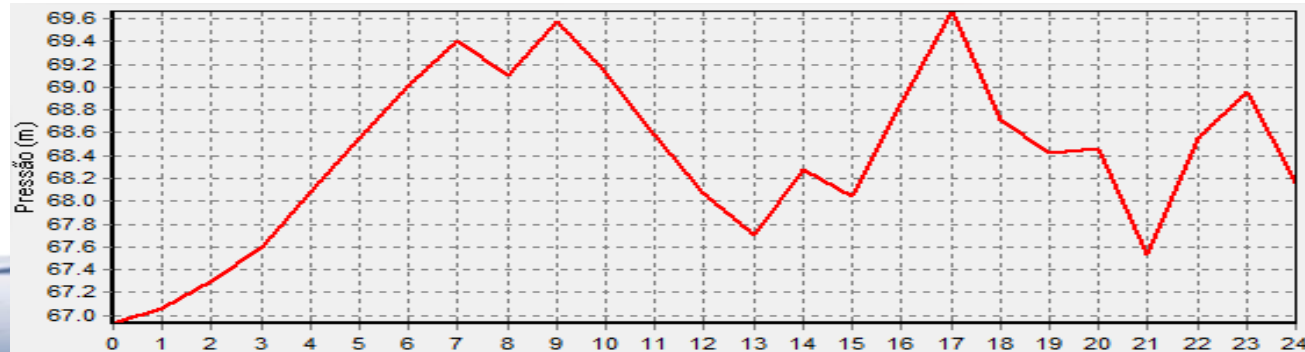
Reservatório 1



Reservatório 2

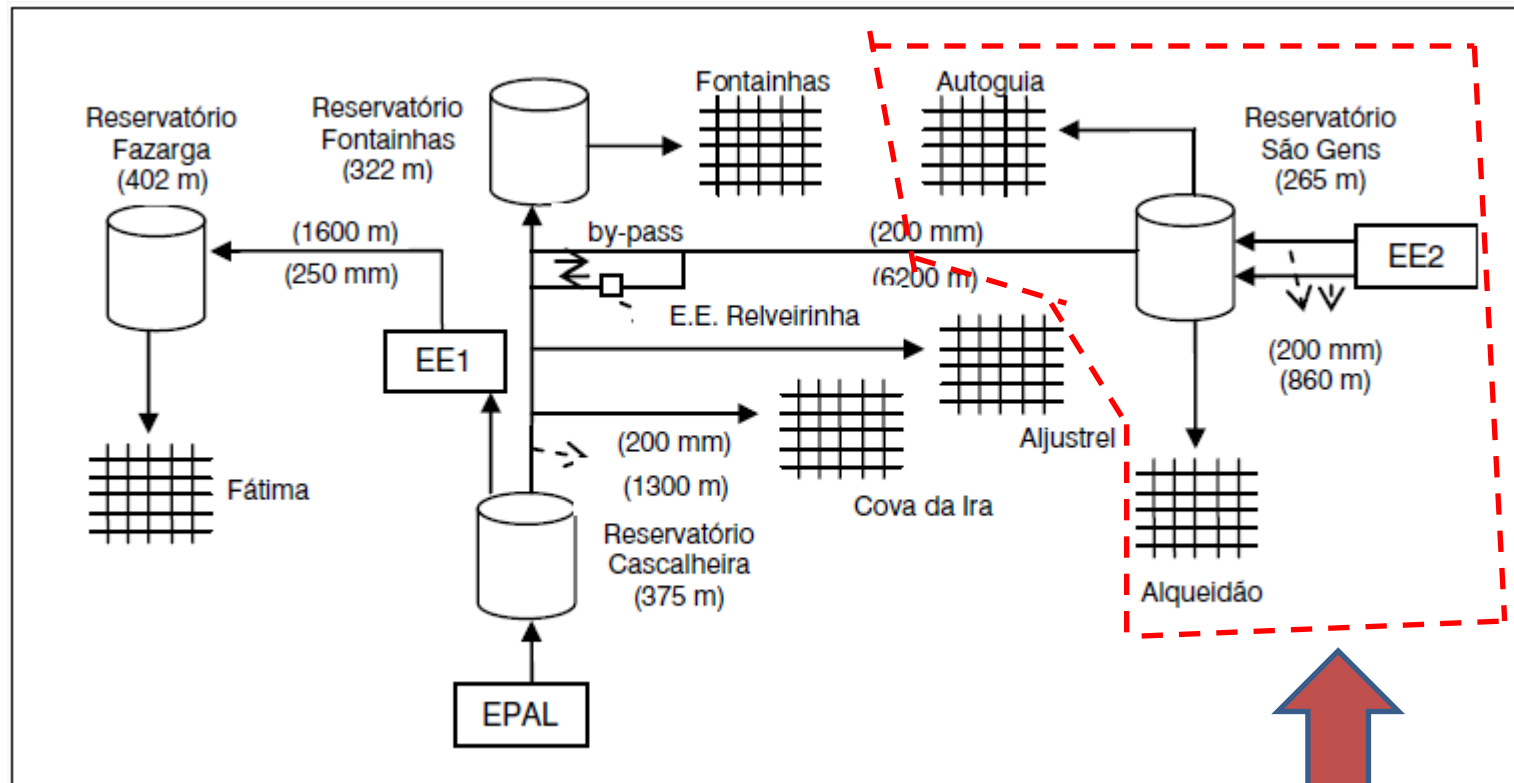


Reservatório 3



APLICAÇÃO 2 – Sistema Adutor de Ourém (Portugal)

Esquemático do sistema adutor de Ourém

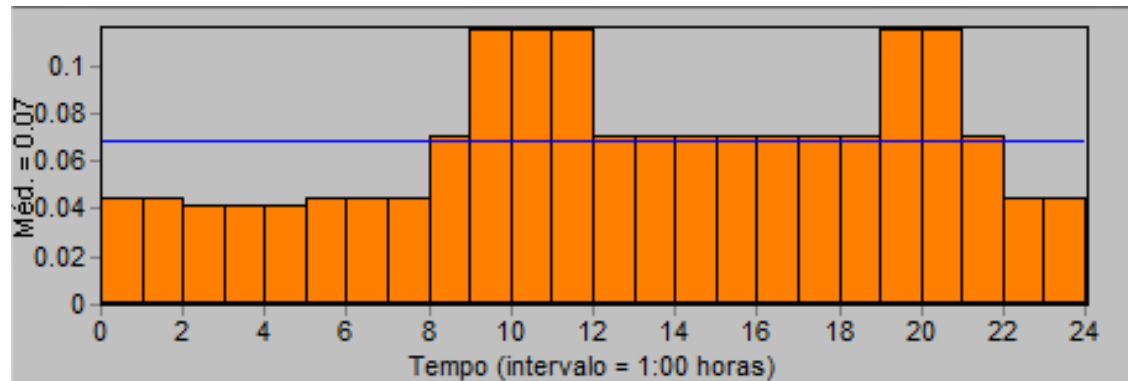


**SISTEMA ELEVATÓRIO
ANALISADO**

APLICAÇÃO 2 – Sistema Adutor de Ourém (Portugal)

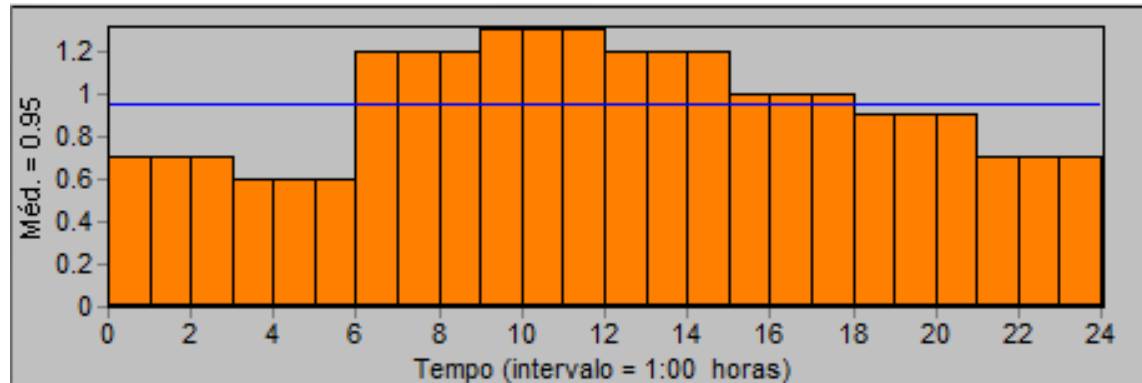
- ✓ Estação elevatória com 4 bombas
- ✓ Quantidade máxima de acionamento por bomba: 4
- ✓ 1 reservatório (nível max: 3.8 e mim: 0.3 m)

Tarifa energética

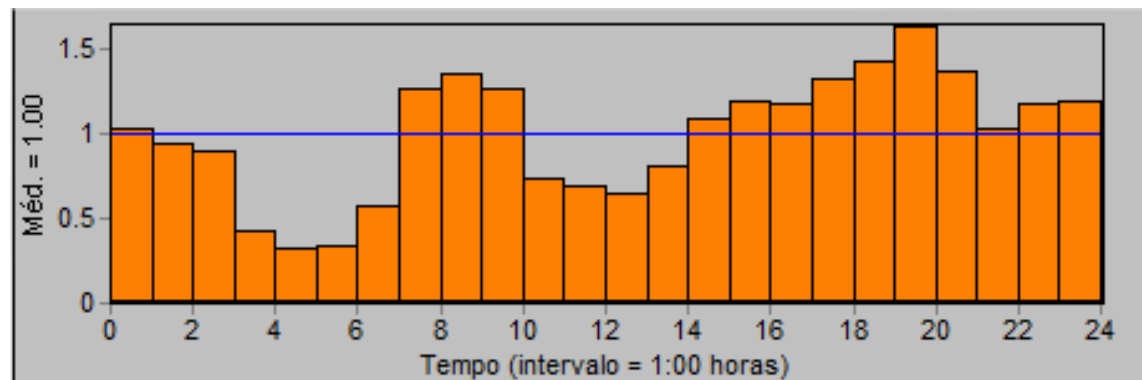


APLICAÇÃO 2 – Sistema Adutor de Ourém (Portugal)

Demanda da rede de distribuição da localidade de Alqueidão

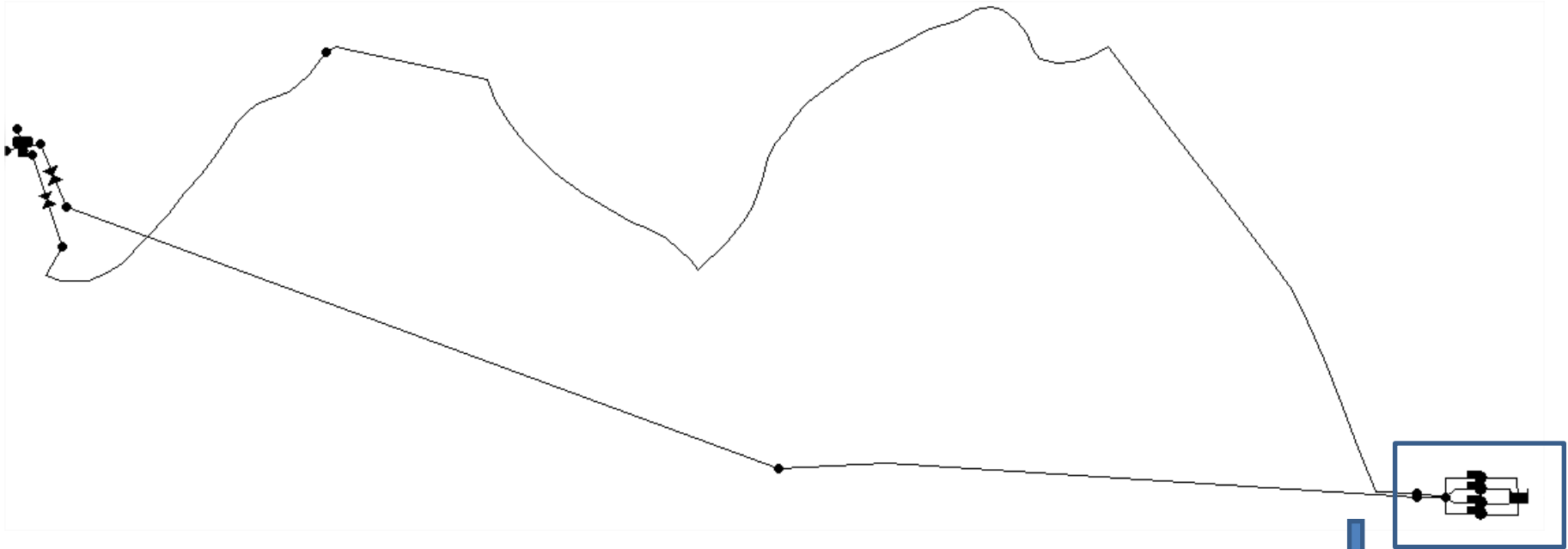


Demanda da rede de distribuição da localidade de Atougua

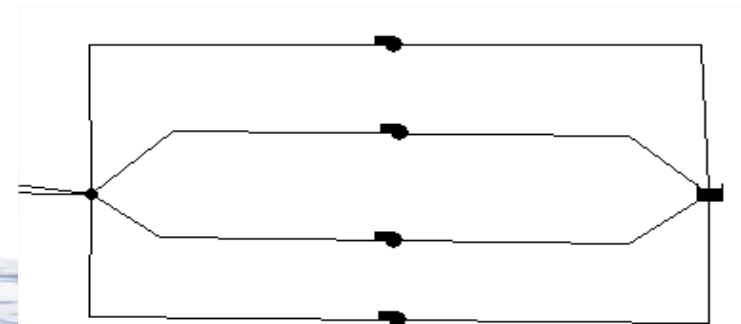


APLICAÇÃO 2 – Sistema Adutor de Ourém (Portugal)

Layout do sistema no EPANET

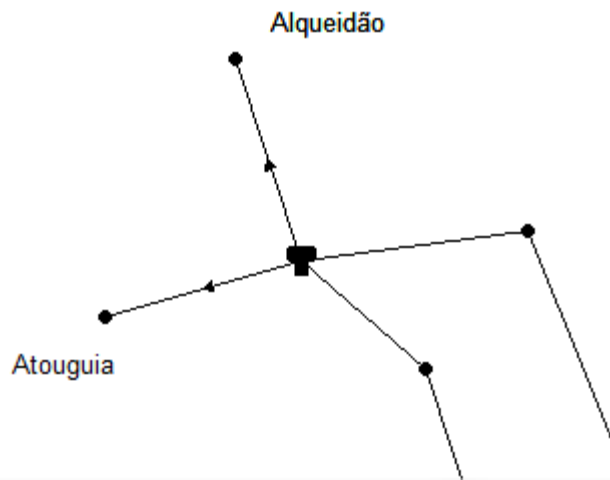
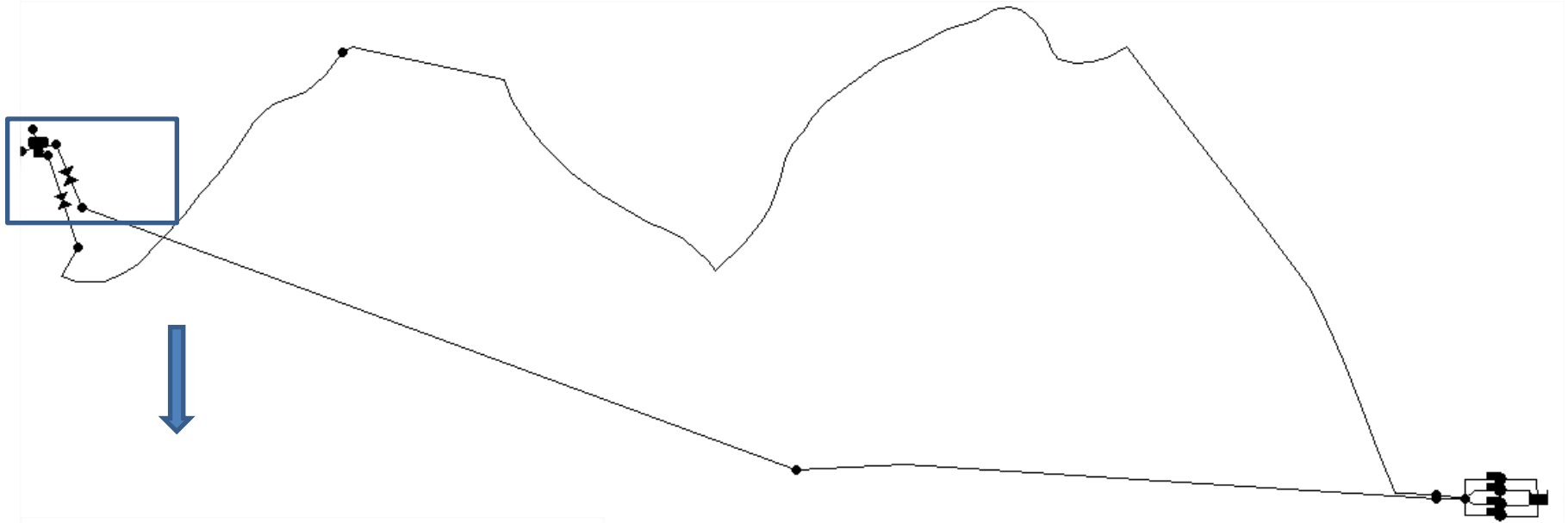


Estação Elevatória
4 bombas



APLICAÇÃO 2 – Sistema Adutor de Ourém (Portugal)

Layout do sistema no EPANET



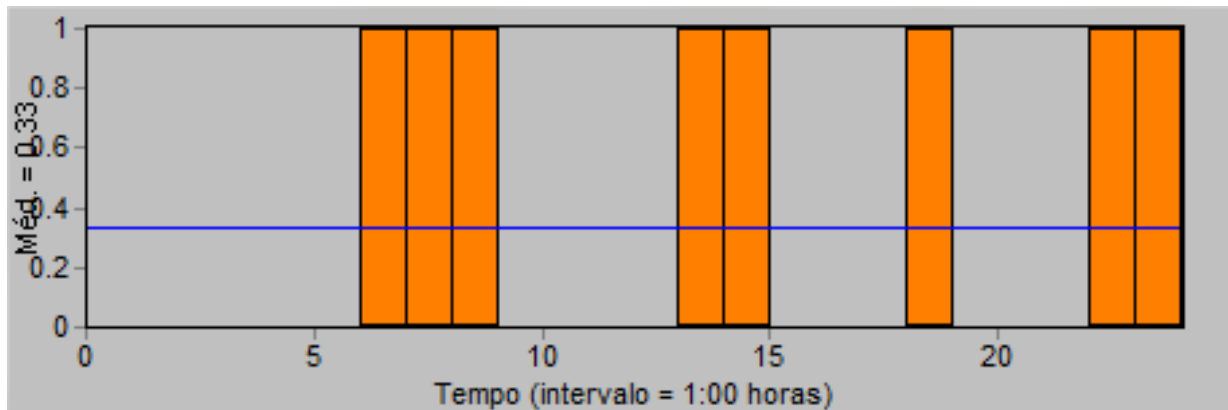
Reservatório
**Abastecendo dois pontos
de consumo (Alqueidão e
Atougua)**

APLICAÇÃO 2 – Sistema Adutor de Ourém (Portugal)

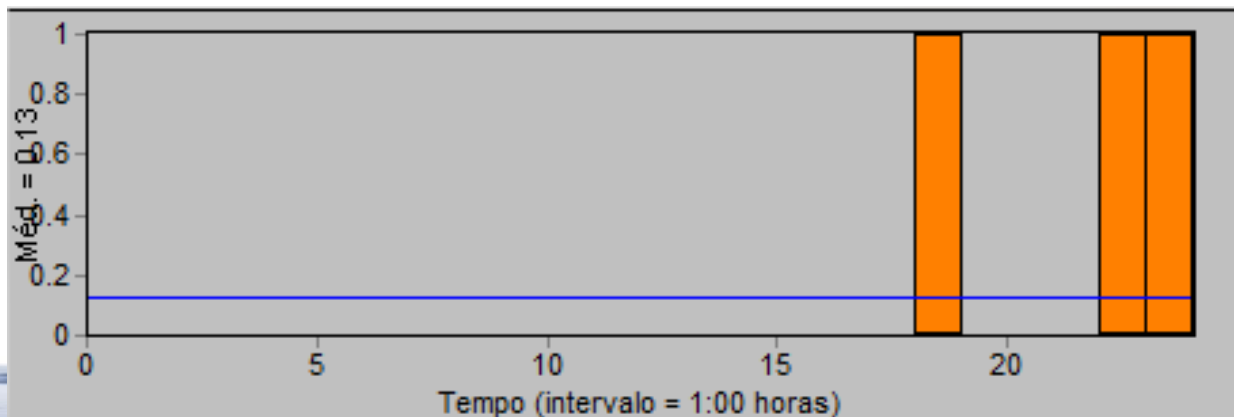
Solução encontrada pelo UFC12

✓ Custo energético de um dia de operação: 22.24 euros (2010)

Estratégia Bomba 1



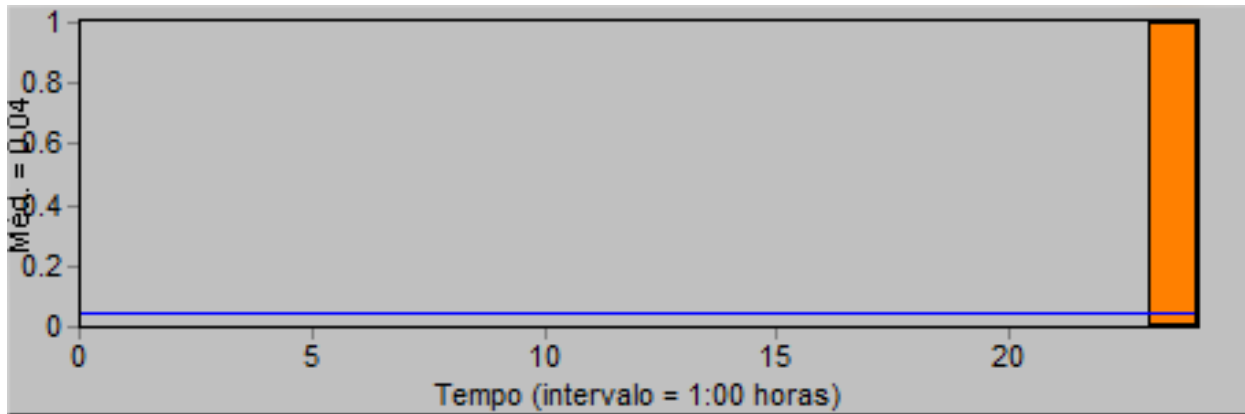
Estratégia Bomba 2



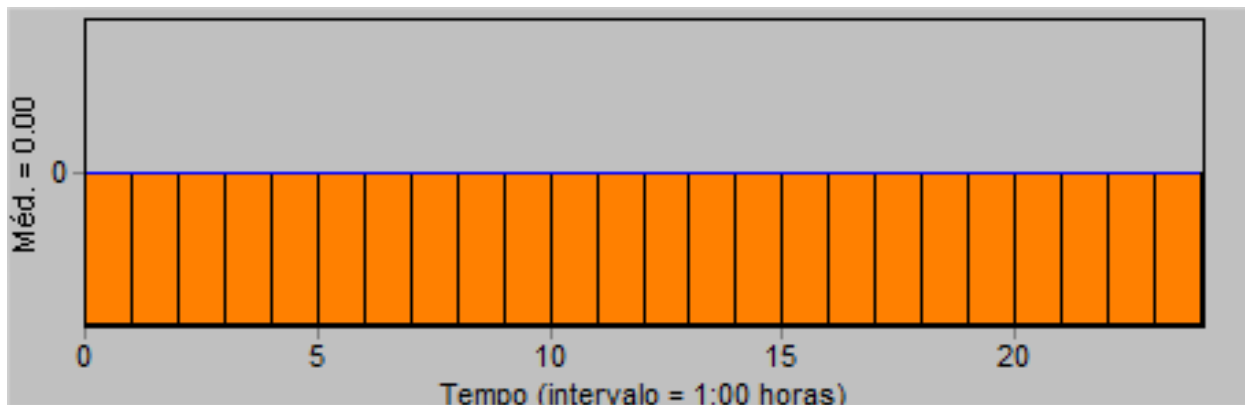
APLICAÇÃO 2 – Sistema Adutor de Ourém (Portugal)

Solução encontrada pelo UFC12

Estratégia Bomba 3

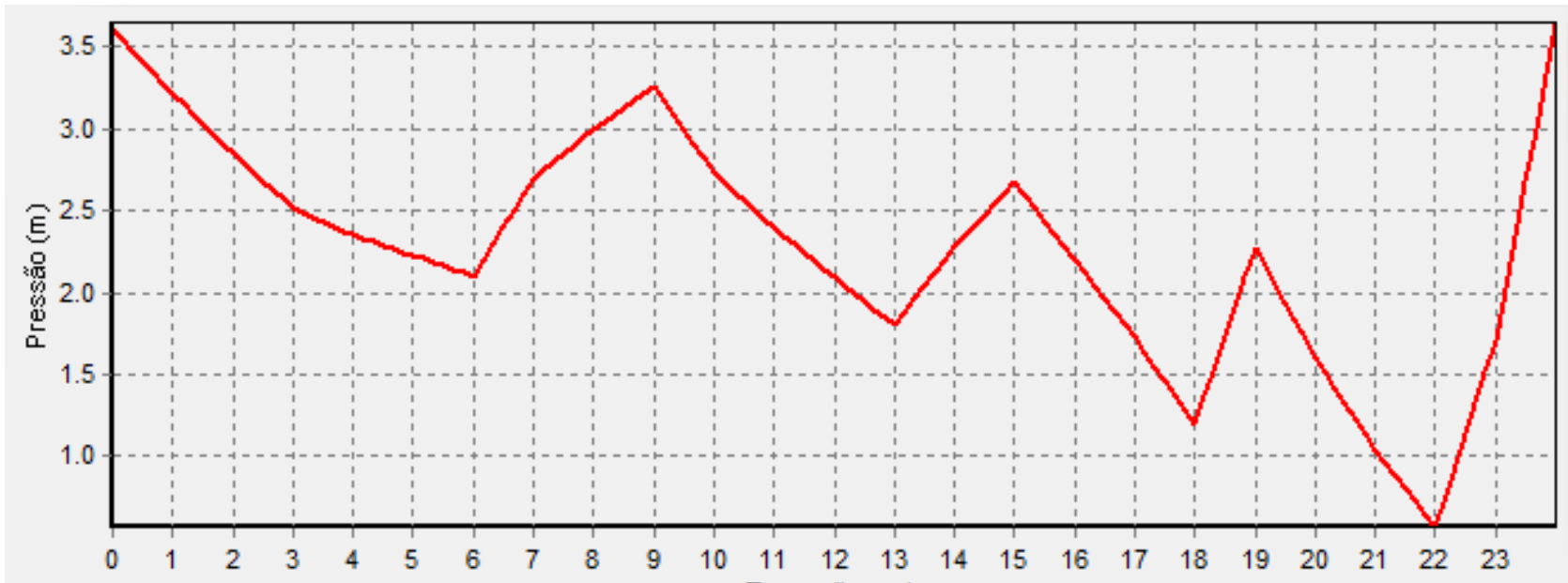


Estratégia Bomba 4 (bomba desligada o dia inteiro)



APLICAÇÃO 2 – Sistema Adutor de Ourém (Portugal)

Nível do reservatório



Moisés, em seu primeiro (e último dia) como salva-vidas



MORAL DA HISTÓRIA: MAIS IMPORTANTE DO QUE AS HABILIDADES INDIVIDUAIS É COLOCAR A PESSOA CERTA NO LUGAR CERTO