

UTILIZAÇÃO DA METAHEURÍSTICA DO RECOZIMENTO SIMULADO NA OTIMIZAÇÃO DO PLANEJAMENTO DE SISTEMAS REGIONAIS DE TRATAMENTO DE EFLUENTES E SUA EXPANSÃO DA CAPACIDADE

Enéas Souza Machado

Workshop de Monitoramento da Qualidade da
Água em Bacias Urbanas

ABRH – Regional PR
outubro de 2009

SEQÜÊNCIA DA APRESENTAÇÃO

- Introdução
- Objetivos do Modelo
- Visão geral dos modelos de otimização
- Funções de Custos
- Modelo Regional Dinâmico (otimização espaço-temporal)
- Aplicação
- Conclusões e Recomendações

INTRODUÇÃO (I/1)

- A lei 9.433/97
- Planos de Bacia
- A necessidade de infraestrutura de saneamento
- Elevados custos
- Necessidade de ferramentas que possam apoiar a tomada de decisões:

OBJETIVO DO MODELO (II/1)

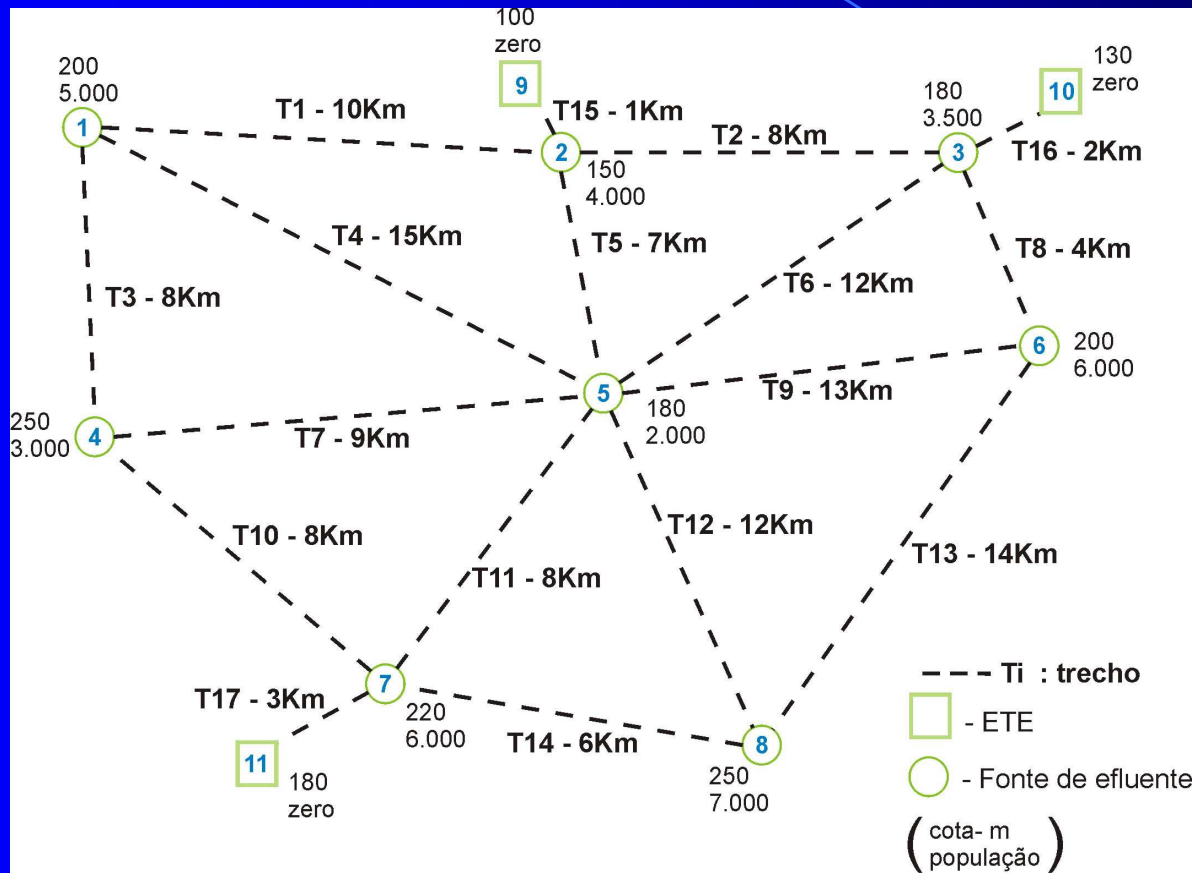
“ otimização da configuração de um sistema regional de saneamento (interceptores + EEs + ETEs (no tempo e no espaço) minimizando custos e maximizando a qualidade do corpo receptor”

Otimização espacial (Modelo Estático) +

Otimização temporal (Modelo Dinâmico)

“ através da metaheurística do Recozimento Simulado”

OBJETIVO DO MODELO (II/2)



MODELOS DE OTIMIZAÇÃO (III/1)

- Modelos Clássicos: II Guerra Mundial
 - Programação Linear
 - Programação Não Linear
 - Programação Inteira
 - Programação Dinâmica

MODELOS DE OTIMIZAÇÃO (III/2)

Modelos baseados em metaheurísticas:

- Heurísticas: “métodos expeditos para se obter a solução aproximada de um dado problema”
- Metaheurísticas: “são heurísticas aplicadas a problemas computacionais; neste caso específico, aplicadas a problemas de otimização combinatória”

MODELOS DE OTIMIZAÇÃO (III/3)

Algumas metaheurísticas:

- Algoritmos Genéticos: evolução dos seres vivos
- Busca Tabu: inteligência artificial
- Colônia de Formigas: caminho ótimo
- Recozimento Simulado (simulated annealing)

RECOZIMENTO SIMULADO (IV/1)

processo físico (i)

- Baseado na analogia do recozimento de cristais para estados de baixa energia.
- O processo físico:
 - A temperatura é inicialmente aumentada para permitir a mobilidade das moléculas;
 - O sistema é lentamente resfriado, quando então as moléculas se arranjam aleatoriamente até alcançar um estado de baixa energia;
 - É obtida uma estrutura cristalina no estado de energia mínima

RECOZIMENTO SIMULADO (IV/2)

processo físico (ii)
(Metropolis et al., 1953)

- Gera-se uma seqüência de estados
- Se a energia do estado 1 atual é E_1
- Aplica-se um mecanismo de perturbação para gerar um estado 2, cuja energia seja E_2
- Se $E_2 < E_1$, \rightarrow 2 será o novo estado
- Mas mesmo que $E_2 > E_1$, o estado 2 poderá ser aceito como novo estado com uma probabilidade p dada por:
$$p = \exp[(E_1 - E_2)/k_\beta * t]$$
onde:
 k_β : constante de Boltzman
 t : temperatura
- Se $p > u \rightarrow$ 2 será aceito como novo estado
- Se $p < u \rightarrow$ 1 será mantido como estado atual com $u \sim U[0,1]$

RECOZIMENTO SIMULADO (IV/3)

Física → Otimização Combinatória

Nos anos 80 aplicou-se o Recozimento ao problema de otimização combinatória do Caixeiro Viajante, onde a variação de energia é agora a variação do valor da FOB. Os parâmetros são:

(i) **temperatura inicial (t_0)** : parâmetro de escala, dado por:

$$t_0 = \Delta / \ln p \quad \text{ou:}$$
$$t_0^* = PE^* \cdot FOB_{ini} \cdot t_0$$

(ii) taxa de diminuição da temperatura: **fator de arrefecimento (f)**

(iii) **número de decréscimos de temperatura (n_2)**

(iv) **Número de iterações na mesma temperatura (n_1)**

– Desdobrado em dois parâmetros:

- ***simmax*** : nº máximo de simulações efetuadas a uma mesma temp;
- ***sucmax*** : limite máximo de sucessos estipulado p/ uma mesma temperatura

FUNÇÕES DE CUSTOS (V/1)

Tabela 5.1- Custos de Interceptores

Tipo de Material	Custo (R\$/m)
PVC JE	
D	115,49
DN 200	273,03
DN 250	267,91
DN 300	379,99
DN 350	391,49
DN 400	402,99
Concreto Armado JE	
DN 500	387,93
DN 600	442,59
DN 700	503,30
DN 800	623,57
DN 900	809,08
DN 1000	922,32

FUNÇÕES DE CUSTOS (V/2)

(todas as equações para EEs e ETEs são funções de potência; os dados são de obras do PROSAM E PARANASAN)

(i) Custos de Estações Elevatórias (construção)

$$C = 149.089,08P^{1,502}$$

- com $r^2=84,34\%$ e onde:
- C : custo em reais
- P : potência

(ii) Custos de O&M para EEs: não disponíveis

FUNÇÕES DE CUSTOS (V/3)

Tabela 5.2 - Equações de custo para ETEs

Tipo de ETE	Parâmetros	Coefficiente de Determinação (%)
UASB	$a = 22.429.142,68$ $b = 1,277$	98,37
UASB + Lagoa	$a = 40.825.000,53$ $b = 0,777$	94,36
UASB + Flotação	$a = 137.815.149,71$ $b = 1,504$	72,73

(ii) Custos de O&M para ETEs:

$$C = 3.251.563,95Q^{0,572}$$

SOLUÇÃO DO MODELO HIDRÁULICO (MOD_HIDR_01 (VI/1))

Cálculos Preliminares

- Parâmetro $\Delta h/L$ p/ obtenção das perdas de carga;
- Vazões máximas por gravidade por diâmetro e trecho.

Solução Inicial (busca aleatória)

- Sorteie um nó e suas vazões e continue o caminhamento em uma ordem pré-estabelecida de nós (ocn_k);
- A solução inicial será aquela que obedeça à eq. da continuidade em todos os nós e as restrições de vazões máximas nos nós com ETEs.

SOLUÇÃO DO MODELO HIDRÁULICO (MOD_HIDR_01 (VI/2))

Soluções Candidatas (por recozimento)

$$\text{A FOB é: } \text{MIN}(S) = \sum Q_k H_k$$

- Inicie o processo de recozimento
- Sorteia-se um dos nós i
- A partir deste nó, na ordem ocn_k , calculam-se as vazões nos trechos, obedecendo continuidade e vazões máximas nas ETEs;
- Comparam-se FOBs ($\sum Q_k H_k$);
- Teste Metropolis;
- Prossiga no recozimento.

O MODELO DINÂMICO (IX/1)

“localizar, dimensionar e **escalonar no tempo** um Sistema Regional de ETEs”

$$\text{Min} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N C_{ij}(Q_{ij}, L_{ij}, x_{ij}) + \sum_{t=1}^T \sum_{k=n+1}^N C_{ETE_k}(QT_k, y_k) + \sum_{t=1}^T \sum_{l=m+1}^N C_{EE_l}(QEE_l E_i, E_j, z_l)$$

Programação Inteira Mista Não Linear

além das outras restrições, tem-se as condições de continuidade temporal:

$$Q_{ijt} \geq Q_{ijt-1}$$

$$QETE_{kt} \geq QETE_{kt-1}$$

$$QEE_{lt} \geq QEE_{lt-1}$$

MODELO DINÂMICO DE OTIMIZAÇÃO (IX/2)

sujeito às seguintes restrições:

- equação da continuidade para os nós com fontes de efluentes, ETEs e EEs;
- todo o efluente produzido seja tratado
- restrições hidráulicas (eq. Universal de perda de carga e eq. de Darcy-Weisbach)
- restrição de vazão máxima nas ETEs
- restrição $\{0,1\}$ para coletores, EEs e ETEs
- restrições de não negatividade

O MODELO DINÂMICO (IX/3) algoritmo (i)

(i) iniciar o processo pela Etapa 2 (vazões $QE_{i1} + QE_{i2}$)
(annealing externo);

Para a solução inicial da Etapa 2: admite-se tubulação dupla e diâmetros máximos;

(ii) testar a viabilidade hidráulica da solução inicial da Etapa 2 (otimização por *annealing* onde se minimiza o bombeamento)

(iii) Entra na Etapa 1, cuja solução inicial será a mesma da Etapa 2

Iniciar *annealing* interno à Etapa 1: as soluções candidatas são obtidas através de dois sorteios:

O MODELO DINÂMICO (IX/4)

algoritmo (ii)

Sortear nos trechos:

- Onde havia 2 tubulações: tirar uma ou ambas
- Onde havia 1 tubulação: tirar uma ou nenhuma

Sortear vazões para os nós:

- Vazão QE_{j1} ou
- Vazão $QE_{j1} + QE_{j2}$

(iv) Testar viabilidade hidráulica e seguir com o processo de annealing interno da Etapa 1

Ao fim ter-se-á uma primeira rede ótima para a Etapa 1 e seu custo $FOB_{\text{Etapa 1}}$. Verificando quais obras da Etapa 2 não foram contempladas e utilizando custo descontado, tem-se $FOB_{\text{Etapa 2}}$

Custo Inicial Total = $FOB_{\text{Etapa 1}} + FOB_{\text{Etapa 2}}$

O MODELO DINÂMICO (IX/5)

algoritmo (iii)

(v) retoma o annealing externo da Etapa 2, cujas soluções candidatas também serão obtidas através de dois sorteios:

Sortear nos trechos:

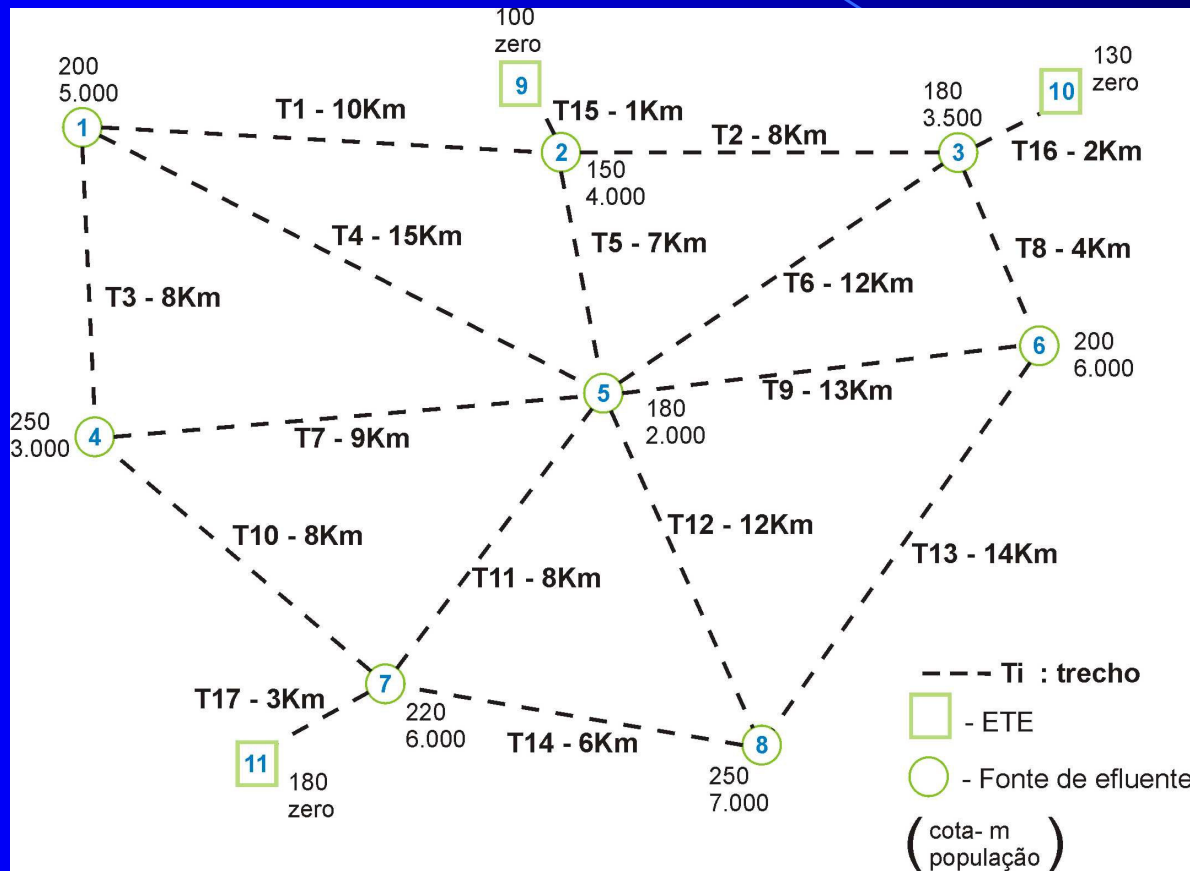
- Onde havia 2 tubulações: tirar uma ou ambas
- Onde havia 1 tubulação: tirar uma ou nenhuma

Sortear nos trechos:

- Oscilação do diâmetro de um (ou mais trechos): um diâmetro comercial acima ou abaixo

(vi) Seguir com o processo externo de *annealing* até a obtenção da solução pseudo-ótima para todo o horizonte de planejamento.

APLICAÇÃO MODELO DINÂMICO (X/1)



Rede para os exemplos do Modelo Regional Dinâmico
(período de planejamento = 2 etapas)

DADOS MODELO DINÂMICO (X/2)

NÚMERO DE NÓS

11

ÚLTIMO NÓ COM AFLUÊNCIA

8

NÓ	COTA	POP1	POP2	Q.ETE	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11
01	200	5000	10000	0 0	0	1	0	3	4	0	0	0	0	0	0
02	150	4000	8000	0 0	1	0	2	0	5	0	0	0	15	0	0
03	180	3500	7000	0 0	0	2	0	0	6	8	0	0	0	16	0
04	250	3000	6000	0 0	3	0	0	0	7	0	10	0	0	0	0
05	180	2000	4000	0 0	4	5	6	7	0	9	11	12	0	0	0
06	200	10000	20000	0 0	0	0	8	0	9	0	0	13	0	0	0
07	220	6000	12000	0 0	0	0	0	10	11	0	0	14	0	0	17
08	250	7000	14000	0 0	0	0	0	0	12	13	14	0	0	0	0
09	100	0	0	0 1.0	0	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	130	0	0	0 1.5	0	0	16	0	0	0	0	0	0	0	0
11	180	0	0	0 3.0	0	0	0	0	0	0	17	0	0	0	0

TRECHO DISTÂNCIA DIÂMETROS

01	10000	- 1- 1
02	8000	- 1- 1
03	8000	- 1- 1

DADOS MODELO DINÂMICO (X/2)

Análise de rede

Rede | Diâmetros | Parâmetros | Resultado

Custos

Vazão percapita (l/hab/dia)	<input type="text" value="150"/>	N. sorteio	<input type="text" value="1"/>
Construção da ETE a =	<input type="text" value="40825000.53"/>	b =	<input type="text" value="0.777"/>
O&M variável da ETE c =	<input type="text" value="3251563.95"/>	d =	<input type="text" value="0.572"/>
O&M fixo da ETE e =	<input type="text" value="0"/>	f =	<input type="text" value="0"/>
Construção da EE g =	<input type="text" value="149089.08"/>	h =	<input type="text" value="1.502"/>
		r	<input type="text" value="0.10"/>
		t	<input type="text" value="11"/>

Annealing

	Modelo Hidráulico	Modelo Estático/Dinâmico	
Percentagem de energia (PE)	<input type="text" value="0.01"/>	<input type="text" value="0.01"/>	
Probabilidade de aceitação (p)	<input type="text" value="0.5"/>	<input type="text" value="0.5"/>	
Fator de redução da temperatura (f)	<input type="text" value="0.9"/>	<input type="text" value="0.9"/>	
Número de decrescimos da temperatura (n2)	<input type="text" value="10"/>	<input type="text" value="2"/>	(*NT)
Máx. simulações na mesma temp. (simmax)	<input type="text" value="200"/>	<input type="text" value="200"/>	(*NT)
Máx. sucessos na mesma temp. (sucmax)	<input type="text" value="20"/>	<input type="text" value="20"/>	(*NT)

Salvar Executar Parar Fechar

DADOS PARA O MODELO ESTÁTICO (X/3)

- número de trechos sorteados: um
- percentagem de energia PE : 0,01
- probabilidade de aceitação p : 0,50
(o que resulta em $t_0 = 0,0144$ *FOB ini*)
- fator de arrefecimento (f) = 0,9

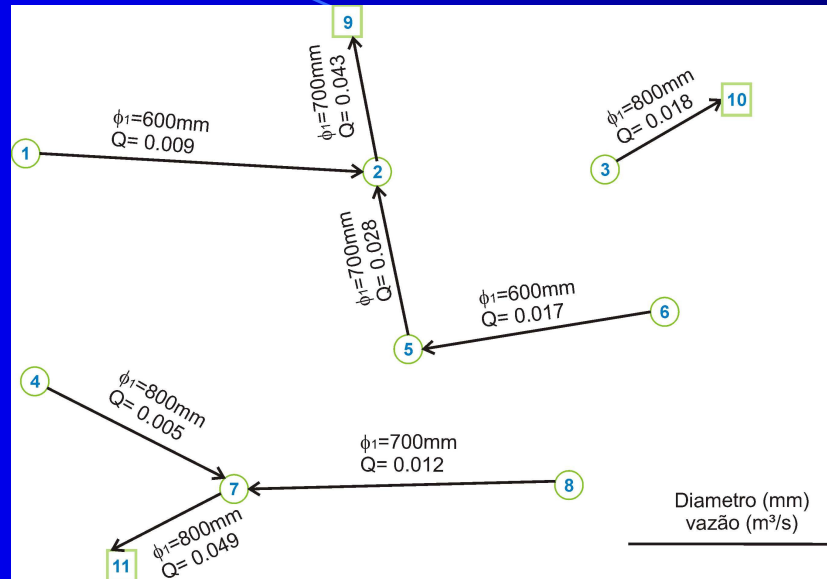
	Mod. Estático	Mod. Hidráulico
n_2	5*(nº de trechos) (100)	10*(nº de trechos) (200)
$n_1:simmax$	100*(nº de trechos) (2000)	200 n_2 (40.000)
$n_1:sucmax$	10*(nº de trechos) (200)	20 n_2 (4.000)
$nit1/nit2$		2000/200

APLICAÇÃO DO MODELO DINÂMICO (X/4)

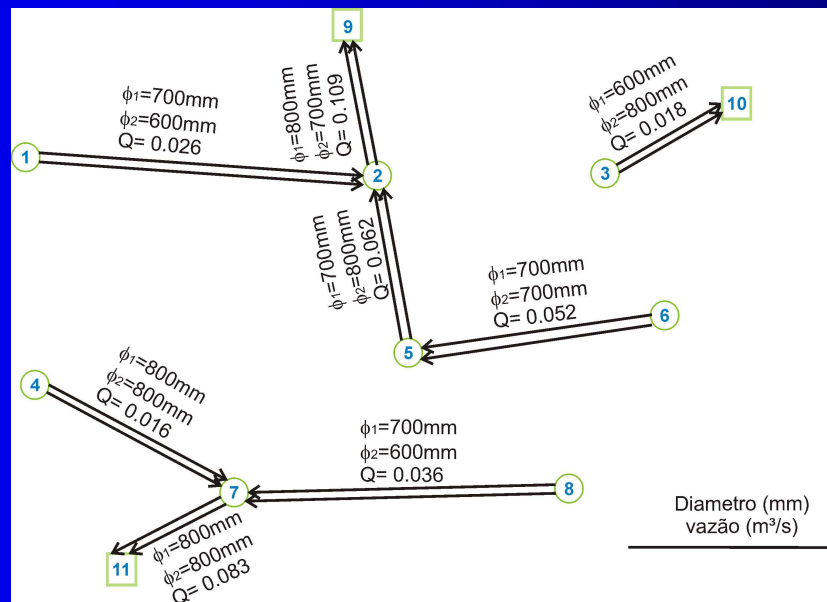
Tabela 7.2 – Resultados da FOB média para o Modelo Dinâmico
- bacía exemplo (R\$) $r = 10\%$ $t = 20$ anos

Rodada	n_2	ETAPA 1	ETAPA 2
1	1	60.878.708,55	80.560.724,73
2	2	56.009.910,20	77.106.487,77
3	5	53.677.525,85	65.041.323,63
4	10	49.152.261,84	63.103.830,92

APLICAÇÃO DO MODELO DINÂMICO (X/5)



(a) - Etapa 1



(b) - Etapa 2

Figura 7.4 – Redes resultantes do Modelo Dinâmico para a “bacia exemplo”

APLICAÇÃO DO MODELO DINÂMICO (X/6)

Tabela 7.7 – Variação da taxa de desconto e resultados da FOB média para o Modelo Dinâmico - bacia exemplo (R\$) - (n_2 do Modelo Dinâmico = 5)

Taxa de retorno (%)	ETAPA 1	ETAPA 2
5	46.097.892,68	81.087.688,30
10	53.677.525,85	65.041.323,63
15	51.350.687,03	59.630.673,71
20	58.395.669,61	58.738.894,11

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES(XI/1)

Comentário

- O método de Recozimento é baseado em simulação Monte Carlo: usado para estudar comportamentos assintóticos de um sistema, exigindo longos vetores de dados e longos tempos de processamento.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES(XI/2)

Recomendações

- complementar funções de custo: tubulações sob pressão, O&M de EEs
- possível mesclagem dos modelos hidráulicos
- melhor avaliação das funções de penalidade
- Limitar nos MOD-HIDR a quantidade de bombeamento
- incluir restrições de QA dentro do modelo de otimização (FOB com dois objetivos)
- Utilizar um modelo de QA mais robusto
- estudar a aplicação de outras metaheurísticas