

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E SISTEMAS

PLANEJAMENTO DE SISTEMAS DE  
RECALQUE ATRAVÉS DE OTIMIZAÇÃO

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
MESTRE EM ENGENHARIA

NEWTON CARNEIRO AFFONSO DA COSTA JR.



0.243.713-4

UFSC-BU

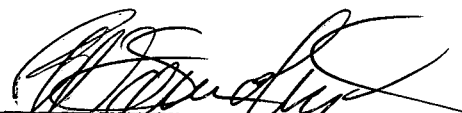
FLORIANÓPOLIS  
SANTA CATARINA - BRASIL  
ABRIL - 1986

PLANEJAMENTO DE SISTEMAS DE  
RECALQUE ATRAVÉS DE OTIMIZAÇÃO


NEWTON CARNEIRO AFFONSO DA COSTA JR.

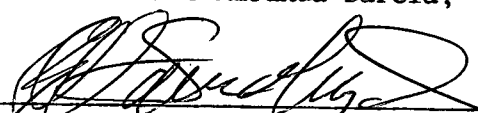
ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
"MESTRE EM ENGENHARIA"

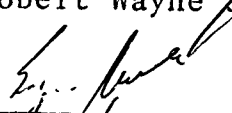
ESPECIALIDADE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E APROVADA EM SUA  
FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


  
Prof. Robert Wayne Samohyl, Ph.D.  
Coordenador do Curso

BANCA EXAMINADORA:

  
Prof. Ricardo Miranda Barcia, Ph.D.

  
Prof. Robert Wayne Samohyl, Ph.D.

  
Prof. Sérgio Fernando Mayerle, M. Eng.

  
Prof. Antônio S. Coelho, M. Eng.

Dedico este trabalho  
aos meus pais e irmãos

## AGRADECIMENTOS

Manifesto meus sinceros agradecimentos às seguintes pessoas e instituições:

Aos professores Sérgio F. Mayerle e Ricardo M. Barcia, pela orientação e apoio durante a realização deste trabalho.

Aos professores Robert Wayne Samohyl e Antônio Sérgio Coelho, pelas sugestões e interesse demonstrados.

À CAPES pelo auxílio financeiro.

À Universidade Federal de Santa Catarina, pela oportunidade concedida na realização do Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo a proposição de um modelo de busca em grafos para minimizar os custos de implantação, manutenção e operação de Sistemas de Recalque para uma demanda de líquido conhecida ao longo do horizonte de planejamento do Sistema.

Inicialmente apresentam-se os fundamentos de hidráulica necessários à concepção do modelo bem como as técnicas convencionais que vem sendo atualmente utilizadas.

O modelo proposto visa a determinação de uma política ótima de expansão de Sistemas de Recalque através da substituição de seus principais componentes, ou seja, a tubulação e o conjunto motor-bomba.

Após a apresentação do modelo é feita uma aplicação prática do mesmo e os resultados comparados com os obtidos pelos métodos convencionais.

Mostra-se que a política de implantação de Sistemas de Recalque obtida com o uso do modelo proposto apresenta reduções de custo consideráveis quando comparado com políticas fornecidas pelos métodos convencionais.

## ABSTRACT

The purpose of this work is the development of a graph search model for optimizing pumping systems. The aim of the model is to minimize the cost of pumps, pipes, operation and maintenance of the system for a known flow of liquid.

Initially some concepts of Hydraulics as well as the conventional approach to solve this problem are presented.

The proposed model provides the optimal policy by determining the optimal timing of phasing both pipe and pump.

A practical example is presented. The results found using the proposed model are compared with the ones obtained by the use of the conventional approach. As this comparison shows, considerable cost reductions are achieved by the use of the methodology here developed.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS . . . . .	ix
LISTA DE TABELAS . . . . .	x
CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	
1.1 - Conceito de Sistemas de Recalque . . . . .	1
1.2 - Métodos de Dimensionamento . . . . .	2
1.3 - Motivação do Trabalho . . . . .	3
1.4 - Objetivo do Trabalho . . . . .	4
1.5 - Organização do Trabalho . . . . .	5
CAPÍTULO II - FUNDAMENTOS TEÓRICOS	
2.1 - Introdução . . . . .	6
2.2 - Hidráulica das Canalizações . . . . .	6
2.2.1 - Conduitos Forçados . . . . .	6
2.2.2 - Equações Fundamentais . . . . .	8
2.2.3 - Perda de Carga . . . . .	11
2.2.4 - Conjunto de Recalque . . . . .	16
2.3 - Métodos Convencionais de Dimensionamento de Sistemas de Recalque . . . . .	20
2.3.1 - Considerações Preliminares . . . . .	20
2.3.2 - Métodos de Dimensionamento . . . . .	20
2.4 - Conclusão . . . . .	23
CAPÍTULO III - MODELO PROPOSTO E TÉCNICA DE SOLUÇÃO	
3.1 - Caracterização do Problema . . . . .	24
3.2 - Modelagem do Problema . . . . .	26

3.2.1 - Definições . . . . .	26
3.2.2 - Modelo Proposto . . . . .	28
3.2.3 - Custos Associados ao Modelo . . . . .	31
3.3 - Algoritmo Utilizado . . . . .	35
3.4 - Conclusão . . . . .	38

#### CAPÍTULO IV - APLICAÇÃO PRÁTICA

4.1 - Introdução . . . . .	39
4.2 - Apresentação do Problema . . . . .	39
4.3 - Solução do Problema . . . . .	44
4.3.1 - Solução do Problema usando o Modelo Proposto .	44
4.3.2 - Solução do Problema usando a Metodologia Tra-	
dicional . . . . .	45
4.4 - Comparação dos Resultados Obtidos . . . . .	46
4.5 - Conclusões . . . . .	53

#### CAPÍTULO V - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 - Conclusões . . . . .	54
5.2 - Recomendações e Futuros Trabalhos . . . . .	55

BIBLIOGRAFIA . . . . .	56
------------------------	----

#### APÊNDICES

APÊNDICE I - Listagem do Programa . . . . .	59
APÊNDICE II - Entrada de Dados . . . . .	71
APÊNDICE III - Saída de Resultados . . . . .	73



## LISTA DE FIGURAS

Fig. 2.1 - Esquema de um trecho de canalização . . . . .	8
Fig. 2.2 - Gráfico representativo das linhas de energia de um fluido ideal em movimento . . . . .	10
Fig. 2.3 - Gráfico representativo das linhas de energia de um fluido real em movimento . . . . .	11
Fig. 2.4 - Bomba Centrífuga Radial . . . . .	17

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Valores da rugosidade (e) para diversos materiais . . . . .	14
Tabela 2.2 - Valores de perda de carga singular (k) para diversas peças . . . . .	15
Tabela 2.3 - Rendimento do conjunto motor-bomba . . . . .	19
Tabela 4.1 - Consumo anual de água para a cidade de Concórdia - SC . . . . .	41
Tabela 4.2 - Relatório de saída do Plano Ótimo de Expansão usando-se depreciação total . . . . .	46
Tabela 4.3 - Relatório de saída do Plano Ótimo de Expansão usando-se a depreciação pela soma dos dígitos com o fator 1.0 para o conjunto de recalque e tubulação . . . . .	47
Tabela 4.4 - Relatório de saída do Plano Ótimo de Expansão usando-se a depreciação pela soma dos dígitos com o fator 0.5 para o conjunto de recalque e tubulação . . . . .	48
Tabela 4.5 - Relatório de saída do Plano Ótimo de Expansão usando-se a depreciação pela soma dos dígitos	

com os fatores 0.7 e 0.8 para o conjunto de recalque e tubulação, respectivamente. . . . .	49
Tabela 4.6 - Relatório de saída utilizando-se a Metodologia Tradicional (UMA ETAPA) . . . . .	50
Tabela 4.7 - Relatório de saída utilizando-se a Metodologia Tradicional (DUAS ETAPAS) . . . . .	51
Tabela 4.8 - Valor Presente dos resultados obtidos pelas duas metodologias . . . . .	52

# C A P Í T U L O I

## INTRODUÇÃO

### 1.1 - CONCEITO DE SISTEMAS DE RECALQUE

Um dos problemas mais frequentes de hidráulica aplicada é o transporte de um líquido.

Quando o transporte é feito em sentido descendente, pode-se valer da energia potencial do líquido, projetando-se um aqueduto que funcione por gravidade. Entretanto, quando se pretende transportar o líquido em sentido ascendente, ou no sentido de pressões crescentes, há a necessidade de se fornecer energia ao líquido. Isto é feito através dos chamados Sistemas de Recalque(SR).

Os principais elementos de um SR são:

- i) Conjunto de recalque: constituído por uma bomba hidráulica e pelo motor que a aciona;
- ii) Tubulação de sucção: canalização que liga o ponto de pressão mais baixa até a parte anterior da bomba hidráulica;
- iii) Tubulação de recalque: canalização que liga a parte posterior da bomba com o ponto de pressão mais alta.

## 1.2 - MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO

Os principais elementos a serem determinados no dimensionamento de um SR são o diâmetro da tubulação de sucção e de recalque e a potência do conjunto de recalque (ou conjunto elevatório), pois os investimentos com a aquisição da tubulação e as despesas operacionais, principalmente energia elétrica do conjunto de recalque, perfazem a maior parte dos custos necessários a implantação do sistema.

No dimensionamento de SR são conhecidos a vazão do líquido necessária para atender a demanda ao longo do período de planejamento do sistema, o desnível geométrico entre os pontos em que o líquido será transportado e o comprimento da canalização de recalque e de sucção. Deseja-se determinar o diâmetro da tubulação e a potência do conjunto elevatório.

A formulação teórica do problema acima admite como solução infinitos pares (Diâmetro, Potência) [1, 4, 5, 10, 12]. Para um pequeno diâmetro da tubulação (baixo custo de aquisição) necessita-se de um conjunto elevatório de grande potência (alto custo de aquisição e maiores gastos com energia elétrica) e vice-versa. Assim a melhor solução é obtida determinando-se entre este número infinito de combinações (Diâmetro-Potência) o par de menor custo.

A solução do problema acima pode ser obtida através da fórmula de Bresse [1, 4, 5, 12]:

$$D = K \sqrt{Q}, \quad (1.1)$$

onde:

D - é o diâmetro da adutora [metros];

Q - é a vazão do líquido [ $m^3$ /seg.];

K - é um coeficiente empírico, representativo da otimização do par (Diâmetro, Potência) para as condições locais.

Como a fórmula de Bresse nem sempre fornece o diâmetro mais econômico, outra forma de abordagem ao problema [4, 10, 17], usada para SR de maior porte, é a elaboração de tabelas de custos anuais de amortização, juros, operação e manutenção referentes à implantação de SR com diversos diâmetros comerciais em torno do diâmetro obtido pela fórmula de Bresse. Escolhe-se o par (Diâmetro-Potência) de menor custo.

### 1.3 - MOTIVAÇÃO DO TRABALHO

A solução do problema de dimensionamento de SR, seja através da fórmula de Bresse e/ou de estudos de comparação econômica, é obtida, na maioria das vezes, em função da vazão prevista para o fim do período de planejamento. Em outras palavras, o par (Diâmetro-Potência) a ser escolhido será o mesmo durante toda a vida útil do sistema. A demanda, entretanto, variará conforme o crescimento da população atendida.

A motivação deste trabalho foi verificar a possibilidade de se adotar um par (Diâmetro-Potência) de menor dimensão no início do período de planejamento e, à medida que a demanda aumentar, substituí-los progressivamente por outros pares de maiores dimensões. Assim, com esta alternativa, esperava-se encontrar

um plano ótimo de substituições do par (Diâmetro-Potência) que minimizasse os gastos com a implantação, operação e manutenção de SR.

Aqui convém salientar que nos projetos onde o custo é muito elevado e o crescimento da demanda (população) é grande, frequentemente se adota mais de uma etapa dentro do período de planejamento. Contudo, nestes projetos, os estudos se restringem na análise de um pequeno número de alternativas possíveis, não garantindo a obtenção da solução ótima (ou seja, a de mínimo custo).

#### 1.4 - OBJETIVO DO TRABALHO

O objetivo deste trabalho é a determinação de uma política ótima de substituição da tubulação e conjunto de recalque que acompanhe a variação da demanda e satisfaça às condições técnicas do projeto, minimizando o custo total (implantação, operação e manutenção) do sistema. Para isto é proposto um modelo computacional baseado na técnica de busca em grafos que sistematiza o cálculo e a comparação dos custos entre os diversos pares (Diâmetro, Potência) viáveis para todas as possibilidades de subdivisão do período de planejamento.

## 1.5 - ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

No presente capítulo foi definido um Sistema de Recalque. A seguir discutiu-se a metodologia usada tradicionalmente para o seu dimensionamento e por fim apresentou-se a abordagem proposta.

No segundo capítulo são descritos os fundamentos hidráulicos necessários à formulação do modelo e são apresentados mais detalhadamente os métodos tradicionais de dimensionamento.

No terceiro capítulo é apresentada a formulação do modelo e o algoritmo para sua solução.

No quarto capítulo faz-se uma aplicação prática do modelo e os resultados obtidos com sua utilização são comparados com os obtidos pelos métodos tradicionais.

Por fim, no quinto e último capítulo são apresentadas as conclusões e feitas algumas sugestões para futuros trabalhos.



# C A P Í T U L O    I I

## FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 2.1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão apresentados os conceitos e fórmulas da hidráulica necessários à formulação do modelo que será proposto no capítulo seguinte.

Mais especificamente, serão apresentados os métodos tradicionais para o dimensionamento de SR, bem como uma descrição dos tipos de bomba utilizadas e o seu respectivo funcionamento.

### 2.2 - HIDRÁULICA DAS CANALIZAÇÕES

#### 2.2.1 - Conduitos Forçados

As canalizações de um sistema de recalque funcionam sempre como conduitos forçados, ou seja, o líquido transportado escoa sob uma pressão que não coincide necessariamente com a atmosférica. Além disso as seções desses conduitos são sempre fechadas e o líquido escoar enchendo-as totalmente.

Num conduto forçado, o movimento de um líquido pode ser classificado da seguinte maneira [1, 9, 12]:

a) Quanto ao tempo.

- Movimento permanente: quando para qualquer

ponto fixo no interior do conduto as grandezas que caracterizam o movimento do líquido (velocidade, aceleração e pressão) e da partícula (peso específico, temperatura) não variam ao longo do tempo.

- Movimento variado: quando as grandezas acima variam ao longo do tempo num mesmo ponto.

b) Quanto à trajetória das partículas:

- Regime laminar: quando as trajetórias das partículas não se cruzam.

- Regime turbulento: caracterizado pelo movimento desordenado das partículas.

A caracterização dos dois regimes acima é feita pelo número de Reynolds (Re) [1, 5, 9, 12]. Este número expressa a relação entre as forças de inércia e as forças de atrito interno que atuam durante o movimento do fluido [12]. É dado pelo seguinte equação:

$$Re = \frac{D \cdot V}{\nu}, \quad (2.1)$$

onde:

D - é o diâmetro da tubulação [m],

V - é a velocidade média na seção onde se escolheu a dimensão D [m/s], e

$\nu$  - é o coeficiente de viscosidade cinemática do fluido [m<sup>2</sup>/s].

Por definição, o regime laminar é caracterizado por  $Re < 2000$ , o regime turbulento por  $Re > 4000$  e quando  $2000 \leq Re \leq 4000$  o regime é denominado crítico, podendo ser laminar ou turbulento.

No dimensionamento de SR o escoamento do líquido nas canalizações se dá em regime permanente e turbulento, ou seja, o regime onde a velocidade, acelerações e pressão do líquido são invariantes ao longo do tempo num mesmo ponto.

### 2.2.2 - Equações Fundamentais

Na solução de problemas envolvendo contudos forçados duas equações são necessárias:

a) Equação da continuidade [1, 4, 5, 9, 12].

Seja a canalização mostrada na figura 2.1, na qual é considerado um trecho de canalização compreendido entre duas seções  $S_1$  e  $S_2$ , onde as velocidades médias são  $V_1$  e  $V_2$  respectivamente.

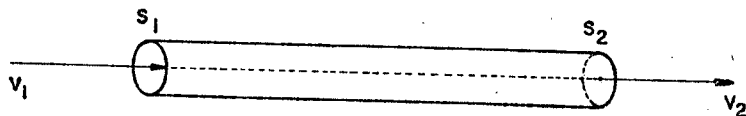


FIGURA 2.1

Considerando o movimento do fluido na canalização como permanente, a quantidade de fluido que entra pela seção  $S_1$  na unidade de tempo é a mesma sai por  $S_2$ .

Este fato pode ser expresso por:

$$\gamma_1 S_1 V_1 = \gamma_2 S_2 V_2,$$

onde  $\gamma_1$ , e  $\gamma_2$  representam a densidade do líquido em  $S_1$  e  $S_2$ , respectivamente.

Considerando o líquido incompressível ( $\gamma_1 = \gamma_2$ ) tem-se:

$$S_1 V_1 = S_2 V_2.$$

Fazendo-se:

$$Q = S_1 V_1 = S_2 V_2 = SV, \quad (2.2)$$

onde:

$Q$  - é a vazão [ $m^3/s$ ],

$V$  - é a velocidade média na seção [ $m/s$ ] e

$S$  - é a área da seção de escoamento  $m^2$

verifica-se que a vazão é constante.

A equação (2.2) é denominada de equação da continuidade.

b) Teorema de Bernoulli [1, 4, 5, 9, 12].

O teorema de Bernoulli equivale ao princípio de conservação de energia. Pode ser enunciado da seguinte maneira: "no movimento, em regime permanente, de uma partícula de um líquido perfeito (não viscoso e incompressível) e homogêneo, a soma das alturas representativas da sua posição acima de um pano de referência, da sua pressão e da sua velocidade, é constante ao longo da trajetória" [12].

Aplicando-se o teorema de Bernoulli às seções 1 e 2 do conduto mostrado na figura 2.2 temos a seguinte igualdade:

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + Z_1 = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 \quad (2.3)$$

onde:

$\frac{V^2}{2g}$ ,  $\frac{P}{\gamma}$ ,  $Z$  - representam, respectivamente, as parcelas de energia cinética, piezométrica e potencial [m],

$V_1$  e  $V_2$  - são as velocidades médias [m/s],

$g$  é a aceleração da gravidade [m/s<sup>2</sup>],

$P_1$  e  $P_2$  - são as pressões nas seções 1 e 2 [kg/m<sup>2</sup>],

$\gamma$  é o peso específico do líquido [kg/m<sup>3</sup>],

$Z_1$  e  $Z_2$  - são as cotas da canalização relativamente a um plano horizontal de referência [m].

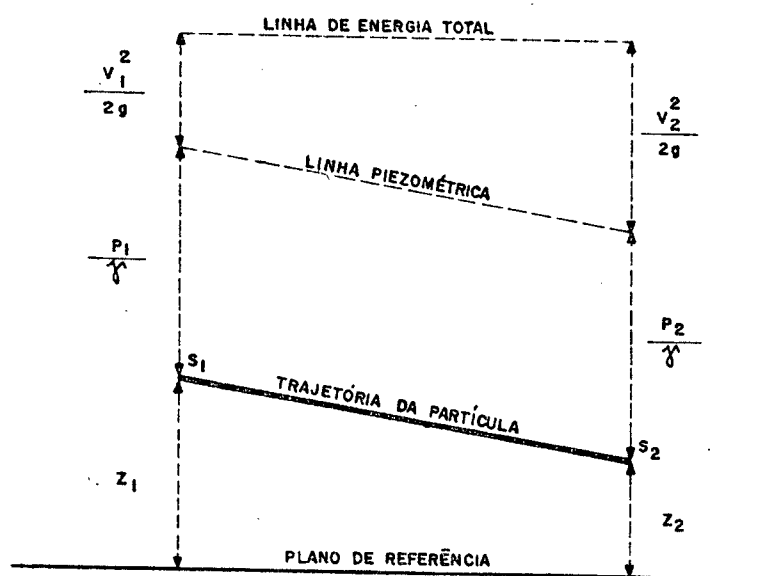


FIGURA 2.2

Observando-se ainda a figura 2.2 tem-se as seguintes definições:

- i) Linha de energia total: é o lugar geométrico dos pontos representativos dos três tipos de energia (cinética, potencial e piezométrica),
- ii) Linha piezométrica: é o lugar geométrico dos pontos representativos da soma das energias piezométrica e potencial.

### 2.2.3 - Perda de Carga

Considerando-se o movimento de um líquido real (viscoso) em uma canalização, observa-se que parte da energia inicial se dissipa sob a forma de calor. Na figura 2.3, que representa esta situação real, nota-se que a soma das três energias na seção 2 não é igual à soma dessas energias na seção 1. Essa diferença é denominada perda de carga ( $\Delta h$ ).

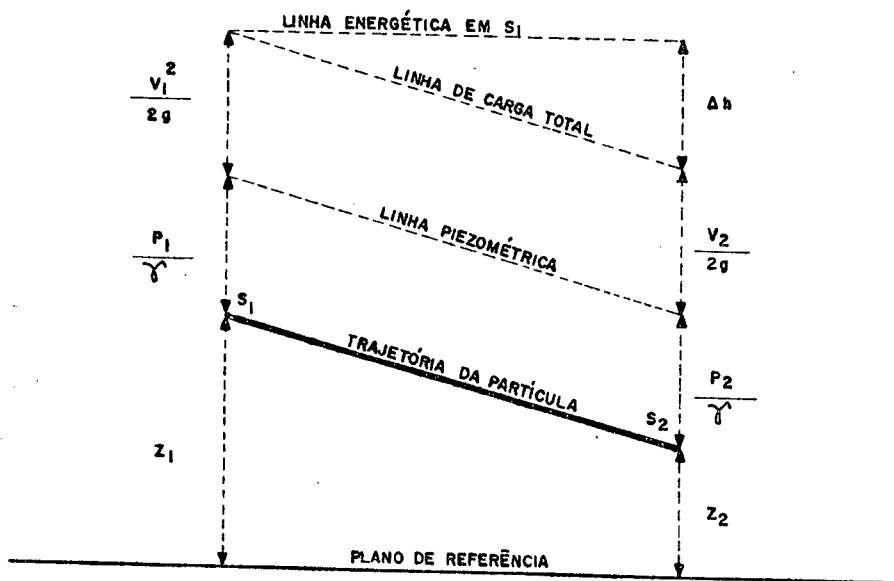


FIGURA 2.3

As perdas de carga (energia) são classificadas em dois tipos [1, 5, 9, 12] a saber:

a) Perda de carga por resistência ao longo dos condutos.

É a perda de energia devida ao atrito interno (viscosidade) e ao atrito entre o líquido e a parede da tubulação. Na verdade esta última forma de atrito é devido às tensões tangenciais que se desenvolvem entre uma película que se forma junto às paredes da tubulação e as partículas líquidas contíguas [12].

Ela pode ser expressa como uma função do comprimento da canalização (L), do diâmetro (D), da velocidade (V) e da rugosidade das paredes da tubulação (e). É dada pela equação [1]:

$$\Delta h = K \frac{L V^n}{D^m}, \quad (2.4)$$

onde os expoentes  $m$  e  $n$  são determinados empiricamente e  $K$  é um coeficiente determinado em função da rugosidade da tubulação (e).

A perda de carga ao longo de canalizações pode ser determinada tanto por uma fórmula empírica como pela fórmula universal de perda de carga [1, 4, 5, 9, 12]. Para a determinação da perda de carga em condutos forçados de seção circular é bastante utilizada a fórmula empírica de Hazen-Willians [1, 4, 5, 12]:

$$V = 0,355 C D^{0,63} J^{0,54}, \quad (2.5)$$

onde:

V - é a velocidade média [m/s],

D - é o diâmetro [m],

J - é a perda de carga unitária igual a  $\frac{\Delta h}{L}$  [m/m], e

C - é um coeficiente que depende da rugosidade interna da tubulação [adimensional].

A fórmula universal de perda de carga serve para a determinação da perda de carga em condutos circulares ou não [1, 4, 5, 9, 12]. Ela é dada pela seguinte expressão:

$$\Delta h = f \frac{L}{D_h} \frac{V}{L g} \quad (2.6)$$

onde:

L - é o comprimento de canalização [m],

$D_h$  - é o diâmetro hidráulico (coincidindo com o diâmetro dos condutos circulares [m], e

f - é o coeficiente universal de perda de carga (adimensional).

O coeficiente f pode ser obtido, entre outras maneiras, pela expressão aproximada de Moody [12].

$$f = 0,0055 \left[ 1 + \left( 20.000 \frac{e}{D} + \frac{10^6}{Re} \right)^{1/3} \right] \quad (2.7)$$

onde:

e - é a rugosidade da tubulação [m],

D - é o diâmetro [m], e

Re - é o número de Reynolds [adimensional].



A tabela 2.1 apresenta valores de rugosidade ( $e$ ) para alguns materiais.

MATERIAL	RUGOSIDADE (mm)
Ferro fundido novo . . . . .	0,26 — 1
" " enferrujado . . . . .	1 — 1,5
" " incrustado . . . . .	1,5 — 3
" " asfaltado . . . . .	0,12 — 0,26
Aço laminado novo . . . . .	0,00015
" comercial novo . . . . .	0,046
" rebitado . . . . .	0,92 — 9,2
" asfaltado . . . . .	0,04
" galvanizado . . . . .	0,15
" soldado liso . . . . .	0,1
" muito corroído . . . . .	2
" rebitado, com cabeças cortadas .	0,3
Cobre ou vidro . . . . .	0,0015
Concreto centrifugado . . . . .	0,07
Cimento alisado . . . . .	0,3 — 0,8
Cimento bruto . . . . .	1 — 3
madeira aplainada . . . . .	0,2 — 0,9
" não aplainada . . . . .	1 — 2,5
Alvenaria de pedra bruta . . . . .	8 — 15
Rocha bruta . . . . .	0,2
Tijolo . . . . .	5
Alvenaria de pedra regular . . . . .	1

TABELA 2.1 - Valores de  $e$  para diversos materiais [12].

A expressão (2.6) é válida para o intervalo  $4000 \leq Re \leq 10^7$ , que é satisfeito nos casos comuns da hidráulica de sistemas de recalque d'água [12].

## b) Perdas de carga localizadas

Sempre que há mudanças de direção ou do módulo da velocidade, há uma perda de carga. Tais perdas de carga são denominadas acidentais, singulares ou localizadas [1, 5, 9, 12]. Podem ser calculadas pela expressão:

$$\Delta h_{loc} = K \frac{V^2}{2g}, \quad (2.8)$$

onde K é um coeficiente, calculado experimentalmente, que depende do elemento causador da perda (curva, registro, mudança de diâmetro, etc) e V a velocidade na canalização [1, 5, 9, 12].

A tabela 2.2 apresenta alguns valores de K para diversas singularidades

Peça	K	Peça	K
Ampliação gradual	0,30*	Junção	0,40
Bocais	2,75	Medidor Venturi	2,50**
Comporta aberta	1,00	Redução gradual	0,15*
Controlador de vazão	2,50	Registro de ângulo aberto	5,00
Cotovelo de 90°	0,90	Registro de gaveta aberto	0,20
Cotovelo de 45°	0,40	Registro de globo aberto	10,00
Crivo	0,75	Saída de canalização	1,00
Curva de 90°	0,40	Tê, passagem direta	0,60
Curva de 45°	0,20	Tê, saída de lado	1,30
Curva de 22 1/2°	0,10	Tê, saída bilateral	1,80
Entrada normal em canalização	0,50	Válvula-de-pé	1,75
Entrada de Borda	1,00	Válvula de retenção	2,50
Existência de pequena derivação	0,03	Velocidade	1,00

\* Com base na velocidade maior (seção menor)

\*\* Relativa à velocidade na canalização

TABELA 2.2 - Valores de K (perdas localizadas) [1].

#### 2.2.4 - Conjunto de Recalque

Um conjunto de recalque é composto de uma bomba e um motor.

Segundo o Hydraulic Institut dos EUA, as bombas classificam-se em [4]:

##### A - BOMBAS CINÉTICAS

###### a) Centrífugas

a.1 - de fluxo radial

a.2 - de fluxo misto

a.3 - de fluxo axial

###### b) Periféricas ("Peripheral")

b.1 - de estágio único

b.2 - de estágios múltiplos

###### c) Especiais

c.1 - de ejetor

c.2 - de injeção de gás ("gas lift")

c.3 - de ariete hidráulico

c.4 - eletromagnético

##### B - BOMBAS DE DESLOCAMENTO DIRETO

###### a) Com movimento alternado

a.1 - de pistão

a.2 - de êmbolo

a.3 - de diagrama

###### b) Com "blow case"

b.1 - de rotor único (de palheta, de pistão, de membro flexível, de parafuso)

c) Com movimento rotativo

c.1 - de rotor múltiplo (de engrenagem, de lóbulo, de pistão circunferencial, de parafuso).

Embora existam inúmeros tipos de bomba, este trabalho se aterá somente às bombas centrífugas, que são as mais usadas em SR.

Estas são basicamente constituídas por um rotor e uma carcaça, sendo acionadas, na maioria das vezes, por motores elétricos. A figura 2.4 mostra o esquema de uma bomba centrífuga de fluxo radial.

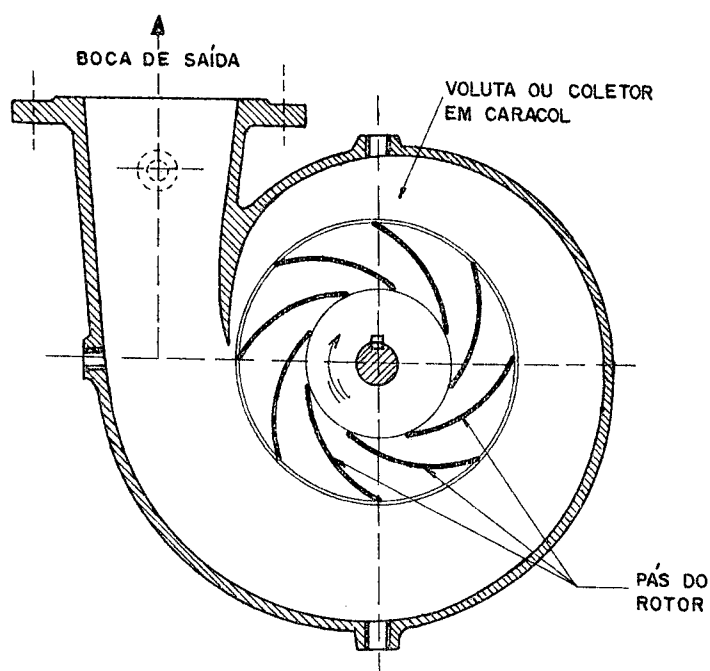


FIGURA 2.4 - Bomba centrífuga radial [9]

Neste tipo de bomba o líquido entra axialmente e sai radialmente impulsionado pelas pás do rotor em movimento. O líquido que sai tangencialmente do rotor é canalizado numa câmara em forma de voluta (caracol), onde parte da energia de velocidade é convertida em energia de pressão. Quando a pressão exigida for muito elevada, usa-se em geral bombas com mais de um rotor que são denominadas de bombas de múltiplo estágio.

Nas bombas centrífugas axiais o líquido entra e sai axialmente ao rotor. É usada para recalque de grandes vazões e pequenas alturas.

Finalmente, as bombas centrífugas de fluxo misto combinam os princípios das duas anteriores. A trajetória do líquido na bomba se dá em forma de hélice.

O acionamento das bombas é feito, em geral, por motores elétricos. São estes que fornecem rotação ao rotor da bomba. A maioria dos SR tem motores elétricos de corrente alternada (motores síncronos ou motores assíncronos) [1, 4, 5, 9] que são acoplados diretamente às bombas. O número de rotações, neste caso, é dado em função do número de polos do motor (P) e pela frequência da energia elétrica (f):

$$\text{rpm} = \frac{120f}{P} \quad (2.9)$$

Conhecendo-se a vazão a ser recalçada, o diâmetro e o comprimento da tubulação e as peças especiais nela inseridas, pode-se calcular a perda de carga total do sistema de acordo com as equações (2.6) e (2.7). Somando-se a perda de carga total ao

desnível geométrico de elevação ( $H_G$ ) do líquido, tem-se:

$$H_m = H_G + \Delta h + \Delta h_{loc}, \quad (2.10)$$

onde  $H_m$  é denominado altura manométrica total e representa a energia total (em metros) que se deve fornecer ao líquido para que este vença o desnível geométrico  $H_G$ , mantendo a vazão de projeto. A potência necessária para isso, fornecida pelo conjunto motor-bomba, é calculada pela expressão [1, 4, 5, 9, 12]:

$$N = \frac{\gamma Q H_m}{75\eta}, \quad (2.11)$$

onde:

$\eta$  - é o rendimento global do sistema, dado pelo produto dos rendimentos do motor e da bomba, e

$\gamma$  - é o peso específico do líquido recalçado [ $\text{kg/m}^3$ ].

Em geral o rendimento da bomba e do motor varia com a potência dos mesmos, como mostra a tabela 2.3:

Rendimento de Motores Elétricos												
HP	1/2	3/4	1	1 1/2	2	3	5	10	20	30	50	100
$\eta_M(\%)$	64	67	72	73	75	77	81	84	86	87	88	90
Bombas Centrífugas												
Q( /s)	5	7,5	10	15	20	25	30	40	50	100	200	
$\eta_B(\%)$	52	61	66	68	71	75	80	84	85	87	88	

TABELA 2.3 - Rendimento do conjunto motor-bomba [1].

## 2.3 - MÉTODOS CONVENCIONAIS DE DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE RECALQUE

### 2.3.1 - Considerações Preliminares

No tratamento de SR serão considerados apenas o conjunto motor-bomba (+ instalações elétricas) e a tubulação. Os outros elementos que compõe um SR, como salão de máquinas, dependências complementares, poço de sucção, medidores de vazão e nível, etc., não serão aqui considerados, pois suas dimensões serão projetadas para o fim do período de planejamento e portanto os custos a eles associados serão os mesmos em todas as alternativas.

### 2.3.2 - Métodos de Dimensionamento

No dimensionamento de um SR são conhecidos o comprimento da tubulação, a vazão a ser aduzida e o desnível geométrico a ser vencido. Quer-se determinar o diâmetro da tubulação e a potência do conjunto elevatório.

Para isto dispõe-se das equações (2.2), (2.6) e (2.11). Contudo tem-se quatro incógnitas a determinar:  $D$ ,  $N$ ,  $V$ ,  $\Delta h$ . Portanto este é um sistema de equações indeterminado. Fazendo-se o recalque com velocidades de escoamento baixas, resulta em diâmetros relativamente grandes, implicando num custo elevado de tubulação. Em contrapartida, tem-se menores dispêndios com o conjunto elevatório e a energia elétrica, pelo fato de se necessitar alturas manométricas menores (menores perdas de energia na tubulação). Por ou-

tro lado, velocidades altas<sup>1</sup> requerem diâmetros menores, de custo mais baixo, implicando, entretanto, em elevadas perdas de carga e, conseqüentemente, exigindo maior dispêndio com os conjuntos elevatórios e com a energia. Portanto, o problema apresenta, teoricamente, infinitas soluções. A indeterminação acima só é solucionada admitindo-se uma outra condição que é a condição de mínimo custo do sistema de recalque.

Um pré-dimensionamento que determina o diâmetro das adutoras por recalque, muito próximo daqueles que minimizam os custos das instalações, é feito através da fórmula de Bresse [1, 4, 5, 12], que para o caso de instalações de funcionamento contínuo (24 horas/dia) é:

$$D = K \sqrt{Q} , \quad (2.12)$$

onde:

D - é o diâmetro da tubulação de recalque [m],

Q - é a vazão de adução [m<sup>3</sup>/s], e

K - é um coeficiente que depende do peso específico do líquido, do regime de trabalho e rendimento do conjunto elevatório, da rugosidade da tubulação, dos preços vigentes, da unidade de potência do conjunto elevatório e do preço da unidade de comprimento do tubo de diâmetro unitário.

Em geral K varia de 0,6 a 1,6.

<sup>1</sup>O valor da velocidade nas canalizações tem limites máximos e mínimos que dependem do material da tubulação e da característica do líquido transportado [1, 12].



Em instalações de maior porte, o resultado da equação (2.12) é adotado como uma primeira aproximação, sendo necessário um estudo mais acurado para obtenção de uma solução econômica. Esta é obtida através do confronto dos custos de anteprojetos feitos com diâmetros superiores e inferiores ao obtido pela fórmula de Bresse [1, 4, 5, 12]. Para cada anteprojeto calculam-se as parcelas que compõem o custo anual da instalação e que são os seguintes:

- i) Amortização anual do investimento (aquisição e instalação do SR);
- ii) Despesa anual com o consumo de energia elétrica necessária ao acionamento do sistema;
- iii) Despesa anual com a operação e a manutenção preventiva da instalação, compreendendo mão-de-obra, transporte, peças de reposição e material de consumo.

Confrontando-se os custos mensais totais dos vários anteprojetos chega-se ao diâmetro mais econômico para uma determinada vazão.

## 2.4 - CONCLUSÃO

Neste capítulo foram apresentados os fundamentos teóricos utilizados no dimensionamento de SR. Mostrou-se como calcular, para uma determinada vazão, o conjunto motor-bomba e tubulação mais econômico.

No capítulo seguinte é descrita uma metodologia alternativa que, utilizando as mesmas equações aqui apresentadas, determina uma política ótima de implantação de SR para uma demanda variável ao longo do tempo.

## C A P Í T U L O   I I I

## MODELO PROPOSTO E TÉCNICA DE SOLUÇÃO

## 3.1 - CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

A solução proposta neste trabalho ao problema descrito nos capítulos anteriores parte das seguintes suposições:

- a) É conhecida a função que relaciona os custos da tubulação com seu respectivo diâmetro. Neste caso usou-se uma função que assume valores discretos, onde para os diversos diâmetros comerciais que podem ser utilizados, é conhecido o custo do metro linear da tubulação.
- b) É conhecida a função que relaciona os custos do conjunto de recalque com a potência fornecida. Contudo, devido à grande diversidade de bombas no mercado<sup>2</sup>, escolheu-se uma função contínua a fim de evitar dificuldades computacionais. Para isto existem duas possibilidades.

<sup>2</sup> Para um determinado modelo de bomba existem diversas combinações possíveis entre tamanho de rotor e número de rotações fornecida pelo motor, de modo que um mesmo modelo pode ser projetado para diversas potências de trabalho e vice-versa. Por isto, nos SR de médio e grande porte, o conjunto de recalque é, em geral, feito sob encomenda.

A primeira é usar funções já conhecidas que são fornecidas por alguns autores [16, 18]. Entretanto, estimativas de custo usadas nestas funções podem fornecer erros grosseiros. Isto porque estas funções foram estimadas usando-se custos de SR das mais variadas características e tamanhos. A segunda possibilidade, e a que foi adotada neste trabalho, é o uso do seguinte critério:

- dado um SR com os valores do comprimento (L) e diâmetro (D) da tubulação, altura geométrica ( $H_G$ ) e vazão (Q) procura-se a classe de bombas mais adequadas<sup>3</sup> e seus respectivos preços (inclusive motor e instalações elétricas). A partir destes dados se faz uma regressão, que na maioria dos casos é linear, a qual fornece uma relação custo versus potência que se ajusta melhor às estimativas de custo.

<sup>3</sup>Para a escolha da bomba mais adequada (melhor rendimento para uma determinada vazão e altura manométrica) pode-se usar o conceito de rotação específica ou número de Brauer [1,9] que é calculado pela expressão:

$$n_s = \frac{n \cdot Q^{1/2}}{H_m^{3/4}} \quad (3.1)$$

onde:

n - é o número de rotações do motor [rpm],  
 Q - é a vazão [ $m^3/s$ ],  
 $H_m$  - é a altura manométrica [m], e  
 $n_s$  - é a rotação específica [rpm].

Conforme o valor obtido para  $n_s$ , fica caracterizado o melhor tipo de bomba a ser usada no sistema.

c) São conhecidos o comprimento da tubulação, a altura geométrica e a estimativa da demanda ao longo do período de projeto. Aqui, cabe salientar que apesar da demanda ser uma variável aleatória, ela poderá não ser tratada como tal.

Mais especificamente, estabelecendo-se a confiabilidade exigida pelo sistema em, por exemplo, 95% de possibilidade de atendimento da demanda, pode-se determinar os valores anuais que atendem a esta exigência. Assim, para a determinação de conjuntos viáveis, utiliza-se esta estimativa, enquanto que para o cálculo dos custos de energia utiliza-se a estimativa de demanda média.

## 3.2 - MODELAGEM DO PROBLEMA

### 3.2.1 - Definições

A seguir são definidos os elementos necessários à formulação do problema:

- i) Seja  $K$  o conjunto dos índices que identificam os diâmetros comerciais de tubo;
- ii) Seja  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_m\}$  o conjunto de todas as configurações viáveis, isto é, que atendem a demanda, do SR em apreço;

iii) Sejam os parâmetros:

$C_t$  - o consumo máximo para um dado grau de confiabilidade exigido para o projeto no  $t$ -ésimo período [ $m^3$ /dia];

$\bar{C}_t$  - o consumo médio de água no  $t$ -ésimo período [ $m^3$ /dia];

VUT - a vida útil da tubulação [ano];

VUB - a vida útil do conjunto motor-bomba [ano];

HPL - o horizonte de planejamento [ano];

$D_k$  - o diâmetro interno do tubo tipo  $k$ , onde  $k \in K$  [m];

$V_{\max}$  - a velocidade máxima admissível do líquido no tubo tipo  $k$  [m/s]; e

$h$  - o número máximo de horas de funcionamento diário para o conjunto motor-bomba;

iv) Seja  $x_i, x_i \in X$ , uma configuração para o SR, caracterizada pelos parâmetros:

$t_{x_i}$  - a data em que a configuração  $x_i$  se encontra;

$IT_{x_i}$  - a idade da tubulação da configuração  $x_i$ ;

$IB_{x_i}$  - a idade do conjunto motor-bomba da configuração  $x_i$ ;

$k_{x_i}$  - o índice que identifica o diâmetro do tubo que compõe a configuração  $x_i$ ;

$d_{x_i}$  - a última data em que o conjunto motor-bomba, da configuração  $x_i$ , pode atender a demanda exigida; e

$N_{x_i}$  - a potência do conjunto motor-bomba da configuração  $x_i$ .

### 3.2.2 - Modelo Proposto

Para resolver o problema de obter uma política ótima de ampliação de SR, far-se-á o uso de um grafo  $G(X, \Gamma)$ , onde  $X$  é o conjunto de vértices que representam as configurações viáveis para o sistema e  $\Gamma$  é a relação de correspondência que determina as transformações que o sistema poderá sofrer ao longo do tempo.

A fim de que as restrições de velocidade máxima ( $V_{\max_k}$ ) na tubulação de diâmetro  $D_k$  sejam satisfeitas numa data  $t$  qualquer, um conjunto  $K^t$ ,  $K^t \subset K$  de diâmetro comerciais poderá ser utilizado.

Este subconjunto de  $K$  poderá ser representado por:

$$K^t = \left\{ k \in K \mid \frac{C_t}{900\pi h D_k^2} \leq V_{\max_k} \right\} \quad (3.2)$$

isto é, qualquer tubo de diâmetro  $D_k$  com  $k \in K^t$  será viável na data  $t$ .

Dependendo da potência do conjunto motor-bomba associado ao tubo tipo  $k \in K^t$ , o sistema poderá suprir a demanda por 1, 2, 3, ...,  $n$  anos além da data  $t$  em questão.

Entretanto,  $n$  não pode ultrapassar os seguintes limites:

a) O horizonte de planejamento do projeto, isto é,

$$n \leq \text{HPL} - t$$

b) O tempo de vida útil do conjunto motor-bomba, ou seja,

$$n \leq \text{VUB} - \text{IB}_{x_i}$$

Isto equivale a dizer que não será projetado um conjunto motor-bomba para atender uma demanda superior à prevista até o horizonte de planejamento do projeto, nem tão pouco superior à vida útil restante do conjunto motor-bomba.

Assim sendo, uma configuração  $x_i \in X$ , viável para o problema numa data  $t_{x_i}$ , será definida por qualquer combinação de tubo  $k_{x_i} \in K^{t_{x_i}}$  e uma data  $t_{x_i} \leq d_{x_i} \leq t_{x_i} + n_{x_i}$  à qual está associada uma determinada potência do conjunto motor-bomba.

A relação de correspondência  $\Gamma$ , que determina as decisões viáveis de ampliação do SR a partir de uma configuração  $x_i \in X$  qualquer, é definida para duas situações distintas:

$$\text{i) } d_{x_i} > t_{x_i}$$

$$\text{ii) } d_{x_i} = t_{x_i}$$

O caso (i) equivale à situação em que a configuração  $x_i$  poderá ser mantida por, pelo menos, mais um período.

Neste caso  $\Gamma(x_i) = \{x_j\}$ , onde:

$$t_{x_j} = t_{x_i} + 1$$

$$\text{IT}_{x_j} = \text{IT}_{x_i} + 1$$



$$IB_{x_j} = IB_{x_i} + 1$$

$$k_{x_j} = k_{x_i}$$

$$d_{x_j} = d_{x_i}$$

$$N_{x_j} = N_{x_i}$$

O caso (ii) equivale à situação em que a configuração  $x_i$  não poderá ser utilizada no período seguinte, por pelo menos um dos motivos abaixo:

- a) A capacidade (e a vida útil) do conjunto motor-bomba foi esgotada;
- b) A vida útil do tubo foi esgotada;
- c) O tubo já não tem capacidade ( $V \geq V_{\max}$ ) para atender a demanda.

Neste caso o conjunto de sucessores de  $x_i$ , denotado por  $\Gamma(x_i)$  será composto por todas as configurações  $x_j$  que satisfaçam as condições abaixo:

$$t_{x_j} = t_{x_i} + 1$$

$$k_{x_j} \in K^{t_{x_j}} \cap \{k \in K \mid D_k \geq D_{k_{x_i}}\}$$

$$IT_{x_j} = \begin{cases} IT_{x_i} + 1 & \text{se } k_{x_i} = k_{x_j} \text{ e } IT_{x_i} < VUT \\ 1 & \text{caso contrário (troca de tubo)} \end{cases}$$

$$t_{x_j} \leq d_{x_j} \leq t_{x_j} + n_{x_j}$$

$$N_{x_j} = \begin{cases} N_{x_i} & \text{se } N_{x_i} > N^* \text{ e } IB_{x_i} + d_{x_j} - t_{x_i} \leq VUB \\ N^* & \text{caso contrário (troca de bomba)} \end{cases}$$

$$IB_{x_j} = \begin{cases} IB_{x_i} + 1 & \text{se } N_{x_j} = N_{x_i} \text{ e } IB_{x_i} + d_{x_j} - t_{x_i} \leq VUB \\ 1 & \text{caso contrário (troca de bomba)} \end{cases}$$

onde  $N^*$  é calculado pela expressão 2.11, do capítulo anterior, tendo como parâmetros o diâmetro  $D_{k_j}$  e o consumo  $C_{d_{x_j}}$ , na determinação de  $Q$  e  $H_m$ .

### 3.2.3 - Custos Associados ao Modelo

A cada decisão de ampliação ( $x_i \rightarrow x_j$ ), onde  $x_j \in \Gamma(x_i)$ , tem-se associado um custo total  $CT_{x_i x_j}$ , que é composto pelas seguintes parcelas:

- a)  $CAB_{x_j}$  - Custo de aquisição e instalação do conjunto de recalque associado ao vértice  $x_j$ . Este custo é determinado através da regressão custo=f (potência) mencionada anteriormente. Nele estão incluídos os custos do motor, bomba e instalações elétricas;
- b)  $CAT_{x_j}$  - Custo de aquisição e instalação da adutora da configuração  $x_j$ . Aqui não estão sendo considerados os custos de peças especiais (válvulas de retenção, registros, etc) devido sua pequena representatividade nos custos totais da tubula-

ção [12];

c)  $VRB_{x_i}$  - Valor residual do conjunto de recalque representado pelo vértice  $x_i$  na data  $t_{x_i}$ . Para o cálculo deste valor pode ser utilizado qualquer um dos métodos de depreciação. Neste trabalho optou-se pela depreciação através da soma dos dígitos;

d)  $VRT_{x_i}$  - Valor residual do tubo representado pelo vértice  $x_i$  na data  $t_{x_i}$ ;

e)  $CM_{x_j}$  - Custo de manutenção do SR (conjunto de recalque + tubulação) representado pelo vértice  $x_j$ , na data  $t_{x_j}$  ao longo do ano  $t_{x_j}$ .

Este custo foi calculado como  $f$  vezes o custo de aquisição do conjunto de recalque e tubulação. Nos exemplos aqui analisados, adotou-se  $f=0,05$ ,<sup>4</sup> ou seja, o custo de manutenção foi igual a 5%, gastos anualmente, do valor de aquisição dos equipamentos.

f)  $CO_{x_j}$  - Custo de operação do SR representado pelo vértice  $x_j$ , ao longo do ano  $t_{x_j}$ .

É considerado aqui apenas o gasto com energia elétrica, pois outras parcelas do custo de operação, como salários, encargos sociais, etc.,

<sup>4</sup>Em sistemas de Recalque convencionais, o valor adotado na prática é em torno de 5%.

variavam muito pouco dentro da faixa de diâmetros comerciais e de potência dos conjuntos elevatórios.

A energia poderá ser fornecida em baixa tensão (para SR com potência até 200 CV), onde haverá apenas custo de consumo de energia, sendo este computado em Cr\$/KWh, ou em alta tensão, quando se considera também o custo de demanda de energia que é computado em Cr\$/KW mês, sendo fixo para uma determinada potência.

O preço médio da energia, sem tributos, é determinado pela seguinte expressão [3]:

$$PM = \frac{TD}{730 \times FC} + TC, \quad (3.3)$$

onde:

PM - é o preço médio da energia consumida [Cr\$/KWh];  
 TD - é a tarifa vigente da demanda [Cr\$/KW mês];  
 TC - é a tarifa vigente do consumo [Cr\$/KWh]; e  
 FC - é o fator de carga mensal do consumidor, seu valor depende, entre outros, do critério de cobrança de demanda por parte da concessionária local e pode variar entre 0 e 1.

Observe que o valor 730 corresponde ao número de horas em um mês médio (30,4 dias).

A partir do preço médio da energia elétrica obtém-se o custo de operação pela seguinte expressão:

$$CO_{x_j} = 0,736 \times N_j \times PM \times HORAS \quad (3.4)$$

onde:

HORAS - é o número de horas anuais de funcionamento do conjunto de recalque.

Nesta expressão, o fator 0,736 corresponde à transformação de uma unidade de cavalo-vapor em quilowatt-hora.

Assim, o custo de transformação será obtido como:

$$CT_{x_i, x_j} = CAB_{x_j} - VRB_{x_i} + CAT_{x_j} - VRT_{x_i} + CM_{x_j} + CO_{x_j}, \quad (3.5)$$

sendo que nos casos em que não houver a troca de conjunto de recalque ou tubos, as parcelas correspondentes não serão computadas.

Considerando o grafo e os custos definidos anteriormente, o problema de se obter uma política ótima de ampliação de SR consiste em determinar uma sequência de configurações:

$$\mu^* = (x_{k_0}, x_{k_1}, x_{k_2}, \dots, x_{k_{T-1}}, x_{k_T}), \text{ tal que:}$$

$$VP_{\mu^*} = \min_{\mu \in G} VP_{\mu} = \min_{\mu \in G} \left[ \sum_{s=0}^{T-1} \frac{CT_{x_{k_s}, x_{k_{s+1}}}}{(1+r)^s} \right] \quad (3.6)$$

onde:

$VP_{\mu}$  - é o valor presente da alternativa  $\mu$ ;

$r$  - é a taxa de juros considerada no projeto;

- $x_{k_0}$  - é a configuração inicial do SR; e
- $x_{k_T}$  - e a configuração terminal do SR, caracterizada por  $t_{x_{k_T}} = \text{HPL}$ .

### 3.3 - ALGORÍTMO UTILIZADO

Para a solução do problema formulado na seção 3.2 foi utilizado o algoritmo de busca em grafos conhecido por A\* [14], o qual é descrito a seguir.

Na descrição do algoritmo é usada a seguinte nomenclatura:

- $x_i, x_j$  - vértices genéricos, sendo que  $x_j \in \Gamma(x_i)$ ;
- A, F - conjunto de nós abertos e fechados, respectivamente;
- S, T - conjunto de nós iniciais e finais, respectivamente;
- P - vetor de apontadores;
- $\hat{g}_{x_j}$  - valor dos custos acumulados até o vértice  $x_j$ ;
- $VP_{x_j}$  - valor do patrimônio da configuração  $x_j$ . Por patrimônio entende-se o valor residual dos equipamentos (conjunto motor-bomba, instalações elétricas e tubulação);
- $\hat{h}_{x_j}$  - heurística utilizada, determinada pela diferença entre  $\hat{g}_j$  e  $VP_{x_j}$ ;

$C_{x_i x_j}$  - custo de transformação associado ao arco  $(x_i, x_j)$ ;

$r$  - taxa anual de juros.

Algoritmo:

Passo 1:

Inicialização:

$$A \leftarrow x_0 \in S \quad \hat{g}_0 \leftarrow 0 \quad IT_{x_0} \leftarrow 0$$

$$P_{x_0} \leftarrow 0 \quad \hat{h}_{x_0} \leftarrow 0 \quad IB_{x_0} \leftarrow 0$$

$$T_{x_0} \leftarrow 0 \quad D_{k_{x_0}} \leftarrow 0$$

$$k_{x_0} \leftarrow 0 \quad d_{x_0} \leftarrow 0$$

Passo 2:

Se  $A = \emptyset$ , pare com fracasso.

Caso contrário, escolha  $x_i \in A \mid \hat{h}_{x_i} = \min_{x_j \in A} \hat{h}_{x_j}$

Se  $x_i \in T$ , vá ao passo 5.

Passo 3:

Gere  $\Gamma(x_i)$ ;  $A \leftarrow A - \{x_i\}$ ,  $F \leftarrow F \cup \{x_i\}$

Para cada  $x_j \in \Gamma(x_i)$ , faça:

a) Se  $x_j \in A \cup F$ ,  $A \leftarrow A \cup \{x_j\}$ .

$$P_{x_j} \leftarrow x_i$$

$$\hat{g}_{x_j} \leftarrow (\hat{g}_{x_i} + C_{x_i x_j}) \cdot (1 + r)$$

$$\hat{h}_{x_j} \leftarrow \hat{g}_{x_j} - VP_{x_j}$$

b) Se  $x_j \in A$ ,  $x'_j \leftarrow x_j$ ,  $A \leftarrow A \cup \{x'_j\}$

$$P_{x'_j} \leftarrow x_i$$

$$\hat{g}_{x'_j} \leftarrow (\hat{g}_{x_i} + C_{x_i x'_j}) \cdot (1 + r)$$

$$\hat{h}_{x'_j} \leftarrow \hat{g}_{x'_j} - VP_{x'_j}$$

Se  $\hat{h}_{x'_j} < \hat{h}_{x_j}$ ,  $A \leftarrow A - \{x_j\}$

Se  $\hat{h}_{x'_j} > \hat{h}_{x_j}$ ,  $A \leftarrow A - \{x'_j\}$

c) Se  $x_j \in F$ , tome outro sucessor de  $x_j$ .

Passo 4:

Volte ao passo 2.

Passo 5:

$A \leftarrow A - \{x_i\}$ ,  $F \leftarrow F \cup \{x_i\}$ .

Recupere a solução ótima percorrendo o caminho inverso dos apontadores  $P_{x_j}$ :

$x_j, P_{x_j}, P_{P_{x_j}}, \dots, x_0$ .

Pare com sucesso.



### 3.4 - CONCLUSÃO

Neste capítulo o problema de encontrar a política ótima de implantação e/ou expansão de SR foi formulado como um problema de busca em grafo. Esta abordagem se justifica por ser o problema em questão não linear, envolvendo variáveis inteiras (isto é, discretas) e envolvendo a tomada de decisões sucessivas.

A seguir far-se-á uso da metodologia apresentada neste capítulo para a resolução de um problema real.

## C A P Í T U L O    I V

## APLICAÇÃO PRÁTICA

## 4.1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo, a determinação da política de implantação de um sistema de recalque para um caso real é apresentada. Os resultados obtidos através do uso do modelo proposto são comparados com os obtidos através da metodologia tradicional para o exemplo apresentado.

## 4.2 - APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

O exemplo escolhido é o de um anteprojeto de abastecimento de água da cidade de Concórdia - SC.

Os dados referentes ao problema são os seguintes:

a) horizonte de planejamento (HPL);

- Considerou-se como horizonte de planejamento o período de 20 anos.

b) consumo anual de água (C);

- O consumo de água foi calculado em função do crescimento da população previsto ao longo do horizonte de planejamento. Foi considerado um consumo per capita de 150 litros/habitante/dia. Na tabela 4.1 é apresentado o consumo médio

anual e o consumo máximo anual previsto ao longo do horizonte de planejamento.

O consumo máximo é obtido multiplicando-se o consumo médio pelo coeficiente do dia de maior consumo (estabelecido por normas estaduais ou regionais).

Observe que os dados de população obtidos do anteprojeto referem-se a somente quatro dos vinte anos do período de planejamento (anos: 5, 10, 15 e 20). Os dados intermediários foram obtidos por interpolação.

c) comprimento da tubulação (L);

4640 metros<sup>5</sup>

d) desnível geométrico (HG);

157 metros

e) coeficiente de perda de carga localizada (K);

- As perdas de carga localizadas ao longo da tubulação e na casa de bombas foram consideradas como sendo iguais a  $10v^2/2g$  ( $k=10$ ), diante do número e tipo de peças especiais que normalmente são utilizadas.

f) rendimento do conjunto de recalque ( $\eta$ );

65%

g) funcionamento máximo diário da adutora;

24 horas

<sup>5</sup>No comprimento da tubulação está incluído o trecho de recalque e o de sucção.

Tabela 4.1 - Consumo anual de água

ANO	CONSUMO MÉDIO (m <sup>3</sup> /dia)	CONSUMO MÁXIMO (m <sup>3</sup> /dia)	POPULAÇÃO
1	2.916,60	3270,65	19.444
2	3.113,40	2491,34	20.756
3	3.223,40	3726,83	21.489
4	3.547,50	3978,14	23.650
5	3.786,90	4246,60	25.246
6	3.993,75	4478,56	26.625
7	4.212,15	4723,47	28.081
8	4.442,40	4981,67	29.616
9	4.685,10	5253,83	31.234
10	4.941,15	5540,97	32.941
11	5.188,20	5818,01	34.588
12	5.447,55	6108,84	36.317
13	5719,95	6414,31	38.133
14	6006,00	6735,08	42.040
15	6306,30	7071,84	42.042
16	6590,10	7390,09	43.934
17	6886,65	7722,64	45.911
18	7196,55	8070,16	47.977
19	7520,40	8433,32	50.136
20	7858,80	8812,80	52.392

Anteprojeto de abastecimento de água da cidade de  
Concórdia - SC (CASAN)

- h) vida útil dos equipamentos;
- Conjunto elevatório (VUB): 20 anos
  - Tubulação (VUT): 30 anos.
- i) rugosidade da tubulação (e);  
(ferro dúctil série k-9)  
0,0006 metros
- j) custos (referentes ao mês de outubro/85);
- Energia elétrica  
Tarifa de demanda: Cr\$ 30.525,14/KW instalado  
Tarifa de consumo: Cr\$ 109,80/KWh
  - tubos (ferro dúctil série k-9):

DIÂMETRO (metros)	VELOCIDADE MÁXIMA (metros/seg.)	PREÇO (Cr\$/metro)
0,200	2,30	201,000
0,250	2,40	257,000
0,300	2,45	365,000
0,400	2,60	605,000
0,500	2,85	855,000

- Conjunto de recalque:  
nos custos de instalação elétrica estão incluídos os custos referentes aos transformadores de alta-tensão e ao quadro de comando. Não foram considerados os custos com a linha de transmissão, pois estes não variam com a potência.

Potência	Preço (cr\$)	
	Motor-bomba	Inst. Elétr.
100	74.000.000	111.000.000
120	84.000.000	126.000.000
150	106.000.000	159.000.000
175	123.000.000	184.000.000
200	146.000.000	219.000.000

- Custo anual de manutenção dos equipamentos:  
5% do valor dos equipamentos.
- Custo de implantação dos equipamentos:  
2% do valor dos equipamentos.
- Valor residual dos equipamentos:

O valor residual, tanto do conjunto de recalque quanto da tubulação, foi calculado baseado no método de depreciação da soma dos dígitos.

A carga total de depreciação a ser descontada do valor original do equipamento num ano genérico K é calculada pela expressão [8]:

$$D_k = C_o - \frac{C_o K (2N - K + 1)}{N(N + 1)}, \quad (4.1)$$

onde:

$C_o$  - é o valor original do equipamento;

$N$  - é a vida útil; e

$K$  - é um ano genérico.

Observa-se que aqui foi considerado nulo o valor residual do equipamento no fim de sua vida útil.

k) taxa anual de juros (r).

12% a.a.

Observe que os dados referentes à vida útil dos equipamentos (h), depreciação (j) e velocidade máxima nas tubulações (j) não são usados, normalmente, na metodologia tradicional. Porém, para fins de comparação com a metodologia proposta, onde estes dados são utilizados, eles também o foram na metodologia tradicional.

#### 4.3 - SOLUÇÃO DO PROBLEMA

##### 4.3.1 - Solução do Problema Usando o Modelo Proposto

Obtiveram-se várias soluções do problema em apreço, cada uma gerada a partir de diferentes critérios de depreciação dos equipamentos. O primeiro critério adotado foi o de supor que uma vez substituído um equipamento (conjunto motor-bomba e/ou tubulação) este não terá mais utilidade. Portanto seu valor na data de sua substituição será considerado nulo (depreciação total). A solução obtida é apresentada na tabela 4.2. Observa-se que a solução indica o uso da mesma tubulação e a troca do conjunto motor-bomba<sup>6</sup> nos anos 8 e 15.

<sup>6</sup>Observe-se que a cada etapa são trocados todos os conjuntos motor-bomba. Esta simplificação é, obviamente, também adotada na metodologia tradicional para efeito de comparação com os resultados obtidos pelo modelo proposto.

O segundo critério considera os equipamentos depreciados conforme o método da soma dos dígitos e com valor residual nulo no fim da vida útil dos equipamentos (equação (4.1)). A política ótima obtida com esta consideração é mostrada na tabela 4.3.

O terceiro critério foi depreciar os equipamentos parcialmente, ou seja, o valor encontrado pelo equação (4.1) é multiplicado por um fator entre 0 e 1. No caso, foram geradas duas soluções, uma usando o fator igual a 0,5 tanto para o conjunto motor-bomba como para a tubulação (tabela 4.4) e no outro exemplo testado os valores foram 0,7 e 0,8 respectivamente (tabela 4.5).

#### 4.3.2 - Solução do Problema Usando a Metodologia Tradicional

Utilizando-se a metodologia tradicional e implantando o sistema em uma etapa obteve-se os resultados da tabela 4.6.

Contudo, devido à taxa de crescimento anual da demanda de água ser bastante elevada e o SR ser de médio porte, é mais usual dividir o período de planejamento em duas etapas conforme foi realmente feito no ante-projeto do qual foram retirados os dados.

Os resultados obtidos com a divisão em duas etapas é mostrado na tabela 4.7.



OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS DE RECALQUE  
PLANO ÓTIMO DE EXPANSÃO

ANO	CONS MED	CONS MAX	CONS PROJ	DIAM	N.DE BOMB	POTÊNCIA	HORAS	MANUTENÇÃO	OPERAÇÃO	INVESTIMENTOS
1	2916.60	3270.65	4723.47	0.250	4	70.35	14.82	84696928.	157125584.	1727817980.
2	3113.40	3491.34	4723.47	0.250	4	70.35	15.82	84696928.	163681904.	0.
3	3223.40	3726.83	4723.47	0.250	4	70.35	16.38	84696928.	167346384.	0.
4	3547.50	3978.14	4723.47	0.250	4	70.35	18.02	84696928.	178143728.	0.
5	3786.90	4246.60	4723.47	0.250	4	70.35	19.24	84696928.	186119168.	0.
6	3993.75	4478.56	4723.47	0.250	4	70.35	20.29	84696928.	193010320.	0.
7	4212.15	4723.47	4723.47	0.250	4	70.35	21.40	84696928.	200286096.	0.
8	4442.40	4981.67	6735.08	0.250	4	117.28	15.83	101550704.	272991744.	855304960.
9	4685.10	5253.83	6735.08	0.250	4	117.28	16.70	101550704.	282445312.	0.
10	4941.15	5540.97	6735.08	0.250	4	117.28	17.61	101550704.	292418048.	0.
11	5188.20	5818.01	6735.08	0.250	4	117.28	18.49	101550704.	302040832.	0.
12	5447.55	6108.84	6735.08	0.250	4	117.28	19.41	101550704.	312142336.	0.
13	5719.95	6414.31	6735.08	0.250	4	117.28	20.38	101550704.	322752768.	0.
14	6006.00	6735.08	6735.08	0.250	4	117.28	21.40	101550704.	333894400.	0.
15	6306.30	7071.84	8812.80	0.250	4	184.50	17.17	125693248.	452580864.	1347813120.
16	6590.10	7390.09	8812.80	0.250	4	184.50	17.95	125693248.	465871104.	0.
17	6886.65	7722.64	8812.80	0.250	4	184.50	18.75	125693248.	479758592.	0.
18	7196.55	8070.16	8812.80	0.250	4	184.50	19.60	125693248.	494270976.	0.
19	7520.40	8433.32	8812.80	0.250	4	184.50	20.48	125693248.	509436928.	0.
20	7858.80	8812.80	8812.80	0.250	4	184.50	21.40	125693248.	525284352.	0.
VALOR RESIDUAL EQUIPAMENTO										
VALOR PRESENTE ACUMULADO										
								701921280.	1819029760.	2390506500.
VALOR PRESENTE TOTAL										
										4911456260.

TABELA 4.2

OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS DE RECALQUE  
PLANO ÓTIMO DE EXPANSÃO

ANO	CONS MED	CONS MAX	CONS PROJ	DIAM	N.DE BOMB	POTÊNCIA	HORAS	MANUTENÇÃO	OPERAÇÃO	INVESTIMENTOS
1	2916.60	3270.65	3491.34	0.250	4	48.12	20.05	76714464.	130937424.	1564975620.
2	3113.40	3491.34	3491.34	0.250	4	48.12	21.40	76714464.	137004976.	0.
3	3223.40	3726.83	3726.83	0.250	4	52.06	20.76	78130128.	145102880.	99194880.
4	3547.50	3978.14	3978.14	0.250	4	56.42	21.40	79694672.	160630704.	74569216.
5	3786.90	4246.60	4478.56	0.250	4	65.59	20.29	82989888.	179976496.	113480704.
6	3993.75	4478.56	4478.56	0.250	4	65.59	21.40	82989888.	186753456.	0.
7	4212.15	4723.47	4981.67	0.250	4	75.56	20.29	86568832.	207313744.	169144832.
8	4442.40	4981.67	4981.67	0.250	4	75.56	21.40	86568832.	215125680.	0.
9	4685.10	5253.83	5253.83	0.250	4	81.29	21.40	88626480.	231437776.	152834816.
10	4941.15	5540.97	5818.01	0.250	4	93.99	20.38	93188544.	258675520.	159910400.
11	5188.20	5818.01	5818.01	0.250	4	93.99	21.40	93188544.	267603280.	0.
12	5447.55	6108.84	6108.84	0.250	4	101.01	21.40	95707504.	287572224.	189480960.
13	5719.95	6414.31	6414.31	0.250	4	108.74	21.40	98483904.	309582080.	139802624.
14	6006.00	6735.08	6735.08	0.250	4	117.28	21.40	101550704.	333894400.	152125952.
15	6306.30	7071.84	7071.84	0.250	4	126.73	21.40	104945472.	360806400.	165884928.
16	6590.10	7390.09	7390.09	0.250	4	136.14	21.40	108326400.	387608832.	173426688.
17	6886.65	7722.64	7722.64	0.250	4	146.50	21.40	112046928.	417103104.	188146688.
18	7196.55	8070.16	8070.16	0.250	4	157.92	21.40	116148944.	449622016.	204504064.
19	7520.40	8433.32	8433.32	0.250	4	170.54	21.40	120679936.	485541632.	222709504.
20	7858.80	8812.80	8812.80	0.250	4	184.50	21.40	125693248.	525284352.	242991360.

VALOR RESIDUAL EQUIPAMENTO

1336586240.

VALOR PRESENTE ACUMULADO

651145728. 1624848640.

VALOR PRESENTE TOTAL

4420263940.

TABELA 4.3

OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS DE RECALQUE

PLANO ÓTIMO DE EXPANSÃO

ANO	CONS MED	CONS MAX	CONS PROJ	DIAM	N. DE BOMB	POTÊNCIA	HORAS	MANUTENÇÃO	OPERAÇÃO	INVESTIMENTOS
1	2916.60	3270.65	4478.56	0.250	4	65.59	15.63	82989888.	151463632.	1692994300.
2	3113.40	3491.34	4478.56	0.250	4	65.59	16.68	82989888.	157911152.	0.
3	3223.40	3726.83	4478.56	0.250	4	65.59	17.27	82989888.	161515008.	0.
4	3547.50	3978.14	4478.56	0.250	4	65.59	19.01	82989888.	172133328.	0.
5	3786.90	4246.60	4478.56	0.250	4	65.59	20.29	82989888.	179976496.	0.
6	3993.75	4478.56	4478.56	0.250	4	65.59	21.40	82989888.	186753456.	0.
7	4212.15	4723.47	5818.01	0.250	4	93.99	17.38	93188544.	232331088.	567887360.
8	4442.40	4981.67	5818.01	0.250	4	93.99	18.33	93188544.	240651648.	0.
9	4685.10	5253.83	5818.01	0.250	4	93.99	19.33	93188544.	249422384.	0.
10	4941.15	5540.97	5818.01	0.250	4	93.99	20.38	93188544.	258675520.	0.
11	5188.20	5818.01	5818.01	0.250	4	93.99	21.40	93188544.	267603280.	0.
12	5447.55	6108.84	7390.09	0.250	4	136.14	17.69	108326400.	340525312.	801732096.
13	5719.95	6414.31	7390.09	0.250	4	136.14	18.58	108326400.	351750912.	0.
14	6006.00	6735.08	7390.09	0.250	4	136.14	19.51	108326400.	363538688.	0.
15	6306.30	7071.84	7390.09	0.250	4	136.14	20.48	108326400.	375913472.	0.
16	6590.10	7390.09	7390.09	0.250	4	136.14	21.40	108326400.	387608832.	0.
17	6886.65	7722.64	8812.80	0.250	4	184.50	18.75	125693248.	479758592.	1069513470.
18	7196.55	8070.16	8812.80	0.250	4	184.50	19.60	125693248.	494270976.	0.
19	7520.40	8433.32	8812.80	0.250	4	184.50	20.48	125693248.	509436928.	0.
20	7858.80	8812.80	8812.80	0.250	4	184.50	21.40	125693248.	525284352.	0.

VALOR RESIDUAL EQUIPAMENTO

498401280.

VALOR PRESENTE ACUMULADO

685927424. 1756732930.

2333977860.

VALOR PRESENTE TOTAL

4776636420. 48

TABELA 4.4

OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS DE RECALQUE  
PLANO ÓTIMO DE EXPANSÃO

ANO	CONS MED	CONS MAX	CONS PROJ	DIAM.	N.DE BOMB	POTÊNCIA	HORAS	MANUTENÇÃO	OPERAÇÃO	INVESTIMENTOS
1	2916.60	3270.55	3978.14	0.250	4	56.42	17.60	79694672.	140615744.	1625772030.
2	3113.40	3491.34	3978.14	0.250	4	56.42	18.78	79694672.	146859072.	0.
3	3223.40	3726.83	3978.14	0.250	4	56.42	19.45	79694672.	150348720.	0.
4	3547.50	3978.14	3978.14	0.250	4	56.42	21.40	79694672.	160630704.	0.
5	3786.90	4246.60	4981.67	0.250	4	75.56	18.24	86568832.	192885776.	367700736.
6	3993.75	4478.56	4981.67	0.250	4	75.56	19.24	86568832.	199903904.	0.
7	4212.15	4723.47	4981.67	0.250	4	75.56	20.29	86568832.	207313744.	0.
8	4442.40	4981.67	4981.67	0.250	4	75.56	21.40	86568832.	215125680.	0.
9	4685.10	5253.83	6108.84	0.250	4	101.01	18.41	95707504.	259372976.	491803648.
10	4941.15	5540.97	6108.84	0.250	4	101.01	19.41	95707504.	268843008.	0.
11	5188.20	5818.01	6108.84	0.250	4	101.01	20.38	95707504.	277980160.	0.
12	5447.55	6108.84	6108.84	0.250	4	101.01	21.40	95707504.	287572224.	0.
13	5719.95	6414.31	7390.09	0.250	4	136.14	18.58	108326400.	351750912.	666372608.
14	6006.00	6735.08	7390.09	0.250	4	136.14	19.51	108326400.	363538688.	0.
15	6306.30	7071.84	7390.09	0.250	4	136.14	20.48	108326400.	375913472.	0.
16	6590.10	7390.09	7390.09	0.250	4	136.14	21.40	108326400.	387608832.	0.
17	6886.65	7722.64	8812.80	0.250	4	184.50	18.75	125693248.	479758592.	906244608.
18	7196.55	8070.16	8812.80	0.250	4	184.50	19.60	125693248.	494270976.	0.
19	7520.40	8433.32	8812.80	0.250	4	184.50	20.48	125693248.	509436928.	0.
20	7858.80	8812.80	8812.80	0.250	4	184.50	21.40	125693248.	525284352.	0.

VALOR RESIDUAL EQUIPAMENTO

711868416.

VALOR PRESENTE ACUMULADO

2303157500.

VALOR PRESENTE TOTAL

4688048130.

TABELA 4.5

METODOLOGIA TRADICIONAL  
(1 ETAPA)

ANO	CONS MED	CONS MAX	CONS PROJ	DIAM.	N.DE BOMB	POTÊNCIA	HORAS	MANUTENÇÃO	OPERAÇÃO	INVESTIMENTOS
1	2916.60	3270.65	8812.80	0.250	4	184.50	7.94	125693376.	293841664.	2564146180.
2	3113.40	3491.65	8812.80	0.250	4	184.50	8.48	125693376.	303057920.	0.
3	3223.40	3726.83	8812.80	0.250	4	184.50	8.78	125693376.	308209152.	0.
4	3547.50	3978.14	8812.80	0.250	4	184.50	9.66	125693376.	323386880.	0.
5	3786.90	4246.60	8812.80	0.250	4	184.50	10.31	125693376.	334597888.	0.
6	3993.75	4478.56	8812.80	0.250	4	184.50	10.88	125693376.	344284672.	0.
7	4212.15	4723.47	8812.80	0.250	4	184.50	11.47	125693376.	354512384.	0.
8	4442.40	4981.67	8812.80	0.250	4	184.50	12.10	125693376.	365295104.	0.
9	4685.10	5253.83	8812.80	0.250	4	184.50	12.76	125693376.	376660736.	0.
10	4941.15	5540.97	8812.80	0.250	4	184.50	13.46	125693376.	388651520.	0.
11	5188.20	5818.01	8812.80	0.250	4	184.50	14.13	125693376.	400220928.	0.
12	5447.55	6108.84	8812.80	0.250	4	184.50	14.84	125693376.	412366336.	0.
13	5719.95	6414.31	8812.80	0.250	4	184.50	15.58	125693376.	425122816.	0.
14	6006.00	6735.08	8812.80	0.250	4	184.50	16.36	125693376.	438518528.	0.
15	6306.30	7071.84	8812.80	0.250	4	184.50	17.17	125693376.	452581632.	0.
16	6590.10	7390.09	8812.80	0.250	4	184.50	17.95	125693376.	465872128.	0.
17	6886.65	7722.64	8812.80	0.250	4	184.50	18.75	125693376.	479759360.	0.
18	7196.55	8070.16	8812.80	0.250	4	184.50	19.60	125693376.	494272256.	0.
19	7520.40	8433.32	8812.80	0.250	4	184.50	20.48	125693376.	509437952.	0.
20	7858.80	8812.80	8812.80	0.250	4	184.50	21.40	125693376.	525285376.	0.
								938860032.	2676491010.	2564146180.
								VALOR PRESENTE ACUMULADO		
								VALOR PRESENTE TOTAL		
								6179495940.		

TABELA 4.6

METODOLOGIA TRADICIONAL  
(2 ETAPAS)

ANO	CONS MED	CONS MAX	CONS PROJ	DIAM.	N. DE BOMB	POTÊNCIA	HORAS	MANUTENÇÃO	OPERAÇÃO	INVESTIMENTOS
1	2916.60	3270.65	5540.97	0.250	4	87.61	12.63	90896416.	177828496.	1854287870.
2	3113.40	3491.65	5540.97	0.250	4	87.61	13.49	90896416.	184788944.	0.
3	3223.40	3726.83	5540.97	0.250	4	87.61	13.96	90896416.	188679440.	0.
4	3547.50	3978.14	5540.97	0.250	4	87.61	15.37	90896416.	200142256.	0.
5	3786.90	4246.60	5540.97	0.250	4	87.61	16.40	90896416.	208609392.	0.
6	3993.75	4478.56	5540.97	0.250	4	87.61	17.30	90896416.	215925296.	0.
7	4212.15	4723.47	5540.97	0.250	4	87.61	18.24	90896416.	223649648.	0.
8	4442.40	4981.67	5540.97	0.250	4	87.61	19.24	90896416.	231793168.	0.
9	4685.10	5253.83	5540.97	0.250	4	87.61	20.29	90896416.	240377120.	0.
10	4941.15	5540.97	5540.97	0.250	4	87.61	21.40	90896416.	249433024.	0.
11	5188.20	5818.01	8812.80	0.250	4	184.53	14.13	125704192.	400272896.	1348036610.
12	5447.55	6108.84	8812.80	0.250	4	184.53	14.83	125704192.	412419584.	0.
13	5719.95	6414.31	8812.80	0.250	4	184.53	15.58	125704192.	425177344.	0.
14	6006.00	6735.08	8812.80	0.250	4	184.53	16.36	125704192.	438574336.	0.
15	6306.30	7071.84	8812.80	0.250	4	184.53	17.17	126704192.	452639232.	0.
16	6590.10	7390.09	8812.80	0.250	4	184.53	17.95	125704192.	465931008.	0.
17	6886.65	7722.64	8812.80	0.250	4	184.53	18.75	125704192.	479819776.	0.
18	7196.55	8070.16	8812.80	0.250	4	184.53	19.60	125704192.	494334208.	0.
19	7520.40	8433.32	8812.80	0.250	4	184.53	20.48	125704192.	509501696.	0.
20	7858.80	8812.80	8812.80	0.250	4	184.53	21.40	125704192.	525350656.	0.
VALOR PRESENTE ACUMULADO								742268928.	1971718910.	2288321280.
VALOR PRESENTE TOTAL (FABO=0.0 FATU=0.0)										5002309118.
VALOR PRESENTE TOTAL (FABO=1.0 FATU=1.0)										4899063800.
VALOR PRESENTE TOTAL (FABO=0.7 FATU=0.8)										4928575015.
VALOR PRESENTE TOTAL (FABO=0.5 FATU=0.5)										4950686294.

TABELA 4.7

## 4.4 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

A tabela 4.8 apresenta o resumo dos resultados obtidos pelos dois métodos.

	Metodologia Tradicional (Cr\$ X 10 )	Metodologia Proposta (Cr\$ X 10 .)	Economia
depreciação total	6.179 <u>uma etapa</u> 5.002 duas etapas	4.911	20,5 % <u>1,8 %</u>
depreciação pela soma dos dígitos - fator 1.0	4.899	4.420	9,8%
depreciação pela soma dos dígitos - fator 0.5	4.951	4.777	3,5 %
depreciação pela soma dos dígitos - fator 0.7 para conjunto motor-bomba - fator 0.8 para tubulação	4.929	4.688	4,9 %

Tabela 4.8 - Valor Presente dos resultados obtidos pela duas metodologias

#### 4.5 - CONCLUSÕES

Observa-se, nos resultados obtidos para o exemplo prático apresentado, que a adoção de diferentes critérios de depreciação dos equipamentos, principalmente do conjunto motor-bomba, influencia o custo total do sistema.

Cada problema exige que se adote um critério específico, dependendo da predisposição e da possibilidade de se reutilizar os equipamentos em outros SR.

Como regra geral, SR de pequeno porte são mais facilmente reaproveitados, tendo em vista a frequência com que estes sistemas ocorrem. SR de maior porte têm utilização mais restrita, e são, na maioria das vezes, fabricados sob encomenda, sendo que o primeiro critério utilizado no item 4.3.1 seria, possivelmente o mais adequado para este último caso.



## C A P Í T U L O    V

## CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

## 5.1 - CONCLUSÕES

O modelo proposto neste trabalho, onde o objetivo foi encontrar uma política ótima de expansão de Sistemas de Recalque a nível de anteprojeto, mostrou que é sempre possível obter uma solução, se não melhor, pelo menos igual às soluções obtidas pelos métodos tradicionais. Este fato é evidente dado que as soluções obtidas pelos métodos tradicionais pertencem ao conjunto de soluções viáveis analisado no modelo. Saliencia-se que em SR de pequeno porte, onde sua implantação se dá, geralmente, em uma só etapa, o uso deste método poderá proporcionar economias consideráveis, dependendo da relação entre as necessidades previstas para o fim do horizonte de planejamento e as de início de funcionamento.

Outra vantagem no uso desta metodologia é a possibilidade de se efetuar uma análise de sensibilidade envolvendo os parâmetros adotados, pois alterações na taxa de juros, vida útil dos equipamentos, depreciação dos equipamentos, custos de manutenção, rendimento do conjunto de recalque, etc., podem alterar significativamente a política de expansão adotada.

Além do mais, o modelo proporciona uma grande flexibilidade frente a mudanças eventuais na projeção da demanda, isto é, cada etapa de implantação e/ou ampliação do sistema, o plano ótimo poderá ser reavaliado tendo em vista os novos dados de

crescimento da demanda, entre outros. Isto permite que se tome, en tão, medidas mais adequadas à nova situação. Além disto, a metodologia apresentada é suficientemente genérica para poder ser aplicada em outros tipos de sistemas de recalque (oleodutos para transporte de petróleo, por exemplo).

## 5.2 - RECOMENDAÇÕES E FUTUROS TRABALHOS

Sugere-se, para aprofundar este trabalho, uma análi se mais detalhada em relação aos custos envolvidos no modelo. Prin cipalmente os custos de manutenção do sistema, que aqui foram considerados como sendo um percentual fixo dos custos dos equipamentos.

Um estudo detalhado, tendo em vista a reutilização dos equipamentos, principalmente o conjunto de recalque, em outros sistemas, possibilitaria uma melhor estimativa do valor residual dos equipamentos e uma definição mais consistente da política ôti ma.

Recomenda-se, ainda, dentro da gama de combinações pesquisadas pelo programa computacional, a possibilidade de ampliação de SR através de tubulações em paralelo.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] - Azevedo Netto, J.M., "Manual de Hidráulica", edit. Edgard Blücher Ltda., São Paulo, 1976.
  
- [2] - Bowker, A.H., and Lieberman, G.J., "Engineering Statistics", Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 1972.
  
- [3] - Celesc, "Fator de Potência", Publicação Interna, Florianópolis, 1981.
  
- [4] - CETESB, "Técnica de Abastecimento e Tratamento de Água, São Paulo, 1976.
  
- [5] - CETESB, "Bombas e Sistemas de Recalque", São Paulo, 1974.
  
- [6] - Cristofides, N., "Graph Theory: An Algorithmic Approach", Academic Press, London, 1978.
  
- [7] - Deb, A.K., "Optimization of Pumping Stations", Journal of the Environmental Engineering Division, ASCE, Vol. 104, N° EE1, Fev. 1978.
  
- [8] - Faro, C., "Engenharia Econômica - Elementos", Apec Editora S.A., Rio de Janeiro, 1972.

- [ 9] - Macintyre, A.J., "Bombas e Instalações de Bombeamento", Ed. Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1980.
- [10] - Magnani, J.R., "Determinação do Diâmetro Econômico de Adutoras e Emissários por Recalque", Revista DAE, São Paulo, nº 113, 1979.
- [11] - Nemhauser, G., "Introduction to Dynamic Programming", John Willey, New York, 1966.
- [12] - Neves, E.T., "Curso de Hidráulica", Editora Globo, Porto Alegre, 1969.
- [13] - Ninow, J.L, "Um Modelo Matemático para Otimizar Redes de Abastecimento de Água", Dissertação de Mestrado, UFSC, Maio de 1980.
- [14] - Nilsson, N.J. "Problem - Solving Methods in Artificial Intelligence", MacGraw-Hill, Inc., New York, 1971.
- [15] - Olorunniwo, F.O., and Jensen, P.A., "National Gas Transmission System Optimization", Transportation Engineering Journal, ASCE, vol. 108, nº TE6, November, 1982.
- [16] - Ramos, F., "Capacity Expansion of Regional Urban Water Supply Networks", PhD Thesis, M.I.T., U.S.A., Jan. 1981.
- [17] - Richter, C.A. "Diâmetro Econômico das Canalizações de Recalque", Revista DAE, nº 133, 1983.

- [18] - Richter, C.A. "Estimativa de Custo de Obras de Abastecimento de Água", publicação interna, SANEPAR, Curitiba, 1978.

APÊNDICE I - LISTAGEM DO PROGRAMA



FILEO PUMP4 FORTRAN AI VM/SP REL 3.1 SLU 306

```

* CTUND(5000), CRUNGH(5000), POTNOH(5000), HCH(5000), PUM00560
* GCH(5000), CONS(30), CONSMX(30), DIAM(10), PUM00570
* CUSTU(10), VMAX(10), PRECO(20), POTEN(20), PUM00580
* $ENER, RM, C, PUM00590
* L, HG, FVA, T, PUM00600
* A, B, PMIN, PMAX, PUM00610
* FATU, $XENER, I(5000), PUM00620
* IND(5000), IDTUB(5000), PUM00630
* K(5000), ID(5000), P(5000), NBONOH(5000), PUM00640
* KTUJO, HPL, NN, VUTLBO, PUM00650
* VUTLTU, N, NBOMAX, PUM00660
* PUM00670
* PUM00680

```

```

REAL*4
* CRONDH, POTNOH, HCH, PUM00690
* GCH, CONS, CONSMX, DIAM, PUM00700
* CUSTU, VMAX, PRECO, POTEN, PUM00710
* $ENER, RM, E, PUM00720
* L, HG, FVA, T, PUM00730
* A, B, PMIN, PMAX, PUM00740
* FATU, $XENER, PUM00750
* PUM00760
* PUM00770
* PUM00780
* PUM00790
* PUM00800
* PUM00810
* PUM00820
* PUM00830
* PUM00840
* PUM00850
* PUM00860
* PUM00870
* PUM00880
* PUM00890
* PUM00900
* PUM00910
* PUM00920
* PUM00930
* PUM00940
* PUM00950
* PUM00960
* PUM00970
* PUM00980
* PUM00990
* PUM01000
* PUM01010
* PUM01020
* PUM01030
* PUM01040
* PUM01050
* PUM01060
* PUM01070
* PUM01080
* PUM01090
* PUM01100

```

```

* P, NBONOH, D, PUM00770
* HPL, VUTLBO, P, NBONOH, D, PUM00780
* N, NBOMAX, NN, VUTLBO, P, NBONOH, D, PUM00790
* I, P, NBONOH, D, PUM00800
* V, KKK, V, KKK, I, P, NBONOH, D, PUM00810
* IFLAG, IFLAG, I, P, NBONOH, D, PUM00820
* IFLAG, IFLAG, NN, VUTLBO, P, NBONOH, D, PUM00830
* IFLAG, IFLAG, NBOMAX, P, NBONOH, D, PUM00840

```

```

C**** INICIALIZACAO DE VARIAVEIS
CALL SYMIR
IFLAG=0
NVEI
IND(1)=1
D(1)=0
I(1)=0
P(1)=0
HCH(1)=0
GCH(1)=0
K(1)=0
IDTUB(1)=0
ID(1)=0
NBONOH(1)=0
POTNOH(1)=0
CTUNGH(1)=0
CRUNGH(1)=0

```

```

C** LEITURA DE DADOS
READ (5,10) HG,L,$ENER,$XENER,T,TAX,HPL
READ (5,20) ((CONS(J),CONSMX(J)),J=1,HPL)
READ (5,30) RM,FAUO,VUTLBO,NBOMAX,N
READ (5,40) (POTEN(J),PRECO(J),J=1,N)
READ (5,50) VUTLTU,KTUJO,FATU,E
READ (5,50) ((DIAM(J),VMAX(J),CUSTU(J)),J=1,KTUJO)

```



C\*\* VERIFICACAO DA COMPATIBILIDADE DOS DADOS

```

C
DO 1 IJ=1,MPL
  KJ=HPL+1-IJ
  Q=CONSMX(KJ)/(T*3600)
  VEL=4*Q/(3.141592*DIAM(KTUBO)*DIAM(KTUBO))
  IF (VEL-VMAX(KTUBO))1,1,5
  
```

1

CONTINUE

```

C
TAXMES=(1+TAX)**(1./12.)-1
FVA=((1+TAXMES)**12-1)/(TAXMES*(1+TAXMES)**12)
CALL REGRE
CALL BUSCA (V)

```

KKKEY

CALL IMPRII (KKK)

CALL TIMER (TCPU)

WRITE(6,80) TCPU

STOP

5 WRITE(6,70)

CALL TIMER (TCPU)

WRITE (6,80) TCPU

STOP

10 FORMAT(4(20X,F9.2,/),30X,F7.1/,30X,F7.3/,34X,F3.7/)

20 FORMAT(30X,F8.2,5X,F8.2)

30 FORMAT(/,2(30X,F7.3/),3(30X,F7.7/))

40 FORMAT(20X,F9.1,F12.0)

50 FORMAT(/,2(30X,F7.7/),30X,F7.3/,29X,F8.5/)

60 FORMAT(14X,F5.3,10X,F4.2,15X,F8.0)

70 FORMAT(1X,'PROBLEMA SEM SOLUCAO DADOS INCOMPATIVES')

80 FORMAT(/,49X,'TEMPO DE CPU =',50X,F10.2)

END

C\*\*\*\*\*  
 C\*\* SUBROTINA BUSCA.  
 C\*\* REALIZA A BUSCA DE NOHS NO GRAFO  
 C\*\*\*\*\*  
 SUBROUTINE BUSCA(V)  
 COMMON  
 CTUNCH(5000), CBONOH(5000), POTNOH(5000), HCH(5000),  
 SCH(5000), CONS(30), CONSMX(30), DIAM(10),  
 CUSTU(10), VMAX(10), PRECO(20), POTEN(20),  
 SENER, RM, E,  
 L, HG, FVA, T,  
 A, B, PMIN, PMAX,  
 FATU, \$XENER, I(5000),  
 IND(5000), IDTUB(5000), P(5000),  
 K(5000), ID(5000), NN,  
 KTUBO, HPL, NBDMAX  
 VUTLTU, N,  
 REAL\*4  
 CTUNOH,  
 GCH,  
 CUSTU,  
 SENER,  
 L,  
 CTUNOH,  
 CONS,  
 VMAX,  
 TAX,  
 HG,  
 HCH,  
 DIAM,  
 POTEN,  
 L,  
 T,  
 PUM01110  
 PUM01120  
 PUM01130  
 PUM01140  
 PUM01150  
 PUM01160  
 PUM01170  
 PUM01180  
 PUM01190  
 PUM01200  
 PUM01210  
 PUM01220  
 PUM01230  
 PUM01240  
 PUM01250  
 PUM01260  
 PUM01270  
 PUM01280  
 PUM01290  
 PUM01300  
 PUM01310  
 PUM01320  
 PUM01330  
 PUM01340  
 PUM01350  
 PUM01360  
 PUM01370  
 PUM01380  
 PUM01390  
 PUM01400  
 PUM01410  
 PUM01420  
 PUM01430  
 PUM01440  
 PUM01450  
 PUM01460  
 PUM01470  
 PUM01480  
 PUM01490  
 PUM01500  
 PUM01510  
 PUM01520  
 PUM01530  
 PUM01540  
 PUM01550  
 PUM01560  
 PUM01570  
 PUM01580  
 PUM01590  
 PUM01600  
 PUM01610  
 PUM01620  
 PUM01630  
 PUM01640  
 PUM01650

C

```

*    A,                    B,                    PMIN,                    PMAX,
*    FATU,                FABO,                $XENER               
*    INTEGER*2           
*    IND,                IDTUB,                I,                    D,
*    K,                    ID,                    P,                    NBONOH,
*    KTUBO,                HPL,                    NN,                    VUTLBO,
*    VUTLTJ,              N,                    NBOMAX               
*    INTEGER*2            V

```

```

C
C**    INICIO
C**    1    HCHOT=1.0E+30
      V=0
      DO 2 J=1,NN
          IF((IND(J).NE.1).OR.(HCH(J).GE.HCHOT)) GO TO 2
          V=J
          HCHOT=HCH(J)

```

```

2    CONTINJE
      IND(V)=0
      IF(D(V).EQ.HPL) RETURN
      CALL GERAC(V)
      GO TO 1
      END

```

```

C*****
C**    SUBROTINA GERAC.                    REALIZA A GERACAO DE NOHS
C**    *****
C*****                    SUBROUTINE GERAC (V)
COMMON

```

```

*    CTUNCH(5000),        CBONOH(5000),        POTNOH(5000),        HCH(5000),
*    GCH(5000),         CONS(30),            CONSMX(30),        DIAM(10),
*    CUSTU(10),         TAX,                    VMAX(20),         POTEN(20),
*    $ENER,             HG,                    FVA,              L,
*    L,                  B,                    PMIN,              T,
*    A,                  FATU,                $XENER,            PMAX,
*    IND(5000),         IDTUB(5000),        I(5000),           D(5000),
*    K(5000),           ID(5000),           P(5000),           NBONOH(5000),
*    KTUBO,             HPL,                    NN,                VUTLBO,
*    VUTLTJ,            N,                    NBOMAX

```

```

C
C    REAL*4
*    CTUNCH,             CBONOH,             POTNOH,             HCH,
*    GCH,                CONS,                CONSMX,             DIAM,
*    CUSTU,             VMAX,                PRECO,             POTEN,
*    $ENER,             TAX,                    RM,                E,
*    L,                  HG,                    FVA,              T,
*    A,                  B,                    PMIN,              PMAX,
*    FATU,               FAHO,                $XENER
*    INTEGER*2
*    IND,                IDTUB,             I,
*    K,                  ID,                NBONOH,            D,
*    KTUBO,             HPL,                    NN,                VUTLBO,
*    VUTLTJ,            N,                    NBOMAX

```

```

C    REAL*4                    POT
*    PUM01660
*    PUM01670
*    PUM01680
*    PUM01690
*    PUM01700
*    PUM01710
*    PUM01720
*    PUM01730
*    PUM01740
*    PUM01750
*    PUM01760
*    PUM01770
*    PUM01780
*    PUM01790
*    PUM01800
*    PUM01810
*    PUM01820
*    PUM01830
*    PUM01840
*    PUM01850
*    PUM01860
*    PUM01870
*    *****
*    PUM01880
*    **PUM01890
*    **PUM01900
*    *****PUM01910
*    PUM01920
*    PUM01930
*    PUM01940
*    PUM01950
*    PUM01960
*    PUM01970
*    PUM01980
*    PUM01990
*    PUM02000
*    PUM02010
*    PUM02020
*    PUM02030
*    PUM02040
*    PUM02050
*    PUM02060
*    PUM02070
*    PUM02080
*    PUM02090
*    PUM02100
*    PUM02110
*    PUM02120
*    PUM02130
*    PUM02140
*    PUM02150
*    PUM02160
*    PUM02170
*    PUM02180
*    PUM02190
*    PUM02200

```

```

C      INTEGER*2      V,NBO
COMMON /FLAG/      IFLAG
INTEGER*2          IFLAG
C      CUSBO (X) = A + B * X
C**
C      INICIO
IF (I(V).GT.D(V)) GO TO 3
K0=1
IF (K(V).NE.0) K0=K(V)
INI=I(V)+1
IFI=I(V)+VUTLBO
IF (IFI.GT.HPL) IFI=HPL
DO 2 KK=0,KTUR0
    DO 5 II=1,IFI
        Q=CONSMX(II)/(T*3600)
        VEL=4*Q/(3.141592*DIAM(KK)*DIAM(KK))
        IF (VEL.GT.VMAX(KK)) GO TO 2
        NN=NN+1
        P(NN)=V
        D(NN)=D(V)+1
        K(NN)=KK
        I(NN)=II
        ID(NN)=I
        IDTUB(NN)=I
        IF (KK.EQ.K(V).AND.IDTUB(V).LT.VUTLBO) IDTUB(NN)=IDTUB(V)+1
        IND(NN)=1
        CALL HIDRO(CONSMX(I(NN)),DIAM(KK),E,L,T,HG,RM,A,B,PCT,NBO,
            NBOMAX)
        *
        IF ((POT.LE.PMAX.AND.POT.GE.PMIN).OR.IFLAG.LO.1) GO TO 4
        WRITE(6,66)
        IFLAG=1
        PUTNOH(NN)=POT
        NBONOH(NN)=NBO
        CBONOH(NN)=NBO*CUSBO(POT)
        CTJNOH(NN)=CUSTJ(KK)*L
        IF ((NBO-1)*POT.GT.(NBONOH(V)-1)*POTNOH(V).OR.
            ID(V).GE.VUTLBO) GO TO 98
        PUTNOH(NN)=POTNOH(V)
        NBONOH(NN)=NBONOH(V)
        CBONOH(NN)=CBONOH(V)
        ID(NN)=ID(V)+1
    98      CALL CUSTOS (V)
        CALL VERIFI
    5      CONTINUE
    2      CONTINUE
        RETURN
    3      NV=NN+1
        D(NV)=D(V)+1
        K(NV)=K(V)
        I(NV)=I(V)
        ID(NV)=ID(V)+1
    
```

PUM02210  
PUM02220  
PUM02230  
PUM02240  
PUM02250  
PUM02260  
PUM02270  
PUM02280  
PUM02290  
PUM02300  
PUM02310  
PUM02320  
PUM02330  
PUM02340  
PUM02350  
PUM02360  
PUM02370  
PUM02380  
PUM02390  
PUM02400  
PUM02410  
PUM02420  
PUM02430  
PUM02440  
PUM02450  
PUM02460  
PUM02470  
PUM02480  
PUM02490  
PUM02500  
PUM02510  
PUM02520  
PUM02530  
PUM02540  
PUM02550  
PUM02560  
PUM02570  
PUM02580  
PUM02590  
PUM02600  
PUM02610  
PUM02620  
PUM02630  
PUM02640  
PUM02650  
PUM02660  
PUM02670  
PUM02680  
PUM02690  
PUM02700  
PUM02710  
PUM02720  
PUM02730  
PUM02740  
PUM02750

FILE0 PUMPA FORTRAN A1 VM/SP REL 3.1 SLU 306

```

IDTUB(NN)=IDTUR(V)+1
IND(NN)=1
POTINH(NN)=POTNOH(V)
NBONCH(NN)=NBONCH(V)
CBONCH(NN)=CBONCH(V)
CTUNCH(NN)=CTUNCH(V)
CALL CUSTOS (V)
CALL VERIFI
RETURN
66 FORMAT(IX,'AVISO. HOUVE EXTRAPOLACAO NO CALCULO DO PRECO DAS'
, ' BOMBAS',//)

```

```

END
C*****
C** SUBROTINA VERIFI. VERIFICA SE ALGUM NOH JA FOI GLKADO
C*****
C** SUBROUTINE VERIFI
COMMON

```

```

* CTUNCH(5000), CBONCH(5000), POTINH(5000), HCH(5000),
* GCH(5000), CONS(30), CONSMX(30), DIAM(10),
* CUSTU(10), VMAX(10), PRECO(20),
* $ENER, TAX, FVA, RM, E,
* L, HG, B, FVA, T,
* A, B, PMIN, PMAX,
* FATU, FABO, $XENER, D(5000),
* IND(5000), IDTUB(5000), I(5000), NBONCH(5000),
* K(5000), ID(5000), P(5000), VUTLBO,
* KTUBO, HPL, NN, NBOMAX,
* VUTLTJ, N, NBOMAX

```

```

C REAL**
* CTUNCH, CBONCH, POTINH, HCH,
* GCH, CONS, CONSMX, DIAM,
* CUSTU, CUSTO, VMAX, PRECO, POTEN,
* $ENER, TAX, RM, E,
* L, HG, B, FVA, T,
* A, B, PMIN, PMAX,
* FATU, FABO, $XENER
INTEGER*2
* IND, IDTUB,
* K, KTUBO, HPL,
* VUTLTJ, N, NBOMAX

```

```

C** INICIO
C
NMAX=NN-1
DO 10 J=1,NMAX
J=NN-JJ
IF(K(J).EQ.K(NN).AND.I(J).EQ.I(NN).AND.D(J).EQ.D(NN)) GO TO 20
10 CONTINUE
RETURN
20 IF(IND(J).NE.1) GO TO 50
IF(HCH(NH).GE.HCH(J)) GO TO 50
P(J)=P(NN)

```

PUM02760  
PUM02770  
PUM02780  
PUM02790  
PUM02800  
PUM02810  
PUM02820  
PUM02830  
PUM02840  
PUM02850  
PUM02860  
PUM02870  
\*\*PUM02890  
\*\*PUM02900  
\*\*PUM02910  
FU402920  
PUM02930  
PUM02940  
PUM02950  
PUM02960  
PUM02970  
PUM02980  
PUM02990  
PUM03000  
PUM03010  
PUM03020  
PUM03030  
PUM03040  
PUM03050  
PUM03060  
PUM03070  
PUM03080  
PUM03090  
PUM03100  
PUM03110  
PUM03120  
PUM03130  
PUM03140  
PUM03150  
PUM03160  
PUM03170  
PUM03180  
PUM03190  
PUM03200  
PUM03210  
PUM03220  
PUM03230  
PUM03240  
PUM03250  
PUM03260  
PUM03270  
PUM03280  
PUM03290  
PUM03300

HCH(5000),  
DIAM(10),  
POTEN(20),  
E,  
T,  
PMAX,  
D(5000),  
NBONCH(5000),  
VUTLBO,  
NBOMAX,  
POTINH,  
CONSMX,  
PRECO,  
RM,  
FVA,  
PMIN,  
\$XENER,  
I,  
P,  
NN,  
NBOMAX,  
CBONCH,  
CONS,  
VMAX,  
TAX,  
HG,  
B,  
FABO,  
IDTUB(5000),  
ID(5000),  
HPL,  
N,  
NBOMAX,  
POTINH,  
CONSMX,  
PRECO,  
RM,  
FVA,  
PMIN,  
\$XENER,  
I,  
P,  
NN,  
NBOMAX

PUM03200  
PUM03210  
PUM03220  
PUM03230  
PUM03240  
PUM03250  
PUM03260  
PUM03270  
PUM03280  
PUM03290  
PUM03300

```

IO(J)=I*(NN)
HCH(J)=HCH(MN)
GCH(J)=GCH(NN)
POTNDH(J)=POTNDH(NN)
CTUNOH(J)=CTUNOH(NN)
CBONOH(J)=CBONOH(NN)
IDTUB(J)=IDTUB(NN)
NBONOH(J)=NBONOH(NN)

```

```

50 NV=NN-1
RETURN
END

```

```

C*****
C** SUJROTIINA CUSTOS.
C**
C*****
SUBROUTINE CUSTUS (V)
COMMON

```

```

* CTUNOH(5000), CBONOH(5000), POTNDH(5000), HCH(5000),
* GCH(5000), CUNSMX(30), CUNSMX(30), DIAM(10),
* CUSTU(10), VMAX(10), PRECO(20),
* $ENER, RM, E,
* L, HG, T,
* A, B, PMIN, PMAX,
* FATU, FABO, $XENER, D(5000),
* IND(5000), IDTUB(5000), I(5000), NBONOH(5000), PUN(3560)
* K(5000), ID(5000), P(5000), NN, N, NBDMAX,
* KTUBO, HPL, NBDMAX,
* VUTLJ, N, NBDMAX

```

```

C
REAL*4
* CTUNOH, POTNDH, HCH,
* GCH, CONS, CBONOH, CONSMX, DIAM,
* CUSTU, CUSTU, VMAX, PRECO, POTEN,
* $ENER, RM, E,
* L, HG, B, FVA, T,
* A, B, PMIN, PMAX,
* FATU, FABO, $XENER
INTEGER*2
* IND, IDTUB, I,
* K, ID, P, NBUNOH,
* KTUBO, HPL, NN, VUTLBO,
* VUTLJ, N, NBDMAX
INTEGER*2 V
C
INICIO
N=NN
NV=V
CVNN=0
CMAN=0.05*(CBONOH(NN)+CTUNOH(NN))
TOP=T*CONS(I(N))/CONSMX(I(N))
COP=30.4*POTNDH(N)*(NBUNOH(N)-1)*TOP*$ENER*0.736+XENER*POTNDH(N)*PUN(3560)
* (NBONOH(N)-1)*0.736
CUP=COP*FVA
CVNFCOP+CMAN/(1+TAX)

```

```

PUN(3310)
PUN(3320)
PUN(3330)
PUN(3340)
PUN(3350)
PUN(3360)
PUN(3370)
PUN(3380)
PUN(3390)
PUN(3400)
PUN(3410)
PUN(3420)
PUN(3430)
PUN(3440)
PUN(3450)
PUN(3460)
PUN(3470)
PUN(3480)
PUN(3490)
PUN(3500)
PUN(3510)
PUN(3520)
PUN(3530)
PUN(3540)
PUN(3550)
PUN(3560)
PUN(3570)
PUN(3580)
PUN(3590)
PUN(3600)
PUN(3610)
PUN(3620)
PUN(3630)
PUN(3640)
PUN(3650)
PUN(3660)
PUN(3670)
PUN(3680)
PUN(3690)
PUN(3700)
PUN(3710)
PUN(3720)
PUN(3730)
PUN(3740)
PUN(3750)
PUN(3760)
PUN(3770)
PUN(3780)
PUN(3790)
PUN(3800)
PUN(3810)
PUN(3820)
PUN(3830)
PUN(3840)
PUN(3850)

```

```

PU403860
PU403870
PU403880
PU403890
PU403900
PU403910
PU403920
PU403930
PU403940
PU403950
PU403960
PU403970
PU403980
PU403990
PU404000
**PU404010
**PU404020
**PU404030
**PU404040
PU404050
PU404060
PU404070
PU404080
PU404090
PU404100
PU404110
PU404120
PU404130
PU404140
PU404150
PU404160
PU404170
PU404180
PU404190
PU404200
PU404210
PU404220
PU404230
PU404240
PU404250
PU404260
PU404270
**PU404280
**PU404290
**PU404300
**PU404310
PU404320
PU404330
PU404340
PU404350
PU404360
PU404370
PU404380
PU404390
PU404400

IF(K(NV).EQ.N(N))GO TO 10
CVNN=CVNH+CTUNH(N)*1.02-FATU*(CTUNH(NV)-CTUNH(NW))*IDTUB(NV)
*(2*VUTLU-IDTUB(NV)+1)/(VUTLU*(VUTLU+1))
*
10 IF(POTNOH(N).EQ.POTNOH(NV))GO TO 20
CVNN=CVNH+CONH(N)*1.02-FABO*(CONH(NV)-CONH(NW))*ID(NV)*
(2*VUTLBO-ID(NV)+1)/(VUTLBO*(VUTLBO+1))
*
20 GCH(NN)=(GCH(V)+CVNN)*(I+TAX)
PATR=FABO*(CONH(N)-CONH(NN))*ID(N)*(2*VUTLBO-ID(N)+1)/(VUTLBO*
(VUTLBO+1))+
*
* FATU*(CTUNH(N)-CTUNH(NN))*IDTUB(N)*(2*VUTLU-IDTUB(N)+1)/
(VUTLU*(VUTLU+1))
*
HCH(NN)=SCH(NV)-PATR
RETURN
END
C*****
C** SUBROTINA HIDRO. CALCULA OS PARAMETROS HIDRAULICOS DO SISTEMA
C**
C*****
SUBROUTINE HIDRO(CONS,DIAM,E,L,T,HG,RM,A,B,POT,NLB,NBOMAX)
REAL*4 CONS,DIAM,E,L,T,HG,HM,POT,Q,NR,NI,VEL,RM,F,HP,HLOC,A,B
INTEGER*2 NBO,NBOMAX
C
C** INICIO
C
NI=1.146E-06
Q=CONS/(T*3600)
VEL=Q*Q/(3.141592*DIAM*DIAM)
NR=VEL*DIAM/NI
ADOTOU=SE K=10,CORRESPONDENTE AS SINGULARIDADES DO SISTEMA
HLOC=10*VEL*VEL/(2*9.81)
HP=F*L*VEL*VEL/(DIAM*2*9.81)
HM=HG+HP+HLOC
POT=1000*Q*HM/(75*RM)
NBO=1.5*POT/(B*POT/ABS(A))
IF (NBO.GT.NBOMAX)NBO=NBOMAX
IF (NBO.EQ.1)NR=2
POT=POT/(NBO-1)
RETURN
END
C*****
C** SUBROTINA IMPR11 IMPRESSAO DOS RESULTADOS
C**
C*****
SUBROUTINE IMPR11 (V)
COMMON
CTUNH(5000),CBONH(5000),POTNOH(5000),HCH(5000),
GCH(5000),CONS(30),CONSMX(30),DIAM(10),
CUSTU(10),VMAX(10),PRECO(20),RM,
* TENER,
* L,
* A,
* U,
* FATU,
IND(5000),IDTUB(5000),I(5000),
*

```

```

* <(5000), ID(5000), P(5000), NBONOH(5000), PUM04410
* KTUBO, HPL, NN, VUTLBO, PUM04420
* VUTLTJ, N, NBOMAX, PUM04430
PUM04440
PUM04450
REAL*4
* CTUNOH, CBONOH, POTNOH, HCH, PUM04460
* SCH, CONS, CONSMX, DIAM, PUM04470
* CUSTU, VMAX, PRECO, RM, POTEN, PUM04480
* $ENER, TAX, HG, FVA, T, PUM04490
* L, A, B, PHIN, PMAX, PUM04500
* FATU, FA30, $XENER, PUM04510
* INTEGER*2 PUM04520
* IND, IDTUB, I, PUM04530
* K, ID, P, PUM04540
* KTUBO, HPL, NBONCH, PUM04550
* VUTLTU, N, NN, VUTLBO, PUM04560
* INTEGER*2 X(31),V NBOMAX, PUM04570
* PUM04580
C
C**
C
WRITE(6,90) PUM04590
NDM=NN PUM04600
J=1 PUM04610
X(I)=V PUM04620
ACOPER=0, PUM04630
ACTNV=0, PUM04640
ACMAN=0, PUM04650
PUM04660
PUM04670
PUM04680
PUM04690
PUM04700
PUM04710
PUM04720
PUM04730
PUM04740
PUM04750
PUM04760
PUM04770
PUM04780
PUM04790
PUM04800
PUM04810
PUM04820
PUM04830
PUM04840
PUM04850
PUM04860
PUM04870
PUM04880
PUM04890
PUM04900
PUM04910
PUM04920
PUM04930
PUM04940
PUM04950
PUM04960
PUM04970
PUM04980
PUM04990

```

```

10 IF(V.EQ.0) GO TO 20
J=J+1
X(J)=P(V)
V=X(J)
GO TO 10
20 M=J-2
WRITE(6,80)
DO 50 JJ=1,M
KJ=M+1-JJ
NN=X(KJ)
NV=P(NN)
CYANUT=0.05*(CBONCH(NN)+CTUNOH(NN))
ACMAN=ACMAN+CMANUT/(1+TAX)**D(NN)
AJX=T*CONS(D(NN))/CONSMX(I(NN))
OPCR=(30.4*POTNOH(NN)*(NBONOH(NN)-1)*AUX+$ENER*0.736+$XENER
*POTNOH(NN)*(NBONOH(NN)-1)*0.736)*FVA*(1+TAX)
ACOPER=ACOPER+OPER/(1+TAX)**D(NN)
XINV=0.
IF(K(NN).EQ.K(NV)) GO TO 30
XINV=CTJNOH(NN)*1.02-FATU*(CTUNOH(NV)-CTUNOH(NV)*IDTUB(NV)
*(2*VUTLTJ-IDTUB(NV)+1)/(VUTLTU*(VUTLTU+1)))
30 IF(POTNOH(NN).EQ.PATNOH(NV)) GO TO 40
XINV=X(NV+CBONOH(NN)*1.02-FABO*(CBONOH(NV)-CBONOH(NV)*ID(NV)
*(2*VUTLEB-ID(NV)+1)/(VUTLEB*(VUTLEB+1)))
40 ACINV=ACINV+XINV/(1+TAX)**(D(NN)-1)
WRITE(6,60) D(NN),CONS(D(NN)),CONSMX(D(NN)),CONSRX(I(NN)),
DIAM(K(NN)),NBONOH(NN),PATNOH(NN),AUX,

```

```

*
50 CONTINUE
  PATR=GCH(X(1))-HCH(X(1))
  ACINV=ACINV-PATR/(1+TAX)**HPL
  VPRES=ACMAN+ACOPER+ACINV
  WRITE(6,70) PATR,ACMAN,ACOPER,ACINV,VPRES,NDH
  RETURN
60 FORMAT(1X,I3,3X,F8.2,3X,F8.2,3X,F9.2,3X,F5.3,3X,I9,3X,F8.2,3X,
  F5.2,3X,F11.0,3X,F11.0,F16.0)
70 FORMAT(//,49X,VALOR RESIDUAL EQUIPAMENTO*,30X,F16.0,
  //,49X,VALOR PRESENTE ACUMULADO*,4X,2F14.0,F16.0,
  //,49X,VALOR PRESENTE TOTAL*,36X,F16.0,
  //,49X,NUMERO DE NOS GERADOS*,47X,I4)
80 FORMAT(1X,AND CONS MED CONS MAX CONS PROJ DIAM.,
  , N.OE BOMB POTENCIA HDRAS MANUTENCAO*,
  , OPERACAO INVESTIMENTOS*)
90 FORMAT(1,///,34X,* * * * * OTIMIZACAO DE SISTEMAS DE RECALQUE*,
  * * * * * PLANO OTIMO DE EXPANSAO,///)PUM05130
  PUM05140
  END
C*****
C** SUBROTINA REGRE. ESTIMA A REITA DE REGRESSAO - Y = A + B X **PUM05160
C** Y = CUSTO DO CONJ. RECALQUE + INS.ELETR. **PUM05170
C** X = POTENCIA DO CONJ. RECALQUE **PUM05180
C*****
SUBROUTINE REGRE
COMMON
  CTUNOH(5000), CBONOH(5000), POTNOH(5000), HCH(5000),
  GCH(5000), CUNX(30), CUNSMX(30), DIAM(10),
  CUSTU(10), VMAX(10), PRECO(20),
  $ENER, TAX, RM, E,
  L, HG, B, FVA, T,
  A, B, PMIN, PMAX,
  FATU, FAGO, $XENER,
  IND(5000), IDTUB(5000), I(5000),
  K(5000), ID(5000), P(5000),
  KTUBO, HPL, NN,
  VUTLU, N, NBOMAX
  REAL*4
  CTUNOH, CBONOH, POTNOH,
  GCH, CONS, CONSMX,
  CUSTU, VMAX, PRECO,
  $ENER, TAX, RM, E,
  L, HG, B, FVA, T,
  A, B, PMIN, PMAX,
  FATU, FAGO, $XENER
  INTEGER*2
  IND, ID,
  K, KTUBO, HPL,
  VUTLU, N, NBOMAX
  PMIN=POTEN(1)
  PMAX=POTEN(1)
  XSOA=0

```



```

YSOMA=0
XYSOMA=0
YSOMA2=0
XSOMA2=0
O2 10 J=1,N
  PMIN=AMINI(PMIN,POTEN(J))
  PMAX=AMAXI(PMAX,POTEN(J))
  XSOMA=XSOMA+PCTEN(J)
  YSOMA=YSOMA+PRECC(J)
  XSOMA2=XSOMA2+POTEN(J)*POTEN(J)
  YSOMA2=YSOMA2+PRECC(J)*PRECC(J)
  YYSOMA=YSOMA+POTEN(J)*PRECC(J)
10 CONTINUE
  B=(N*YYSOMA-XSOMA*YSOMA)/(N*XSOMA2-XSOMA*XSOMA)
  A=YSOMA/N-B*XSOMA/N
  R2=(N*YYSOMA-XSOMA*YSOMA)*2/((N*XSOMA2-XSOMA*XSOMA)*(N*YSOMA2-
  * YSOMA*YSOMA))
  WRITE(6,20) A,B,R2,PMAX,PMIN
  RETURN
20 FORMAT(2X,'VALORES DA RETA DE REGRESSAO',//,
  * 2X,' INTERCEPTO (A) = ',F12.2,/,
  * 2X,' INCLINACAO DA RETA (B) = ',F12.2,/,
  * 2X,' COEF. DE DETERMINACAO (R2) = ',F12.6,/,
  * 2X,' POTENCIA MAXIMA = ',F12.2,/,
  * 2X,' POTENCIA MINIMA = ',F12.2,///)
  END

```

PUM05510  
PUM05520  
PUM05530  
PUM05540  
PUM05550  
PUM05560  
PUM05570  
PUM05580  
PUM05590  
PUM05600  
PUM05610  
PUM05620  
PUM05630  
PUM05640  
PUM05650  
PUM05660  
PUM05670  
PUM05680  
PUM05690  
PUM05700  
PUM05710  
PUM05720  
PUM05730  
PUM05740  
PUM05750  
PUM05760

## APÊNDICE II - ENTRADA DE DADOS

PAGE 001

FILED PUMP4 CARDS A1 VM/SP RELEASE 3.1 15L1306

ALTIMETRIA (M)	157.00	CONS MED	CONS MAX
COMPRIMENTO DA TUBULACAO(M)	4640.00	2916.60	3270.65
CUSTO DE ENERGIA (CR\$/KWH)	100.00	3113.40	3491.34
CUSTO DE ENERGIA (CR\$/K)	30525.14	3223.40	3726.93
TEMPO DIARIO DE OPERACAO(H)	24.0	3547.50	3978.14
TAXA DE JUROS	0.120	3786.90	4246.50
HORIZONTE PLANEJAMENTO(ANO)	20	3993.75	4473.56
CONSUMO(M3/DIA)	20	4212.15	4723.47
		4442.40	4981.67
		4685.10	5253.83
		4941.15	5540.97
		5189.20	5818.01
		5447.55	6108.84
		5719.95	6414.31
		6006.00	6735.03
		6305.30	7071.84
		6590.10	7390.09
		6866.55	7722.64
		7195.55	8070.16
		7520.40	8433.32
		7858.30	8812.80

CONJ DE RECALQUE + INST. ELETR.	0.950	PRECO(CR\$)
RENDIMENTO TOTAL MECIC	0.700	100.0
FATOR DE DEPRECIACAO	20	185000000.
VIDA UTIL	04	120.0
NUM. MAX. DE BOMAS	05	210000000.
NUM. DADOS REGRESSAO	05	150.0
		2600000000.
		175.0
		307000000.
		200.0
		3650000000.

TUBOS	30	VELOCIDADE MAX	PRECO (CR\$/M)
VIDA UTIL	5	0.00060	201000.
NUM. TIPOS DE TUBOS	0.800	2.30	257000.
FATOR DE DEPRECIACAO	0.800	2.40	363000.
RUSSIDADE (M)	0.00060	2.45	605000.
SIAMETFC		2.60	855000.
		2.85	

## APÊNDICE III - SAÍDA DE RESULTADOS

\*\*\* OTIMIZACAO DL SISTEMAS DE RECALOJE \*\*\*

PLANO ULTIMO DE EXPANSAO

ANO	CONS MED	CONS MAX	CONS PROJ	DIAM.	N. DE BOMB	POTENCIA	HORAS	MANUTENCAO	UPERACAO	INVESTIMENTOS
1	2916.60	3270.65	3978.14	0.250	4	56.42	17.60	79694672.	140615744.	1625772030.
2	3113.40	3491.34	3978.14	0.250	4	56.42	18.78	79694672.	146859072.	0.
3	3223.40	3726.83	3978.14	0.250	4	56.42	19.45	79694672.	150348720.	0.
4	3547.50	3978.14	3978.14	0.250	4	56.42	21.40	79694672.	160630704.	0.
5	3786.90	4246.60	4981.67	0.250	4	75.56	18.24	86568832.	192885776.	367700736.
6	3993.75	4478.56	4981.67	0.250	4	75.56	19.24	86568832.	199903904.	0.
7	4212.15	4723.47	4981.67	0.250	4	75.56	20.29	86568832.	207313744.	0.
8	4442.40	4981.67	4981.67	0.250	4	75.56	21.40	86568832.	215125680.	0.
9	4695.10	5253.83	6108.84	0.250	4	101.01	18.41	95707504.	259372976.	491803648.
10	4941.15	5540.97	6108.84	0.250	4	101.01	19.41	95707504.	266843008.	0.
11	5188.20	5818.01	6108.84	0.250	4	101.01	20.38	95707504.	277980160.	0.
12	5447.55	6108.84	6108.84	0.250	4	101.01	21.40	95707504.	287572224.	0.
13	5719.95	6414.31	7390.09	0.250	4	136.14	18.58	109326400.	351750912.	666372608.
14	6006.00	6735.08	7390.09	0.250	4	136.14	19.51	109326400.	363538688.	0.
15	6306.30	7071.84	7390.09	0.250	4	136.14	20.48	109326400.	375913472.	0.
16	6590.10	7390.09	7390.09	0.250	4	136.14	21.40	109326400.	397608832.	0.
17	6886.65	7722.64	8812.80	0.250	4	184.50	18.75	125693248.	479758592.	906244608.
18	7196.55	8070.16	8812.80	0.250	4	184.50	19.60	125693248.	494270976.	0.
19	7520.40	8433.32	8812.80	0.250	4	184.50	20.48	125693248.	509436928.	0.
20	7858.80	8812.80	8812.80	0.250	4	184.50	21.40	125693248.	525284352.	0.

VALOR RESIDUAL EQUIPAMENTJ

VALOR PRESENTE ACUMULADO

VALOR PRESENTE TOTAL

TEMPO DE CPU =

711868416.  
2303157500.  
4688048130.

24.87