



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ.  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO.**

**INTERFACE GRÁFICA PARA DIMENSIONAMENTO E  
OTIMIZAÇÃO DE FLUXOS EM REDES DE  
ABASTECIMENTO D' ÁGUA**

Adbeel Goes Filho

Fortaleza, Ceará, 1998

Adbeel Goes Filho

**INTERFACE GRÁFICA PARA DIMENSIONAMENTO E OTIMIZAÇÃO  
DE FLUXOS EM REDES DE ABASTECIMENTO D' ÁGUA**

Dissertação apresentada à Coordenação do Curso de Mestrado em Computação da Universidade Federal do Ceará como pré-requisito para a obtenção do grau de Mestre em Ciência da Computação.

Orientador : Prof. Antônio Clécio Fontelles Thomaz  
Co-Orientador : Prof. Nilson Bezerra Campos

Fortaleza, Ceará, 1998

# **INTERFACE GRÁFICA PARA DIMENSIONAMENTO E OTIMIZAÇÃO DE FLUXOS EM REDES DE ABASTECIMENTO D' ÁGUA**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO EM COMPUTAÇÃO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO.

Adbeel Goes Filho

## **BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Antônio Clécio Fontelles Thomaz (Doutor. Orientador)

---

Prof. José Nilson Bezerra Campos (Doutor. Co-Orientador)

---

Prof. José Almir Cirilo (Membro/UFPE)  
(Sub-Secretário de Ciência e Tecnologia de Pernambuco)

---

Prof. Creto Augusto Vidal (Membro/UFC)

---

Prof. Fernando Carvalho (Membro/UFC)

Aprovada em 15 de Julho de 1998

Aos meus pais Adbeel e Elsie e à  
minha esposa Cristine.

## AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Ceará - UFC.

Ao Departamento Nacional de Obras Contra as Secas - DNOCS.

À Universidade de Fortaleza – UNIFOR.

À Virtvs Engenharia e Informática Ltda.

À Muniz-Deusdará Arquitetos Associados.

Ao Prof. Gerardo Valdisio Rodrigues Viana.

Ao Prof. Genésio Martins de Araújo.

Ao Prof. Antônio Gouveia Neto (*in memoriam*).

Aos nossos Professores.

A todos os colegas e irmãos ∴ que participaram deste trabalho.

“Que ninguém se engane, só se consegue a simplicidade através de muito trabalho.”

**Clarice Lispector**  
1925-1977.  
Escritora brasileira.

## **RESUMO**

Heurísticas baseadas em programação linear têm sido muito estudadas nos dias atuais para obtenção de custos mínimos em redes de abastecimento d'água. A metodologia é capaz de analisar grandes redes de demanda e falhas nas combinações das tubulações. Em redes muito extensas, torna-se praticamente impossível a busca do menor custo sem a utilização de recursos computacionais. A consistência hidráulica é assegurada utilizando a técnica de resolução de rede de Hardy-Cross. Os procedimentos também poderão ser estendidos para avaliações de sistemas de redes já existentes. As técnicas são utilizadas dentro de uma tolerância estabelecida na busca da solução ótima.

Nosso objetivo neste trabalho é mostrar as técnicas utilizadas para a otimização do dimensionamento de tubulações em uma rede, bem como do fluxo do fluido, dentro de um ambiente gráfico amigável.

## **ABSTRACT**

Heuristics in linear programming have been studied in recent years to obtain minimal costs in network flows. The methodology can be employed in the analysis of large networks and of failures in the combinations of pipes. In wide area networks, it is impossible to obtain the minimal cost without using of computational resources. The hydraulic stability in the network is enforced by techniques such as the Hardy-Cross Algorithm used in this work. The procedures also can be extended to analyze existing network systems and are used with a good precision to get the optimal solution.

Our objective in this work is to show the techniques used for optimization of the pipes as well as the fluid flow in a network, using a friendly graphical user interface.

## SUMÁRIO

	Página
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2 OBJETIVOS.....</b>	<b>3</b>
<b>3 DESENVOLVIMENTO DO MODELO .....</b>	<b>5</b>
<b>4 HEURÍSTICAS.....</b>	<b>7</b>
<b>4.1 Problemas de Circulação de Fluxos e Caminhos Mínimos. ....</b>	<b>8</b>
<b>4.2 Algoritmo de Dijkstra.....</b>	<b>10</b>
<b>5 O MODELO DE OTIMIZAÇÃO.....</b>	<b>14</b>
<b>5.1 Descrição do Modelo de Otimização.....</b>	<b>14</b>
<b>5.2 Descrição do Processo Iterativo e Critérios de Otimização.....</b>	<b>17</b>
<b>5.3 Discussão da Formulação.....</b>	<b>20</b>
<b>5.4 Algoritmo Para o Cálculo dos Pesos .....</b>	<b>21</b>
<b>5.5 Algoritmo Para Otimização.....</b>	<b>24</b>
<b>5.6 Algoritmo para o Simplex Revisado .....</b>	<b>27</b>
<b>6 INTERFACE GRÁFICA .....</b>	<b>33</b>
<b>6.1 Introdução .....</b>	<b>33</b>
<b>6.2 Ambiente Necessário .....</b>	<b>35</b>
6.2.1 Recursos de Hardware .....	35
6.2.2 Recursos de Software.....	36
6.2.3 Padronizações Adotadas .....	37
6.2.4 Definições dos Módulos do Sistema.....	38
<b>6.3 Operação do Sistema .....</b>	<b>41</b>
6.3.1 Módulo Principal .....	42
6.3.2 Módulo de Processamento .....	43
6.3.3 Módulo de Relatórios.....	54
6.3.4 Módulo de Suporte.....	55
<b>7 OBJETO DO ESTUDO .....</b>	<b>56</b>
<b>8 ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>60</b>
<b>9 CONCLUSÕES.....</b>	<b>64</b>
<b>10 OBSERVAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>65</b>
<b>GLOSSÁRIO.....</b>	<b>66</b>
<b>APÊNDICE.....</b>	<b>67</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>115</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<i>Página</i>
<b>Figura 1. Exemplo de uma rede.....</b>	<b>7</b>
<b>Figura 2. Exemplo do Cálculo dos Pesos na rede.....</b>	<b>22</b>
<b>Figura 3. Fluxograma Resumido do Sistema .....</b>	<b>39</b>
<b>Figura 4. Fluxograma Geral dos Cálculos.....</b>	<b>40</b>
<b>Figura 5. Tela de Menu Principal e Apresentação do Sistema.....</b>	<b>42</b>
<b>Figura 6. Tela do Módulo de Processamento .....</b>	<b>44</b>
<b>Figura 7. Janela Editar do Módulo de Processamento.....</b>	<b>45</b>
<b>Figura 8. Entrada de Dados do Modelo .....</b>	<b>46</b>
<b>Figura 9. Exibição da Imagem Aerofotogramétrica.....</b>	<b>47</b>
<b>Figura 10. Janela de Ampliação (Zoom).....</b>	<b>48</b>
<b>Figura 11. Janela Configurar do Módulo de Processamento .....</b>	<b>49</b>
<b>Figura 12. Janela Visualizar do Módulo de Processamento .....</b>	<b>50</b>
<b>Figura 13. Diagrama de Cotas dos Nós do Modelo.....</b>	<b>51</b>
<b>Figura 14. Janela de Inicio de Otimização .....</b>	<b>52</b>
<b>Figura 15. Módulo de Relatórios .....</b>	<b>54</b>
<b>Figura 16. Layout após montagem dos nós e ligações baseado nas tabelas dadas.....</b>	<b>59</b>
<b>Figura 17. Linha Piezométrica .....</b>	<b>70</b>
<b>Figura 18. Rede Ramificada .....</b>	<b>73</b>
<b>Figura 19. Exemplo da Folha de Cálculo Para Redes Ramificada .....</b>	<b>77</b>
<b>Figura 20. Rede Malhada .....</b>	<b>78</b>
<b>Figura 21. Rede Fechada.....</b>	<b>79</b>
<b>Figura 22. Exemplo de Cálculo por Hardy-Cross .....</b>	<b>82</b>
<b>Figura 23. Resultado dos Cálculos por Hardy-Cross .....</b>	<b>83</b>

## ÍNDICE DAS TABELAS

*Página*

<b>Tabela 1. Comparação de Métodos para Obtenção do Caminho Mínimo .....</b>	<b>13</b>
<b>Tabela 2. Definições dos Módulos do Sistema .....</b>	<b>39</b>
<b>Tabela 3. Estudo de Caso – Dados do Layout da Rede .....</b>	<b>57</b>
<b>Tabela 4. Estudo de Caso – Demandas Consideradas e Características de Pressão ...</b>	<b>58</b>
<b>Tabela 5. Estudo de Caso – Resultados dos Cálculos .....</b>	<b>60</b>
<b>Tabela 6. Cálculo de Velocidades do Fluido.....</b>	<b>84</b>
<b>Tabela 7. Cálculo de Perdas de Cargas.....</b>	<b>84</b>
<b>Tabela 8. Valores do Coeficiente C da Fórmula de Hazen-Williams.....</b>	<b>86</b>
<b>Tabela 9. Descrição dos Nós de um Modelo .....</b>	<b>103</b>

## NOMENCLATURA

J	Coefficiente de perda de carga.
Re	Número de Reynolds.
Pi	Constante Pi = 3,141592654.
C	Constante de Hazen-Williams
Min	Minimização
Max	Maximização
$\Sigma$	Somatório
$\infty$	Infinito
$\forall$	Qualquer que seja
$\cup$	União

## 1 INTRODUÇÃO

A aplicação de procedimentos e metodologias de pesquisas na área de redes de distribuição de água tem merecido considerável atenção nos últimos anos (e.g., Karmeli et al., 1968; Schaake e Lai, 1969; Deb e Sakar, 1971; Watanotada, 1973; Shamir, 1974; Alperovits e Shamir, 1977; Bhamé, 1979; Quindry et al., 1981; Goulter e Morgan, 1985) [15]. É inegável a importância da implantação de sistemas de saneamento básico para as populações, principalmente as que vivem em áreas urbanas.

Há pouco tempo, a união de problemas envolvendo *layouts* de custo mínimo e tipos de tubulações de redes de distribuição de água têm sido abordados [15]. Um estudo sério e detalhado deve ser efetuado para estabelecer estas relações entre a rede e seus componentes, principalmente devido aos elevados investimentos necessários para a implantação e operação desses sistemas.

Dois métodos que são capazes de considerar esta relação foram publicados por Rowell e Barnes [17] e Morgan e Goulter [15]. Nos seus estudos, Rowell e Barnes desenvolveram um modelo que utiliza a *relação layout-componente* através de aproximações hierárquicas em dois níveis. Neste modelo, um *layout* de custo mínimo é primeiramente determinado. O ciclo requerido para efetuar o processamento é realizado pela inserção de tubulações redundantes conectando os ramos da árvore (rede). Contudo, as

considerações utilizadas neste procedimento prejudicam a consistência hidráulica na busca do custo mínimo da rede.

Morgan e Goulter [15], por conseguinte, desenvolveram um método utilizando dois modelos de programação linear, unidos para resolver o *layout* de custo mínimo e a forma do sistema. Neste modelo, um programa linear resolve o *layout* requerido enquanto o outro determina o componente de menor custo. O conjunto de restrições utilizado para o modelo requer que todo nó seja conectado a no mínimo duas ligações (tubulações distintas). Enquanto o modelo assegura a consistência hidráulica em cada fase, a restrição de finalização do ciclo não garante explicitamente redundância. Isto requer, então, estudos para o desenvolvimento de novos modelos na área.

Principalmente em países pobres como o Brasil, a existência destes sistemas pode contribuir para o desenvolvimento de melhores projetos de distribuição de água das cidades, que minimize o desperdício na utilização de materiais e o custo de execução da obra.

O modelo desenvolvido neste estudo representa uma aproximação alternativa para a ligação *layout-componente*, levando-se em consideração o menor custo.

Nosso objetivo, além da utilização do modelo descrito a seguir será o de dotar este conjunto de procedimentos de uma interface simples e amigável que nos permita, além de otimizar custos, agilizar a elaboração de projetos e possibilitar simulações em computadores portáteis, disponíveis nos mais diversos ambientes de trabalho. Também acrescentamos ao modelo a utilização de ligações heterogêneas, ou seja, ligações com dutos de materiais diferentes e a possibilidade de trabalhar nas simulações da rede com componentes disponíveis no mercado, e não puramente teóricos.

## 2 OBJETIVOS

No desenvolvimento de redes de distribuição de água, vários critérios e parâmetros devem ser considerados, principalmente devido à complexidade dos sistemas de distribuição de água. Alguns deles são inseridos com o intuito de simplificar o estudo para o dimensionamento. Destacamos a seguir, algumas destas considerações:

1. O sistema deve prover uma determinada pressão em nós específicos da rede, mesmo quando uma das ligações não está funcionando. Assim sendo, pelo menos dois caminhos independentes desde a fonte de abastecimento até um determinado nó devem ser considerados.
2. O método deve ser aplicado tanto para novos *layouts* como para expansão dos *layouts* já existentes.
3. O método deve incorporar funções de custos reais que utilizem valores unitários de seus componentes dados por fornecedores da área.
4. Os dutos da rede são classificados em principais e secundários para permitir uma redução nas dimensões do problema, visto que só os principais são considerados no modelo. As tubulações secundárias, de menor diâmetro, são as que estão em contato direto com os pontos abastecidos, sendo assim, têm influência restrita às suas vizinhanças. Observamos que simplificações excessivas da rede podem comprometer sua análise. Desta forma, deixamos

ao usuário total flexibilidade na elaboração do *layout* da rede, levando em consideração sua necessidade e sensibilidade.

5. A distribuição da água é considerada como feita a partir de pontos das tubulações principais, denominados nós.

6. O fluxo na rede é considerado permanente, com as vazões sendo calculadas para as condições críticas.

7. Ao final do processamento o sistema informará as ligações que podem ser eliminadas, ou seja, aquelas em que o fluxo d'água que passa por elas é desprezível (considerando a importância de cada trecho) em relação a outras que abastecem os mesmos nós.

Os vários modelos existentes têm sido direcionados para considerar somente uma demanda. Alperovits e Shamir [15] e Quindry et. al [15] reconheceram esta limitação e consideraram duas ou três demandas.

Para o desenvolvimento mais realístico das redes, as considerações em duas ou três demandas podem falhar para uma completa compreensão do sistema. O modelo aqui considerado e desenvolvido está aberto neste ponto de vista, ou seja, pode considerar duas ou mais demandas (ligações).

### **3 DESENVOLVIMENTO DO MODELO**

A metodologia desenvolvida é baseada na formulação de um programa linear juntamente com um procedimento de equilíbrio hidráulico na rede, que garante a consistência hidráulica.

O programa linear é montado e resolvido para dimensionar e modificar o diâmetro das tubulações buscando o menor custo, enquanto o algoritmo para a consistência hidráulica balanceia os fluxos e pressões. A execução deste método, baseado nos dois passos, pode mostrar dimensões mais econômicas e indicar quais ligações podem ser eliminadas.

Primeiramente, o procedimento assume condições iniciais de dimensões das tubulações e seus componentes, ou seja, os componentes são iniciados com valores básicos. A partir daí, a rede será transformada até atingir os objetivos requeridos, ou seja, novos conjuntos de componentes passam a ser determinados. Nesta etapa, os procedimentos de otimização tentam reduzir o diâmetro das tubulações, mantendo o equilíbrio hidráulico. No nosso modelo, escolhemos o Método de Hardy-Cross para resolver o problema da consistência hidráulica por sua simplicidade e larga aceitação por aqueles que trabalham na área. Contudo, é bastante simples substituir o método de Hardy-Cross por outro que realize o mesmo objetivo, como, por exemplo, o método da resolução de um sistema linear formado pelos elementos de demanda na rede. Os fluxos do fluido e a distribuição de pressão

resultantes dos métodos são, logo após, utilizados para modificar os componentes da rede. Se as pressões em alguns pontos estiverem abaixo das condições mínimas estabelecidas pelo projeto, é necessário substituir estas seções por tubulações de maior diâmetro. O procedimento de modificações das seções determina as que devem ser substituídas para as considerações mínimas de uma utilização de menor custo. Se as pressões estiverem acima do mínimo permitido, muitas seções de tubulações devem ser substituídas por outras de menor diâmetro, dentre as comercialmente encontradas. Para isto, o sistema pesquisa uma tabela de diâmetros fornecidas por fabricantes de tubulações.

Uma relação geral do custo pode ser obtida pelo incremento de diâmetros de uma tubulação e também permitindo algumas tubulações terem seus diâmetros reduzidos. Estas novas considerações de fluxos e pressões são então guardadas para os próximos cálculos. O processo é repetido iterativamente até que a relação ótima seja encontrada. Para uma maior segurança do sistema, colocamos algumas restrições para a finalização do seu processamento, com o objetivo de evitarmos ciclos infinitos e gastos desnecessários de processamento. Por ordem de importância consideramos:

1. Localização da relação ótima;
2. Tempo de execução esgotado;
3. Número limite de iterações excedido.

No próximo capítulo, apresentamos algumas teorias e fundamentos que utilizaremos no nosso projeto.

## 4 HEURÍSTICAS

A mais simples forma de representar uma rede em um computador é utilizando a matriz de pesos. A matriz de pesos de uma rede de n-nós é uma matriz  $n \times n$ ,  $W = [w_{ij}]$  em que as entradas  $(i,j)$  têm um peso associado  $w_{ij}$ . Se não há uma ligação entre  $i$  e  $j$  em uma rede  $G$ , seu peso correspondente é infinito (na prática um número muito grande). Às entradas de diagonal são atribuídas o valor zero (ou outro valor dependendo da aplicação e do algoritmo). É fácil ver que a matriz de pesos de uma rede não dirigida é sempre simétrica. A seguir mostramos uma rede e sua matriz de pesos associada.

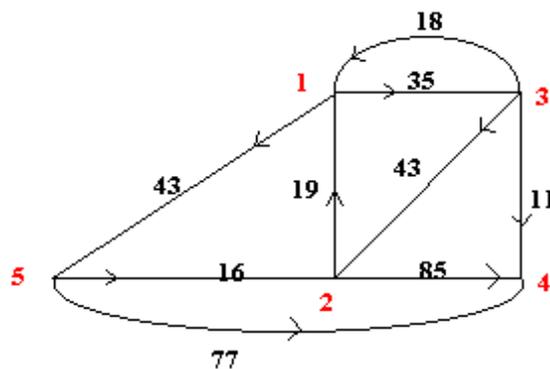


Figura 1. Exemplo de uma rede

$$w = \begin{bmatrix} - & \infty & 35 & \infty & 43 \\ 19 & - & \infty & 85 & \infty \\ 18 & 43 & - & 11 & \infty \\ \infty & \infty & \infty & - & \infty \\ \infty & 16 & \infty & 77 & - \end{bmatrix}$$

Está claro que a representação de uma matriz de pesos irá requerer  $n^2$  palavras de memória de computador para armazenar a rede. Se a rede é esparsa nós poderíamos simplificar a utilização de memória no armazenamento de  $\infty$ , ou seja, utilizaremos um número de controle para especificar uma não ligação entre nós. No exemplo observamos que a ligação do nó 2 ao nó 1 (Linha 2 e coluna 1 da matriz) apresenta um comprimento 19. Da mesma forma, o caminho do nó 3 ao 5 (Linha 3 e coluna 5 da matriz) não existe diretamente, ou seja, apresenta um comprimento  $\infty$ .

#### 4.1 Problemas de Circulação de Fluxos e Caminhos Mínimos.

Problemas de caminhos mínimos são os encontrados mais comumente no estudo de transportes e redes de comunicação. Há muitos tipos de caminhos mínimos. Por exemplo, nós podemos estar interessados em determinar o caminho mínimo (pode ser o mais econômico ou o mais rápido) de um nó a outro em uma rede; ou precisamos encontrar os caminhos mínimos de um nó a todos os outros da rede.

Aqui nós estaremos interessados tanto em obter a distância mínima entre dois nós, como em obter todas as distâncias mínimas de um nó a todos os outros da rede.

Assumiremos aqui que a rede é dirigida e que há pesos associados a cada ligação. Os algoritmos também podem ser facilmente adaptados a redes não dirigidas, simplesmente pela substituição de toda ligação não dirigida  $(i,j)$  com um par de ligações dirigidas  $(i,j)$  e  $(j,i)$ , cada uma com um peso igual ao peso da ligação original não dirigida. Similarmente, se um grafo não tiver peso associado com suas ligações, a todas as ligações são associadas um peso unitário.

Consideremos um algoritmo elaborado por Dijkstra em 1959 [10] para encontrar o menor caminho e seu pesos de um nó específico  $s$  (fonte) a outro  $t$  (destino) em uma rede  $G$  em que todos os pesos são positivos. A idéia básica do algoritmo de Dijkstra é partir de  $s$  a  $t$  (seguindo as ligações dirigidas), marcando os nós com suas distâncias de  $s$ . A marcação de um nó  $u$  é realizada permanentemente uma vez que representa a menor possível distância de  $s$  a  $u$ . Todos os nós são marcados permanentemente tendo marcadores temporários.

Começa-se atribuindo uma marcação 0 ao nó fonte  $s$ , porque zero é a distância de  $s$  a ele mesmo. Então, marca-se cada sucessor imediato  $v$  da fonte  $s$ , com marcadores temporários igual ao peso da ligação  $(s,v)$ . Claramente, o nó, dito  $x$ , com um marcador temporário mínimo (entre todos os sucessores imediatos) é o nó mais próximo a  $s$ . Desde que todas as ligações tenham pesos positivos, então não há caminho mínimo de  $s$  a  $x$ . Contudo, marca-se  $x$  como permanente. Depois, encontra-se todos os sucessores imediatos de  $x$ , e encurta-se seus marcadores temporários se o caminho de  $s$  a qualquer deles é menor do que o caminho passando por  $x$ . Em seguida, de todos os nós marcados como temporários pegamos o que tem menor marcador, dito nó  $y$ , e fazemo-lo permanente. O nó  $y$  é o segundo mais próximo a  $s$ . Assim, em cada iteração, reduz-se o valor de marcadores temporários quando possível

(selecionando-se um caminho mínimo através do mais recente nó de marcador permanente), seleciona-se o nó com menor marcador temporário e considera-se o mesmo como permanente. Continua-se este procedimento até que o nó  $t$  torne-se permanente. Em vez de se distinguir os nós de marcadores permanentes dos temporários, utiliza-se um vetor final de tipo *booleano* de ordem  $n$ . Quando o nó  $i$  torna-se permanentemente marcado, o elemento  $i$  do vetor muda de falso para verdadeiro. Um outro vetor denominado *dist*, de ordem  $n$ , é utilizado para armazenar os marcadores dos nós. Uma variável chamada *recent* é utilizada para guardar a trilha do mais recente nó a ser permanentemente marcado.

Assumindo-se que uma rede é dada na forma de sua matriz de pesos  $W=[w_{ij}]$ , com pesos  $\infty$  para ligações inexistentes, e que os nós  $s$  e  $t$  são especificados; o algoritmo de Dijkstra pode ser descrito mais precisamente como mostra-se a seguir.

## 4.2 Algoritmo de Dijkstra

### INICIALIZAÇÃO

para todo  $v \in V$  faça

    início

$\text{dist}(v) \leftarrow \infty;$

$\text{final}(v) \leftarrow \text{falso};$

$\text{pred}(v) \leftarrow -1$

    fim;

$\text{dist}(s) \leftarrow 0;$

$\text{final}(s) \leftarrow \text{verdadeiro};$

$\text{recent} \leftarrow s;$

{o nó  $s$  é permanentemente marcado com 0. Todos os outros nós são marcados com  $\infty$ . O nó  $s$  é o mais recente nó a ser permanentemente marcado }

### ITERAÇÃO

Enquanto  $\text{final}(t) = \text{falso}$  faça

início

para todo imediato sucessor  $v$  de  $s$  se não for  $\text{final}(v)$  faça

início { Atualizar os marcadores temporários }

$\text{newlabel} \leftarrow \text{dist}(\text{recent}) + w(\text{recent}, v)$ ;

se  $\text{newlabel} < \text{dist}(v)$  então

início

$\text{dist}(v) \leftarrow \text{newlabel}$ ;

$\text{pred}(v) \leftarrow \text{recent}$ ;

fim;

{ renomear  $v$  se há um caminho mínimo via nó  $\text{recent}$  e fazer recente o predecessor de  $v$  no caminho mínimo de  $s$  }

fim

fazer  $y$  ser o nó com menor marcador temporário, que é  $\neq \infty$ ;

$\text{final}(y) \leftarrow \text{verdadeiro}$ ;

$\text{recent} \leftarrow y$ ;

{  $y$ , o próximo nó mais perto de  $s$  recebe marcação permanente }

fim;

Observe-se que o vetor pred guarda a trilha do predecessor imediato do nó no caminho mínimo de  $s$  a  $t$ . Inicialmente, sua entrada tem o valor -1. No fim da execução o caminho mínimo é dado pelo valor de dist(t). O caminho atual pode ser obtido pela trilha de retorno de  $t$  a  $s$  (os predecessores no vetor pred). A seqüência de nós é a seguinte:

$s, \text{pred}(\text{pred}(\dots)), \dots, \text{pred}(\text{pred}(t)), \text{pred}(t), t$

é um caminho mínimo de  $s$  a  $t$ . No caso de não existir caminho de  $\underline{s}$  a  $\underline{t}$  na rede,  $\underline{\text{dist}}(t)$  será  $\infty$ . Esta condição só ocorrerá se, e somente se, em algum ponto todos os marcadores temporários tiverem pesos  $\infty$ . Ao detectar-se esta condição, deve-se sair do *loop* e parar.

O tempo gasto na etapa de inicialização deve-se à atribuição de valores aos vetores *dist*, *final* e *pred*, cada um de comprimento  $\underline{n}$ , e, conseqüentemente é proporcional a  $\underline{n}$ .

O *loop* mais externo na iteração deve, no pior caso, ser executado  $(n-1)$  vezes. Este será o caso se o nó destino  $t$  for o mais distante de  $s$ . Para cada execução do *loop*, tem-se de examinar a linha da matriz de pesos  $W$ , correspondente ao nó *recent* e de atualizar vetores *dist* e *pred*, o que requer um tempo proporcional a  $n$ . O número de comparações requeridas para encontrar o menor marcador temporário na iteração  $i$  é  $(n - i - 1)$ . Assim, o tempo total de execução do algoritmo de Dijkstra é  $O(n^2)$  no pior caso, quando a rede é dada na forma de matriz de pesos.

Se a rede é esparsa, isto é, o número de ligações é muito menor que  $n(n-1)$ , é possível reduzir o tempo de computação atual selecionando-se uma estrutura de dados diferente e considerando-se a atualização somente dos nós que são sucessores da variável *recent*.

### **Observações:**

1. O algoritmo de Dijkstra clássico, apresentado neste trabalho, encontra apenas um caminho mínimo de  $\underline{s}$  a  $\underline{t}$ . Conseqüentemente precisa ser modificado para resolver problemas, como o apresentado neste trabalho, em que existem múltiplos caminhos mínimos de  $\underline{s}$  a  $\underline{t}$ .
2. Neste algoritmo, continua-se a marcação até que todo nó receba uma marcação permanente. Desde que em cada execução de um *loop* um nó esteja permanentemente marcado, simplifica-se o *loop* utilizando:

para  $x \leftarrow 1$  a  $n$  fazer

para obter-se os comprimentos dos caminhos mínimos de  $s$  a todos os nós. Esta modificação torna o tempo de processamento de ordem  $O(n^2)$ .

Se houver interesse em encontrar todos os caminhos entre os nós numa rede com pesos positivos nas ligações, deve-se modificar o algoritmo  $n$  vezes - uma vez para cada nó. Assim, o tempo de processamento é da ordem  $O(n^3)$ .

3. Tomando-se os caminhos mínimos de um nó inicial  $\underline{s}$  a cada um dos outros nós, sua união será uma árvore dirigida com raiz no nó  $s$ . Todo caminho em  $T$  de  $\underline{s}$  é o menor caminho na rede.

4. Se o dígrafo  $G$  não é ponderado, toda ligação em  $G$  tem um peso de 1, e a matriz  $W$  é a mesma que a matriz adjacente de  $G$ .

5. O algoritmo de Dijkstra, por sua simplicidade e eficiência sobressai-se razoavelmente em relação a outros algoritmos.

A seguir temos um quadro comparativo de relação entre três métodos pesquisados.

*Comparação dos Métodos Para Obtenção do Caminho Mínimo (Tempo em segundos).*

Número de Nós	Dijkstra	Pdm	Floyd
40	<b>0,527</b>	0,708	0,646
60	<b>1,767</b>	2,489	2,156
80	<b>4,208</b>	6,038	5,078
100	<b>8,052</b>	11,601	9,862

**Tabela 1. Comparação de Métodos para Obtenção do Caminho Mínimo**

Neste trabalho, para a formalização do modelo, é necessário encontrar todos os caminhos entre determinado nó (não fonte) e cada uma das fontes dadas no *layout* da rede. Para isto, foi empregado o Algoritmo de Dijkstra Modificado.

## 5 O MODELO DE OTIMIZAÇÃO

### 5.1 Descrição do Modelo de Otimização

O modelo para otimização utilizando a programação linear é dado da seguinte forma:

#### FUNÇÃO OBJETIVO

$$\text{Min} \sum_{j=1}^{NL} (K_{jdr} X_{jdr} + K_{jds} X_{jds})$$

Equação 1

Onde

$K_{jdr}$	Custo unitário na troca de um tubo de diâmetro D por um de diâmetro maior na ligação j. $K_{jdr} > 0$ .
$K_{jds}$	Custo unitário na troca de um tubo de diâmetro D por um de diâmetro maior na ligação j. $K_{jds} < 0$ .
$X_{jdr}$ e $X_{jds}$	Variáveis de decisão: comprimento do tubo de diâmetro D na ligação j substituído pelo tubo de diâmetro r ou s, respectivamente.
NL	Número de ligações na rede.
$C_j$	Custo por unidade de comprimento de um tubo de diâmetro j. $K_{jdr} = C_d - C_r$ . $K_{jds} = C_d - C_s$ .

## Restrições

Para assegurar o equilíbrio hidráulico da rede algumas restrições foram inseridas no modelo de otimização. Estas restrições são:

### 1. Restrições de Pressão.

Estas restrições asseguram que as pressões em cada ponto de demanda são adequados.

$$\sum_{j \in P_i}^{NL} (G_{jdr} X_{jdr} + G_{jds} X_{jds}) \leq H_i - h_i, \forall i \quad \text{Equação 2}$$

Onde,

$G_{jdr}$  Mudança no gradiente hidráulico na ligação j causado pela substituição do comprimento unitário do tubo de diâmetro d pelo comprimento unitário de um tubo maior de diâmetro r. Assumimos a vazão da rede constante.

$$G_{jdr} = J_{jr} - J_{jd}. \text{ (Perda de carga maior - Perda de carga menor } > 0 \text{ )}.$$

$G_{jds}$  Mudança no gradiente hidráulico na ligação j causado pela substituição do comprimento unitário do tubo de diâmetro d pelo comprimento unitário de um tubo menor de diâmetro s. Assumimos a vazão da rede constante.

$$G_{jds} = J_{js} - J_{jd}. \text{ (Perda de carga maior - Perda de carga menor } < 0 \text{ )}.$$

$J_{jd}$  Gradiente hidráulico do tubo de diâmetro d na ligação j.  
( Metro / Metro ).

$H_i$  Pressão mínima admissível (Em metros).

$h_i$  Pressão existente ( Em metros ).

$P_i$  Conjunto de ligações da fonte ao nó i.

## 2. Restrições de Comprimento.

Estas restrições asseguram que o algoritmo de programação linear não substitui mais do comprimento da ligação que o disponível, ou seja:

$$\begin{aligned} X_{jdr} &\leq L_j \\ X_{jds} &\leq L_j, \quad \text{onde,} \end{aligned}$$

$L_j$  é o comprimento da ligação  $j$  (em metros). Se o comprimento da ligação é feito de dois diâmetros diferentes, o comprimento do duto apto a ser substituído é menor ou igual ao comprimento existente na ligação, ou seja,

$$\begin{aligned} X_{jdr} &\leq L_{1j} \\ X_{jds} &\leq L_{2j} \end{aligned}$$

onde  $L_{1j}$  é o comprimento no menor diâmetro na ligação e  $L_{2j}$  é o comprimento no maior diâmetro na ligação considerada. Podemos dizer também que

$$L_{1j} + L_{2j} = L_j, \quad \forall j. \quad \text{Equação 3}$$

Se há vários caminhos na rede entre o nó de demanda e a(s) fonte(s) com cotas fixas, então todos os caminhos entre estes pontos devem ser considerados. Contudo, cada ligação no caminho deve ser levada em consideração somente uma vez. No algoritmo apresentado anteriormente para obtenção dos caminhos (Dijkstra) esta informação foi levada em consideração garantindo seu sucesso.

Já que utilizaremos um sistema cíclico, outros fatores devem ser então levados em consideração. Se há vários caminhos de um nó  $i$  a uma fonte com pressões fixas, então todos os caminhos devem ser levados em consideração. A mudança de uma ligação considerando todos estes caminhos não devem ter

a mesma importância para a mudança de pressão no nó  $i$  como uma troca em outra ligação no mesmo caminho ou em outros.

De outra forma podemos dizer que há pesos que deveremos levar em consideração o que nos retrata a importância do nó ou da ligação.

Levando-se em conta a importância dos pesos modificamos então nossas restrições de pressão para a forma

$$\sum_{j \in P_i}^{NL} (G_{jdr} X_{jdr} + G_{jds} X_{jds}) \leq H_i - h_i, \forall i \quad \text{Equação 4}$$

sendo  $P_i$  o conjunto de ligações da fonte ao nó  $i$ . Levamos em consideração também que cada caminho é contado somente uma vez.

Em um sistema cíclico a linearidade assumida pela expressão anterior é considerada aproximadamente devido às mudanças de pressão. Assim sendo, é necessário implementar rotinas de cálculos de forma a reconsiderar novas demandas e pressões.

## 5.2 Descrição do Processo Iterativo e Critérios de Otimização

As novas demandas que serão calculadas pelo Método de Hardy-Cross, após as devidas variações nos diâmetros das tubulações dada pelo resultado da programação linear, são então utilizadas para recalcular os novos pesos das ligações. Um modelo de programação linear é novamente montado, e o processo é repetido iterativamente, até que uma condição de ótimo seja atingida.

No nosso sistema colocamos como condição de parada, além da confirmação de uma convergência dada por uma tolerância, limitações no número de iterações e de tempo de processamento. Todas estas condições são configuradas pelo usuário, e podem ser modificadas sempre que seja necessário.

Notamos que no decorrer do processamento, há constantes reduções nos diâmetros das ligações em relação ao inicialmente assumido. Contudo, a programação linear não é capaz de finalmente eliminar diâmetros não econômicos. As restrições de pressão consideram a mudança de pressão em um dado nó, ocasionado pela mudança nos diâmetros das tubulações. Estas mudanças são baseadas ao considerarmos demandas constantes na ligação que está sendo tratada. Como os diâmetros dos tubos tornam-se progressivamente menores para a mesma demanda, o gradiente hidráulico sofre modificações que ocasionam modificações de pressão no nó que está sendo considerado. Por exemplo, dada uma mesma demanda em uma ligação, uma redução de um diâmetro de 200 mm para 150 mm terá menos efeito que se houvesse a modificação de 150 para 100 mm. O efeito vai aumentando com as sucessivas reduções de diâmetros das ligações. No limite, isto é, quando o diâmetro tende a zero em uma ligação o gradiente de pressão tende a infinito e o problema torna-se impossível de resolver.

Pensando desta forma, cada ligação da rede é associada com um determinado peso e que participa das restrições de pressão que já mencionamos no modelo. A menor tubulação com menor peso em cada processamento é removido da rede e os fluxos são redistribuídos segundo a técnica de Hardy-Cross que utilizamos aqui. Logo após o processamento é repetido.

Para sermos mais práticos, os menores diâmetros da rede serão considerados como os mínimos permitidos pelo projetista, e dentro da realidade de mercado, ou seja, tubulações encontradas no comércio com facilidade.

As considerações de tubulações mínimas continuam em cada iteração até que um peso mínimo considerado seja maior que um valor específico, por exemplo, 0,5.

A utilização de tubulações com pesos pequenos é baseado nos princípios de hidráulica dos fluxos em redes. Pequenos pesos numa ligação mostram que a participação da ligação nas pressões e demandas em qualquer nó são pequenas. Assim sendo, a aplicação deste critério nos permite remover esta ligação da rede. No início do processamento de otimização é facultado também ao projetista indicar, com a sua sensibilidade, qual o máximo coeficiente de peso que deverá ser levado em consideração, ou seja, se o valor do peso da ligação estiver abaixo do configurado, a ligação será eliminado, conseqüentemente será um fator de redução do custo total da rede.

Finalmente, o ótimo é obtido quando a programação linear não consegue escolher para substituição qualquer parte da rede e o peso máximo em qualquer ligação é maior que um valor previamente especificado. Mesmo assim, a escolha deste critério não garante sempre um ótimo. Também, o critério utilizado para remover ligações é baseado nas demandas e na contribuição de cada ligação em qualquer nó.

Notamos que uma propriedade da programação linear é que quando uma solução ótima é encontrada, nenhuma restrição de comprimento será violada. A razão é que as restrições de comprimento se baseiam nas variáveis de decisão  $X_{jds}$  e  $X_{jdr}$ . Estas variáveis não representam os comprimentos atuais das ligações na rede mas sim, os comprimentos das ligações que poderão ser substituídas para termos uma solução mais barata. Ao encontrarmos o ótimo, nenhuma tubulação da rede poderá ser substituída e as variáveis  $X_{jds}$  e  $X_{jdr}$  deverão estar com os valores iguais a zeros.

### 5.3 Discussão da Formulação

A diferença entre este modelo e outros que já foram publicados para a análise de sistemas cíclicos é a introdução de um conjunto de restrições que asseguram que as perdas em cada ciclo é igual a zero. Em muitos modelos um conjunto de restrições é requerido para assegurar a consistência hidráulica na rede.

No nosso caso a consistência hidráulica é mantida pela utilização do Método de Hardy-Cross. Se a programação linear tende a variar o diâmetro das tubulações em cada processo iterativo então o sistema tornar-se-á hidraulicamente inconsistente. O Método de Hardy-Cross é então utilizado para redistribuir as vazões na rede e então passará os resultados obtidos para próximas iterações já com a consistência hidráulica satisfeita.

Quando a função objetivo é igual a zero em uma determinada iteração então nenhuma modificação foi efetuada na configuração da rede, isto é, a condição de ótimo foi satisfeita e as tubulações já atingiram as considerações de menor custo requeridas.

## 5.4 Algoritmo Para o Cálculo dos Pesos

O peso associado para a consideração das restrições de pressão do nó  $i$  da ligação  $j$  dado anteriormente, é denotado por  $W_{ijt}$ . A equação usada para determinar  $W_{ijt}$  é dada da seguinte forma:

$$W_{ijt} = W_j = (Q_j/I_m) \times W_m \quad \text{Equação 5}$$

onde,

$Q_j$	Fluxo na ligação $j$ ;
$I_m$	Soma das entradas no nó $m$ ;
$W_m$	Peso do nó imediatamente após a ligação $j$ .

Podemos também dizer que o peso do nó  $m$  é calculado por:

$$W_m = \sum_{j \in B} W_j \quad \text{Equação 6}$$

onde  $B$  é o conjunto de todas as saídas do nó  $m$ .

O algoritmo para o cálculo dos pesos é demonstrado pela aplicação do exemplo abaixo. O fluxo em cada ligação é obtido através do Método de Hardy-Cross.

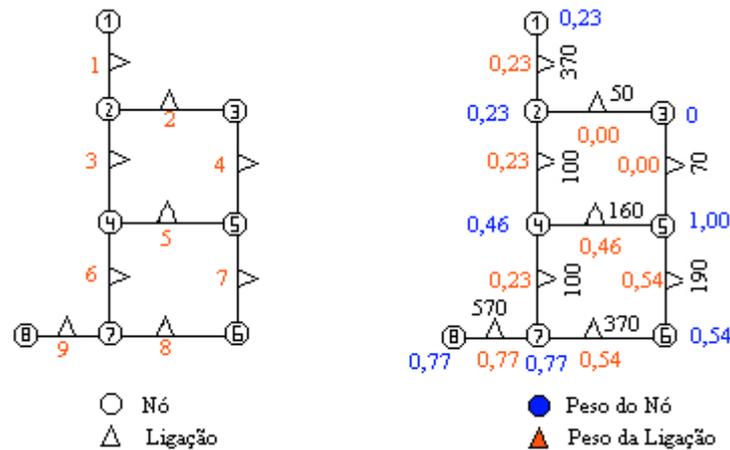


Figura 2. Exemplo do Cálculo dos Pesos na rede

Neste exemplo, a equação de restrição no nó 5 será desenvolvida. O procedimento começa imediatamente no nó 5 (UPSTREAM). O total do fluxo que entra no nó 5 é calculado da somatória de todas as entradas, isto é, as ligações 5 e 7 (  $160 + 190 = 350$  ). Os pesos das ligações 5 e 7 são calculadas deste total.

$$W_5 = (160/350) \cdot 1 = 0,46$$

$$W_7 = (190/350) \cdot 1 = 0,54$$

Estes pesos são então associados aos nós anteriores as ligações, isto é, nós 4 e 6. Ao nó 4, por exemplo, é atribuído o peso 0,46. Da mesma forma ao nó 6 é atribuído o peso 0,54.

Utilizando o mesmo raciocínio, a ligação 8 contribui 100% do fluxo para o nó 6 via o nó 7. O nó 8 tem então o seguinte peso:

$$W_8 = 1 \cdot (0,54) = 0,54.$$

A ligação 3 contribui com 50% do fluxo para o nó 4 e é calculado como

$$W_3 = (0,5) \cdot (0,46) = 0,23.$$

Da mesma forma temos:

$$W_6 = (0,5) \cdot (0,46) = 0,23.$$

Podemos notar então que o fluxo do nó 5 para o nó 7 segue dois caminhos distintos. O Peso para o nó 7 é então:

$$W_7 = (0,23) + (0,54) = 0,77.$$

Os nós 2 e 4 tem peso zero, desde que nenhum fluxo que vá para o nó 5 passe por estas ligações.

## 5.5 Algoritmo Para Otimização

Um problema de programação linear (PPL) é utilizado para identificar um conjunto de variáveis não negativas minimizando uma função objetivo linear sujeito a um conjunto de restrições lineares. Uma forma padrão para um PPL é dado da seguinte forma:

$$\text{Minimizar } z = \mathbf{c}^T \mathbf{x}$$

$$\text{Sujeito a } \mathbf{Ax} = \mathbf{b}$$

$$\mathbf{x} \geq 0.$$

Onde,  $\mathbf{A}$  é uma matriz de ordem  $m \times n$ ,  $m \leq n$ ,  $\mathbf{c}$  é um vetor de custos de  $n$  linhas,  $\mathbf{b}$  é um vetor de ordem  $m$ , e  $\mathbf{x}$  um vetor de  $n$  componentes.  $T$  também denota a transposição do vetor.

Vários problemas nas mais diversas áreas tais como economia, engenharia de produção, etc., são formulados através de modelos de programação linear.

Antes de prosseguirmos na definição do nosso algoritmo deveremos estabelecer algumas regras de fundamental importância:

1) Uma desigualdade da forma  $a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \leq b_1$  pode ser convertida em uma igualdade pela introdução de uma variável positiva (variável de folga)  $x_{n+1} \geq 0$ . Desta forma temos que  $a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n + x_{n+1} = b_1$ .

2) Se um PPL é dado na forma padrão exceto que uma ou mais variáveis são livres ( não necessário que sejam não negativas), o problema pode ser transformado na forma padrão pela substituição de  $x_i$  por

$$x_i = x_i'' - x_i', \text{ onde } x_i'' \text{ e } x_i' \text{ são não negativas.}$$

3) Se no PPL a função é maximizada, nós mudamos da maximização para a minimização pela multiplicação da função objetivo (FO) por -1.

### Construção do Método Simplex Revisado

Considerando um PPL na sua forma padrão e assumindo que a ordem de  $A$  é  $\underline{m}$ . Se  $B$  uma submatriz não singular de ordem  $m \times m$  da matriz  $A$ , e  $N$  é a submatriz restante de  $A$ , podemos escrever que

$$[B, N] \begin{bmatrix} X_B \\ X_N \end{bmatrix} = b$$

onde  $X_B$  e  $X_N$  tem  $\underline{m}$  e  $\underline{n-m}$  componentes, respectivamente. É assumido por conveniência que  $B$  consiste das primeiras  $m$  colunas de  $A$ .

Se  $X_N = 0$ , temos uma solução básica  $X_B = B^{-1}b$  e a matriz não singular  $B$  é a base. Do contrário, se  $X_B > 0$ , dizemos que  $X_B$  é uma solução básica satisfável.

### Teorema

Se uma solução é satisfável (satisfaz as restrições e há uma solução básica viável), então há uma solução básica satisfável. De outra forma, se há uma solução ótima minimizando  $z$ , então há uma solução básica ótima.

Este teorema é fundamental para desenvolver o algoritmo simplex, o melhor para a resolução de problemas de programação linear. Existem várias

versões deste algoritmo e conseqüentemente muitas implementações. Descreveremos aqui o método simplex primal revisado, que é o mais comum.

Primeiramente observe que particionando o vetor de custos  $\underline{c}$  em dois conjuntos de elementos  $X_B$  e  $X_N$  podemos expressar a função objetivo  $z$  como

$$z = C_B^T X_B + C_N^T X_N \quad \text{Equação 7}$$

e utilizando

$$X_B = B^{-1}b - B^{-1}NX_N \quad \text{Equação 8}$$

obtemos

$$z = C_B^T B^{-1}b + (C_N^T - C_B^T B^{-1}N)X_N = z_0 + p^T X_N \quad \text{Equação 9}$$

onde  $z_0 = C_B^T B^{-1}b$  e  $p^T = C_N^T - C_B^T B^{-1}N$

O valor da função objetivo  $\underline{z}$  pode ser obtido na próxima iteração se encontrarmos um componente negativo de  $\underline{p}$  e introduz-se uma variável não básica no conjunto. O vetor  $\underline{p}$  pode ser computado em dois passos:

$$B^T \lambda = C_B \quad \text{e} \quad p^T = C_N^T - \lambda^T N$$

onde  $\lambda$  é chamado de vetor dos multiplicadores do simplex e  $\underline{p}$  o vetor relativo de custo.

$$\text{Se} \quad p_k = C_{Nk} - \lambda^T a_k < 0$$

para alguns  $m+1 \leq k \leq n$ , então  $a_k$  é uma coluna não básica de  $A$  que pode entrar na base  $B$  na próxima iteração e a função objetivo será reduzida. Restamos encontrar a coluna de  $B$  que sairá da base. Chamando a solução básica  $x_0$ , temos que:

$$X_B = X_0 - B^{-1}a_k x_{Nk} \geq 0 \quad (1)$$

ou  $X_B = X_0 - yx_{Nk} \geq 0$

onde  $y$  é obtido pela resolução de  $By = a_k$

A desigualdade (1) deve ser satisfeita para manter a integridade da próxima solução  $X_B$ . A coluna que deixa a base pode ser então encontrado examinando-se  $x_{0i}/y_i$  para  $y_i > 0$  e  $i=1,2,\dots,m$ .

$$\text{Se } \theta = \frac{x_{0i}}{y_i} = \min_{1 \leq i \leq m, y_i > 0} \left[ \frac{x_{0i}}{y_i} \right]$$

então a variável  $x_{bi}$  torna-se zero e é movida para o conjunto não básico. A coluna  $a_i$  junta a matriz não básica  $N$ .

## 5.6 Algoritmo para o Simplex Revisado

Passo 1: Dada uma base  $B$  tal que

$$x_B = B^{-1}b \geq 0$$

Passo 2: Resolve-se

$$B^T \lambda = C_B \quad \text{para o vetor } \lambda \text{ dos multiplicadores do simplex.}$$

Passo 3: Selecione uma coluna  $a_k$  de  $N$  tal que:

$$p_k = c_{Nk} - \lambda^T a_k < 0$$

Podemos, por exemplo, selecionar  $a_k$  que dê o maior valor negativo de  $p_k$ .

$$\text{Se } p^T = c_N^T - \lambda^T N \geq 0$$

então pare. O ótimo foi encontrado.

Passo 4: Resolver para  $y$  o sistema de equações  $By = a_k$ .

Passo 5: Encontrar

$$\theta = \frac{x_{0i}}{y_i} = \min_{1 \leq i \leq m, y_i > 0} \left[ \frac{x_{0i}}{y_i} \right]$$

se não existe  $y$  positivo, então o conjunto de  $Ax = b, x \geq 0$  é ILIMITADO e  $z$  pode ser um grande número negativo. Termina-se a computação.

Passo 6: Atualiza-se a matriz  $B$  e repete-se do passo 2.

O passo 1 assume que uma solução básica satisfatível é avaliada. Em vez de encontrar a solução para  $Ax = b, x \geq 0$ , considere um problema auxiliar de minimização

$$\min \sum_{i=1}^m y'_i$$

sujeito a

$$Ax + Iy' = b$$

$$x \geq 0$$

$$y' \geq 0$$

onde  $y'$  é o vetor de variáveis artificiais. Nós podemos encontrar uma solução ótima tal que

$$\sum_{i=1}^m y'_i = 0 \quad (2)$$

então teremos obtido também uma solução básica  $X_B$ . Se a equação (2) tem um valor mínimo maior que 0, então não há solução satisfatível para  $Ax = b, x \geq 0$ . O problema (2) é fácil de resolver usando o método simplex desde que se tenha uma solução inicial óbvia  $x = 0, y' = b$ , para  $B = I$ . Este método de duas fases foi implementado por nós para o cálculo do modelo em questão. A FASE I é utilizada para encontrar uma solução satisfatível para  $Ax = b, x \geq 0$ , ou para determinar que nenhuma solução satisfatível existe, A FASE II usa a solução básica viável gerada na fase I e resolve o problema.

O método resolve repetidas vezes o sistema de equações  $B^T \lambda = c_B$  e  $By = a_k$ , onde os  $B$ 's diferem somente por uma coluna entre duas iterações

sucessivas. Um modo simples de resolver estas equações é computar  $B^{-1}$ , e calcular  $\lambda$  e  $y$ . Atualizando  $B^{-1}$  entre duas iterações sucessivas pelas operações de pivoteamento aplicado em  $B^{-1}$ . Se  $B^{-1}$  é a matriz inversa corrente e  $B'^{-1}$  é a nova inversa atualizada, teremos a relação

$$B'^{-1} = EB^{-1}$$

onde  $E$  é uma matriz elementar da forma

$$E = \begin{bmatrix} 1 & & & \eta_1 & & \\ & \ddots & 0 & \vdots & & 0 \\ & & 1 & & & \\ & & & \ddots & & \\ 0 & & & \eta_l & & \\ & & & \vdots & \ddots & \\ & & & \eta_m & & 1 \end{bmatrix} \text{ e } \eta^T = \left( -\frac{y_1}{y_l}, \dots, -\frac{y_{l-1}}{y_l}, \frac{1}{y_l}, -\frac{y_{l+1}}{y_l}, \dots, -\frac{y_m}{y_l} \right)$$

Agora nós temos a opção de atualizar os elementos de  $B^{-1}$  explicitamente ou através da inversa. A primeira aproximação é praticamente tão longa quanto as  $m^2$  locações de acesso randômico da memória usada para armazenar  $B^{-1}$ . Para problemas de ordem elevada necessitaremos de outras mídias para o armazenamento destes dados. Neste método nos computamos uma seqüência de matrizes e representamos  $B^{-1}$  depois da iteração  $p$  pelo produto:

$$B^{-1} = E_p \dots E_3 E_2 E_1$$

Assumimos que a base original foi a matriz unitária  $I$ . Esta forma de base inversa é muito conveniente para implementações com dispositivos seqüenciais de memória. O vetor  $\lambda^T$  é calculado pela fórmula

$$\lambda^T = ((c_B^T E_p) E_{p-1}) \dots E_1$$

e para calcular  $y$  utilizamos

$$y = E_p \dots (E_2 (E_1 a_k))$$

Cada iteração do método simplex adiciona um ou mais vetores  $\eta$ . Na prática, somente elementos diferentes de zero de  $E_j$  são armazenados e, em geral, requerem menos áreas de armazenamento que a matriz explícita  $B^{-1}$ . Assim, o método da inversa tem sido muito utilizado para problemas de grandes dimensões com matrizes esparsas.

Contudo, como as iterações do simplex continuam, a representação do método da inversa de  $B^{-1}$  requer o armazenamento de novas matrizes elementares. Para limitar o crescimento da área de armazenamento e preservar as aproximações numéricas é necessário parar o processo iterativo periodicamente e reinverter a matriz  $B$  usando as colunas de  $A$ . O passo da reinversão é seguido depois pela recomputação de  $X_B$  da equação  $X_B = B^{-1}b$ , e uma sequência de iterações até uma reinversão subsequente.

*Exemplo*

$$\text{Minimizar } z = -0,5 x_1 - 0,4 x_2$$

$$\text{Sujeito a } x_1 + 2x_2 + x_3 = 24$$

$$1,5x_1 + x_2 + x_4 = 18$$

$$x_1 + x_5 = 11$$

$$x_1, x_2, \dots, x_5 \geq 0.$$

Temos então as matrizes e vetores definidos por

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 & 0 & 0 \\ 1,5 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, b = \begin{bmatrix} 24 \\ 18 \\ 11 \end{bmatrix}, c = \begin{bmatrix} -0,5 \\ -0,4 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Ao iniciar a computação escolhemos

$$X_B = \begin{bmatrix} x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix}, B = B^{-1} = I, C_B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

que nos dá

$$X_B = B^{-1}b = (24; 18; 11)$$

Calculando  $\lambda$  e  $p$ :

$$\lambda^T = c_B^T B^{-1} = (0,0,0)$$

$$p^T = c_N^T - \lambda^T N = (-0,5; -0,4)$$

e selecionando  $x_1$  para entrar na base.

Resolvendo para  $y$  o sistema de equações  $By = a$ , temos

$$y = \begin{bmatrix} 1 \\ 1,5 \\ 1 \end{bmatrix}$$

O valor de  $\theta$  é  $\theta = \min(24/1; 18/1,5; 11/1) = 11$

e  $x_5$  deixa a base. A nova matriz inversa e solução básica são

$$\bar{B}^{-1} = EB^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1,5 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1,5 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\bar{x}_B = \bar{B}^{-1} b = \begin{bmatrix} 13 \\ 1,5 \\ 11 \end{bmatrix}$$

assim sendo, a primeira iteração se completa.

## 6 INTERFACE GRÁFICA

### 6.1 Introdução

No desenvolvimento da interface gráfica, aqui chamada de Sistema NOS, utilizamos o sistema operacional *Windows NT Server Versão 4*. Embora tenhamos começado utilizando o Windows 95, nosso objetivo com a mudança do sistema operacional deveu-se à alta estabilidade que o Windows NT nos apresentou. Embora não o conhecêssemos bem, já tínhamos lido várias literaturas a seu respeito e em relação ao seu potencial. Resolvemos arriscar e, de uma forma geral, acertamos na escolha.

Como linguagem de programa escolhemos o *Visual Basic 5 Enterprise* pela sua facilidade de codificação, interface gráfica e farta documentação. Começamos a desenvolver este projeto com o Visual Basic 3 e, evoluímos gradativamente e sem maiores problemas. O aplicativo foi desenvolvido com orientação a eventos, embora tenhamos algumas bibliotecas desenvolvidas em Visual C++ com orientação a objetos. Também escolhemos esta linguagem pela sua integração com outros produtos Microsoft, já consagrada no mercado internacional. Com a escolha da linguagem intuitivamente escolhemos a estrutura de bancos de dados para integrar ao sistema, ou seja, resolvemos utilizar o padrão Microsoft Access © , o qual evoluímos da versão 2.0 para a versão 97 facilmente. A estrutura dos arquivos se mostraram maleáveis e de fácil manutenção, bem como sua estabilidade em relação a contratempos que geralmente ocorrem em processamento eletrônico de dados.

De uma forma geral os produtos que ora utilizamos são, segundo várias revistas de renome, os mais utilizados no mercado e, desta forma, estamos tranqüilos em relação as manutenções que possamos necessitar.

Também, ao iniciarmos o nosso sistema, começamos com um microcomputador AT486 Dx2-66 com 8 Mb de memória RAM e 530 Mb de disco rígido, bem como uma placa de vídeo Trident de 1 Mb. Com o crescimento de nosso sistema e a implantação de rotinas gráficas mais elaboradas tornou-se bastante lento o processamento do modelo, bem como a exibição das imagens geradas, principalmente após a utilização de imagens obtidas por aerofotogrametria. Desta forma, ampliamos gradativamente nossos recursos de *hardware* e chegamos a uma configuração básica ideal que descreveremos oportunamente.

A evolução em termos de recursos de *hardware* e *software* que ocorreu durante o desenvolvimento de nosso projeto, proporcionou-nos um aprendizado de análise de sensibilidade bastante satisfatória. Forçou-nos a analisar o sistema como o todo e a observar as particularidades que teríamos em diversas configurações e ambientes.

## 6.2 Ambiente Necessário

### 6.2.1 Recursos de Hardware

Processador	:	Compatível com IBM\PC\AT processador 486Dx2-66 ou superior. Coprocessador aritmético.
Memória Principal:	:	Mínima de 8 Mb (Recomenda-se 32 Mb).
Memória Cache	:	64 Kb (Recomenda-se 512 Kb).
Disco Rígido	:	Área Livre Mínima de 40 Mb.
Disco Backup	:	Disquete Mínimo de 1.44 Mb, 3,5” ou Unidade de ZIP-Drive de 100 Mb.
Monitor	:	Policromático VGA ou superior.
Teclado	:	Padrão 104 teclas.
Apontador	:	Mouse ou outro.
Impressora	:	Qualquer uma que incorpore o modo gráfico. Papel padrão no formato Carta.

Neste projeto utilizamos:

1. Microcomputador Pentium 200 MMX com 64 Mb de memória RAM; 512 Kb de memória cache, disco rígido de 4 Gb; unidade de disco flexível de 3,5” de 1,44 Mb; Monitor policromático SAMSUNG SM6 de 17” com dot pitch 0,26 e controladora de vídeo de 4 Mb PCI TRIDENT; mouse genius de 3 botões; teclado padrão Windows 95.
2. Impressora Epson Stylus Color 600 com resolução de 1440 dpi.
3. Scanner de página Genius SP2 com resolução de 4800 dpi.

## 6.2.2 Recursos de Software

Para o desenvolvimento de nosso sistema utilizamos os *softwares*<sup>1</sup> que descrevemos abaixo, contudo, após a instalação do sistema através de um conjunto de discos denominado “SETUP DISKS”, todas as bibliotecas e arquivos necessários serão copiados para o disco destino. O registro do sistema e de suas bibliotecas serão realizados automaticamente.

<i>Software</i>	Descrição
Windows NT Server 4.0	Sistema operacional
Windows 95	Sistema operacional
Visual Basic 5	Linguagem
Visual C++	Linguagem
Fortran Power Station	Linguagem
Delphi 3	Linguagem (Borland)
Microsoft © Access 97	Gerenciador de bancos de dados
Word 97	Editor de textos
Excel 97	Planilha eletrônica
Power Point 97	Gerador de apresentações
Corel Draw 6	Editor gráfico
Asymetrix 3D FX	Gerador de apresentações
Paint Shop Pro	Editor gráfico utilizado no tratamento de imagens
Lindo	Programação linear
Men	Programa de métodos numéricos elaborado pelo autor (Apoio numérico)

<sup>1</sup> Alguns softwares aqui descritos foram utilizados apenas como referência e apoio à decisões.

### **6.2.3 Padronizações Adotadas**

#### **BASES DE DADOS:**

Foi utilizado a estrutura padrão do Microsoft Access © versão 97, tanto pela sua facilidade de gerenciamento de dados como pela sua estabilidade em relação a possíveis anormalidades no sistema e também por suas rotinas de consulta que demonstraram um ótimo resultado.

#### **ARQUIVO DE MODELO DA REDE:**

Segundo a formatação do Access. Utilizamos para os arquivos de criação do modelo, qualquer nome com até 255 caracteres e extensão “.NOS”.

#### **ACESSO ÀS INFORMAÇÕES:**

Utilização de estrutura SQL em uso tanto pelo Access como pelo Visual Basic.

#### **LINGUAGEM HOSPEDEIRA:**

Microsoft (c) Visual Basic 5 com compilação em 32 bits. A compilação em 16 bits também poderá ser facilmente efetuada para efeitos de compatibilidade com o Windows 3.11.

## **RELATÓRIOS:**

Os relatórios são pré-formatados segundo o *software Crystal Reports* da Seagate Corporation, padrão para as principais linguagens visuais nos dias atuais. Resolvemos utilizar este recurso pela facilidade na confecção de relatórios e pela potencialidade do *software* em questão. Como após todo processamento de otimização do modelo os cálculos são armazenados em campos específicos no próprio arquivo de dados, os relatórios realizados resumem-se basicamente em operações de ler-imprimir.

### **6.2.4 Definições dos Módulos do Sistema**

Para efeito de organização e manutenção do sistema, devido a sua carga gráfica, resolvemos dividi-lo nos seguintes módulos:

<b>Módulo</b>	<b>Descrição</b>	<b>Arquivo</b>
Apresentação	Apresentação do sistema	Apresentação.Exe
Principal	Controle de todo o sistema. Gerencia todos os módulos secundários	Nos.Exe
Processamento	Processamento e gerenciamento gráfico do modelo	Processa.Exe
Tabelas	Gerência das Tabelas do sistema	Tabelas.Exe
Relatórios	Controle e impressão de relatórios	Report.Exe
Suporte	Utilitários do sistema. Utilizado para reparar e\ou compactar bancos de dados compatíveis com o Microsoft © Access.	Suporte.Exe
Ajuda	Ajuda ao usuário	Ajuda.Exe

Tabela 2. Definições dos Módulos do Sistema

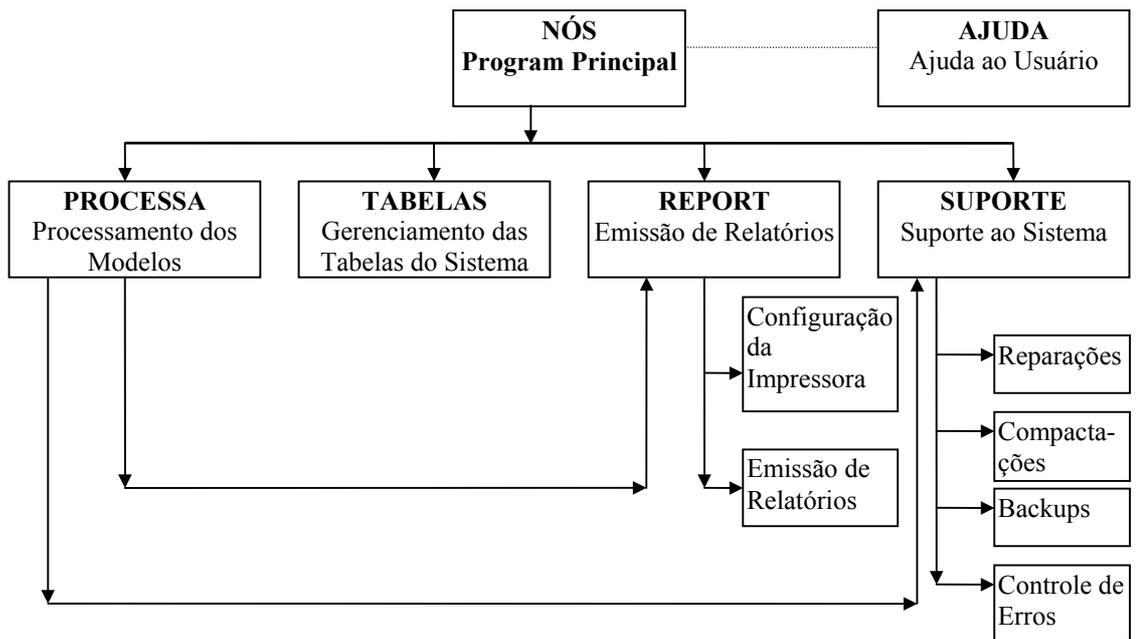


Figura 3. Fluxograma Resumido do Sistema

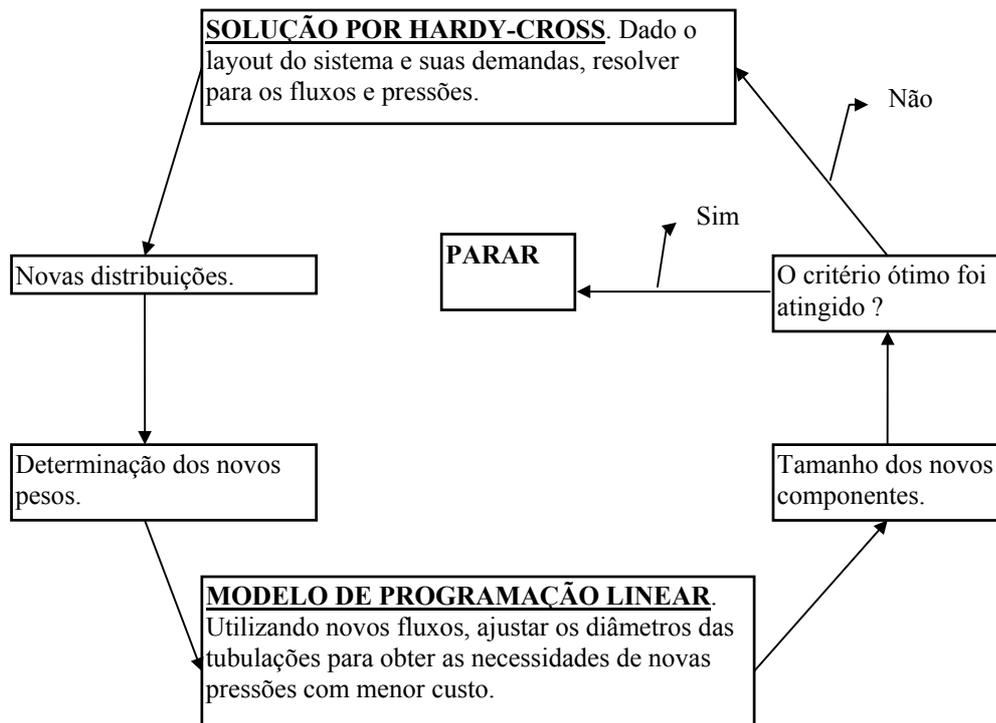


Figura 4. Fluxograma Geral dos Cálculos

### 6.3 Operação do Sistema

Toda a operação no sistema inicia-se pela execução do módulo principal, que faz a chamada de módulos secundários específicos de acordo com a solicitação do usuário. Com a execução deste módulo, o sistema faz a identificação do usuário, checagem se os arquivos necessários estão registrados, e se a integridade entre os módulos está completa. A partir da confirmação de todos os testes o sistema torna-se disponível para uso. Caso o sistema apresente algum problema, o usuário será alertado através de código de erro específico e orientado à resolvê-lo.

As operações disponíveis ao usuário são mostradas através de opções no MENU DE LINHA na parte superior da tela do módulo específico ou através de ícones e botões em destaque. Para acessá-las o usuário deve clicar sua opção marcada pelo dispositivo apontador (*mouse*) ou utilizando a junção das teclas ALT + (Caracter sublinhado em destaque). Algumas operações que merecem mais atenção somente são liberadas após a confirmação específica. Dentre elas podemos destacar: exclusões, inclusões, alterações, etc.

Na *interface* gráfica os comandos e operações correntes são destacados através de uma linha de contorno que denominamos FOCO, ou seja, o objeto com o FOCO pode ser acionado pelo clique do dispositivo apontador ou através do pressionamento da tecla ENTER. Também, com o objetivo de agilizarmos a mudança de uma opção à outra, disponibilizamos a tecla TAB, que, ao ser pressionada, transfere o FOCO para o próximo objeto da seqüência, previamente definida na programação do sistema. Para retornar a um objeto anterior também pode-se pressionar as teclas SHIFT + TAB simultaneamente.

### 6.3.1 Módulo Principal

O Módulo Principal tem como objetivo controlar todos os módulos secundários do sistema e compõe-se das seguintes opções:

#### Opções do Módulo Principal:

- |                    |   |  |
|--------------------|---|--|
| <u>F</u> inalizar  | - | Finaliza o Sistema.                            |
| <u>P</u> rocessar  | - | Executa o módulo de processamento dos modelos. |
| <u>T</u> abelas    | - | Controle cadastral das tabelas do sistema.     |
| <u>R</u> elatórios | - | Executa o módulo geral de relatórios.          |
| <u>S</u> uporte    | - | Executa o módulo de SUPORTE                    |
| <u>A</u> judar     | - | Acessa o manual do sistema.                    |

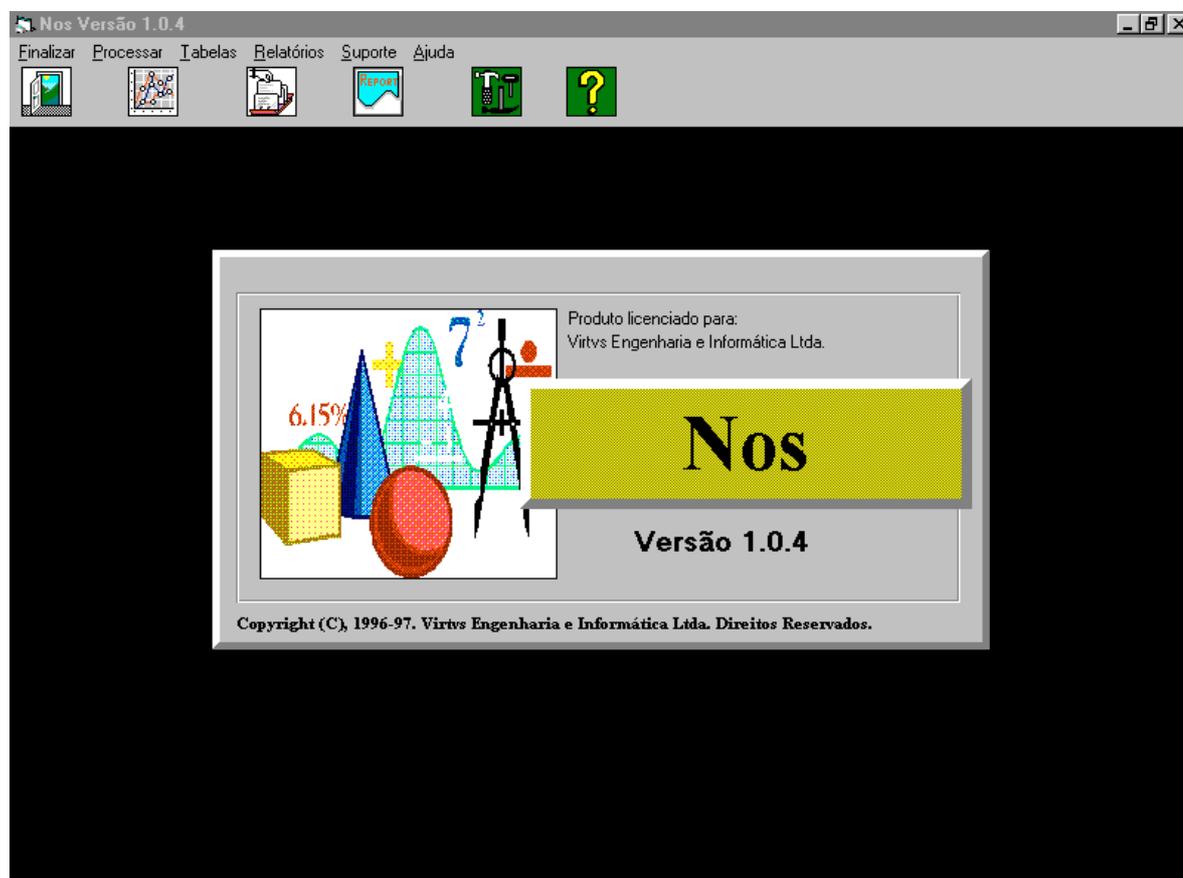


Figura 5. Tela de Menu Principal e Apresentação do Sistema

### 6.3.2 Módulo de Processamento

O módulo de processamento tem como objetivos, além da elaboração e controle dos arquivos do modelo, realizar os procedimentos de cálculos de otimização e distribuição da rede.

Durante a execução deste módulo o usuário pode fazer a entrada de dados do *layout* da rede, informando todos os seus componentes e propriedades específicas, bem como distribuir na rede, uma configuração inicial base a ser utilizada nos cálculos.

Neste módulo estão todas as rotinas de cálculos para a otimização e equilíbrio hidráulico da rede, que o usuário pode controlar, analisar e simular para atender seus objetivos específicos. Na área de trabalho da *interface* gráfica é apresentada o *layout* da rede, bem como o resultado de ligações que podem ser eliminadas. A partir da visualização desta rede e de suas características após os cálculos, o usuário pode, através de sua sensibilidade como projetista, adequar às condições reais e específicas do projeto.

Durante a execução dos procedimentos de cálculos disponibilizamos ao usuário uma linha de estado do processamento, ou seja, um acompanhamento passo a passo de todos os cálculos que o sistema realiza. Dependendo da configuração de início de cálculo, um arquivo de journalização pode ser utilizado, ou seja, será gravado em disco todos os passos realizados nos cálculos, muito útil para depurações.

## Opções Principais do Módulo de Processamento:

- Editar - Realiza operações nos arquivos e finaliza o módulo.
- Configurar - Configura o ambiente de trabalho.
- Visualizar - Visualiza os diversos gráficos da rede.
- Otimizar - Exibe a tela de início da otimização, disponibilizando várias opções de processamento e resumo do modelo.
- Utilitários - Executa utilitários do módulo.

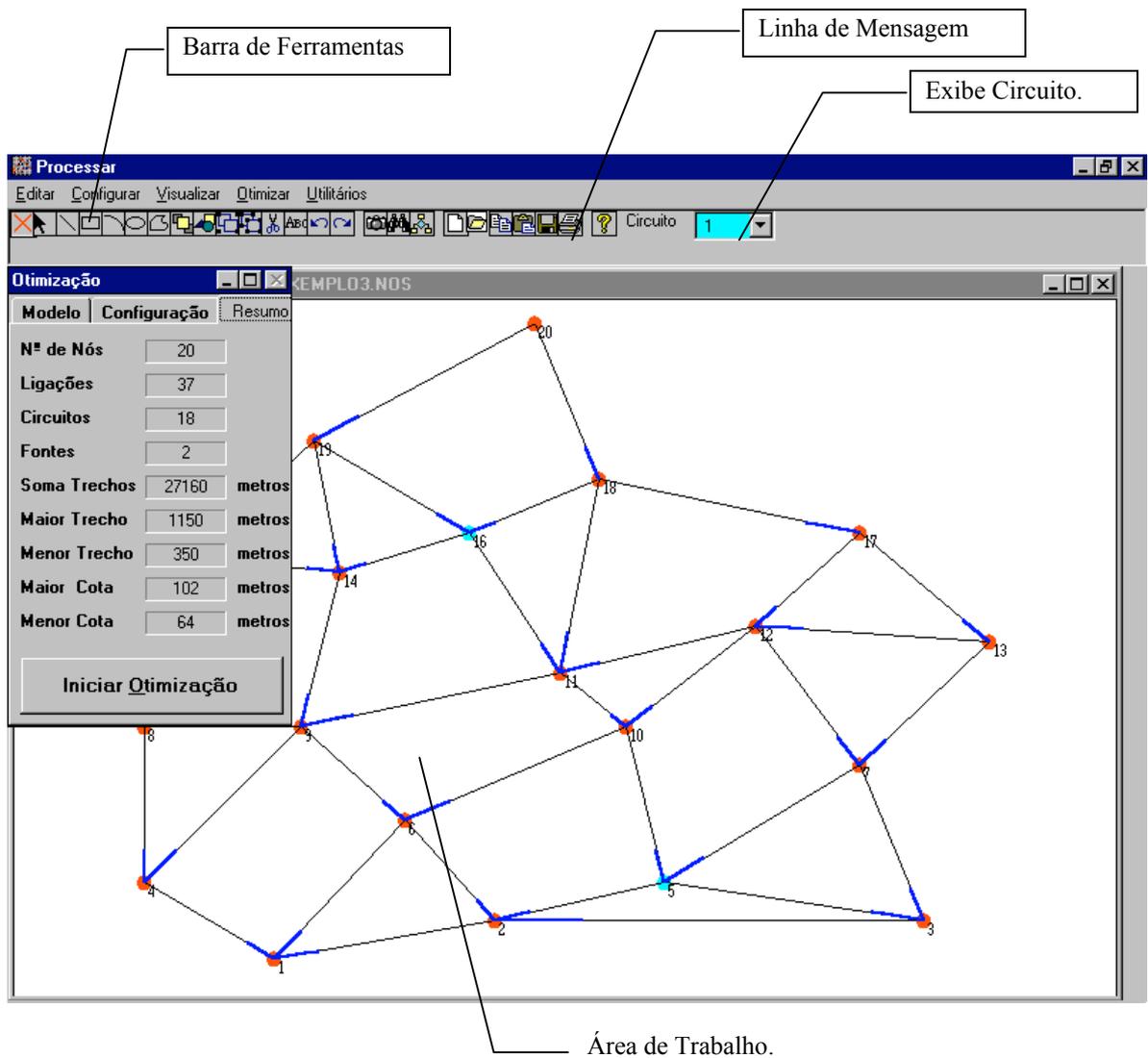


Figura 6. Tela do Módulo de Processamento

### Opções da Janela EDITAR:

- |                          |   |   |
|--------------------------|---|---|
| <u>N</u> ovo Modelo      | - | Cria um novo modelo.                    |
| <u>A</u> brir Modelo     | - | Abre um modelo já existente.            |
| Abrir <u>M</u> apa       | - | Abre um mapa (desenho do modelo .BMP).  |
| <u>E</u> ntrada de Dados | - | Entrada dos dados do modelo.            |
| <u>L</u> impar Área      | - | Limpa a área de trabalho.               |
| <u>R</u> emover Modelo   | - | Exclui um modelo existente.             |
| Salvar Figura            | - | Salva a figura corrente com padrão BMP. |
| Fechar Modelo            | - | Fecha o modelo em uso.                  |
| Imprimir Esta Tela       | - | Imprime a tela corrente.                |
| <u>F</u> inalizar        | - | Encerra o módulo de processamento.      |

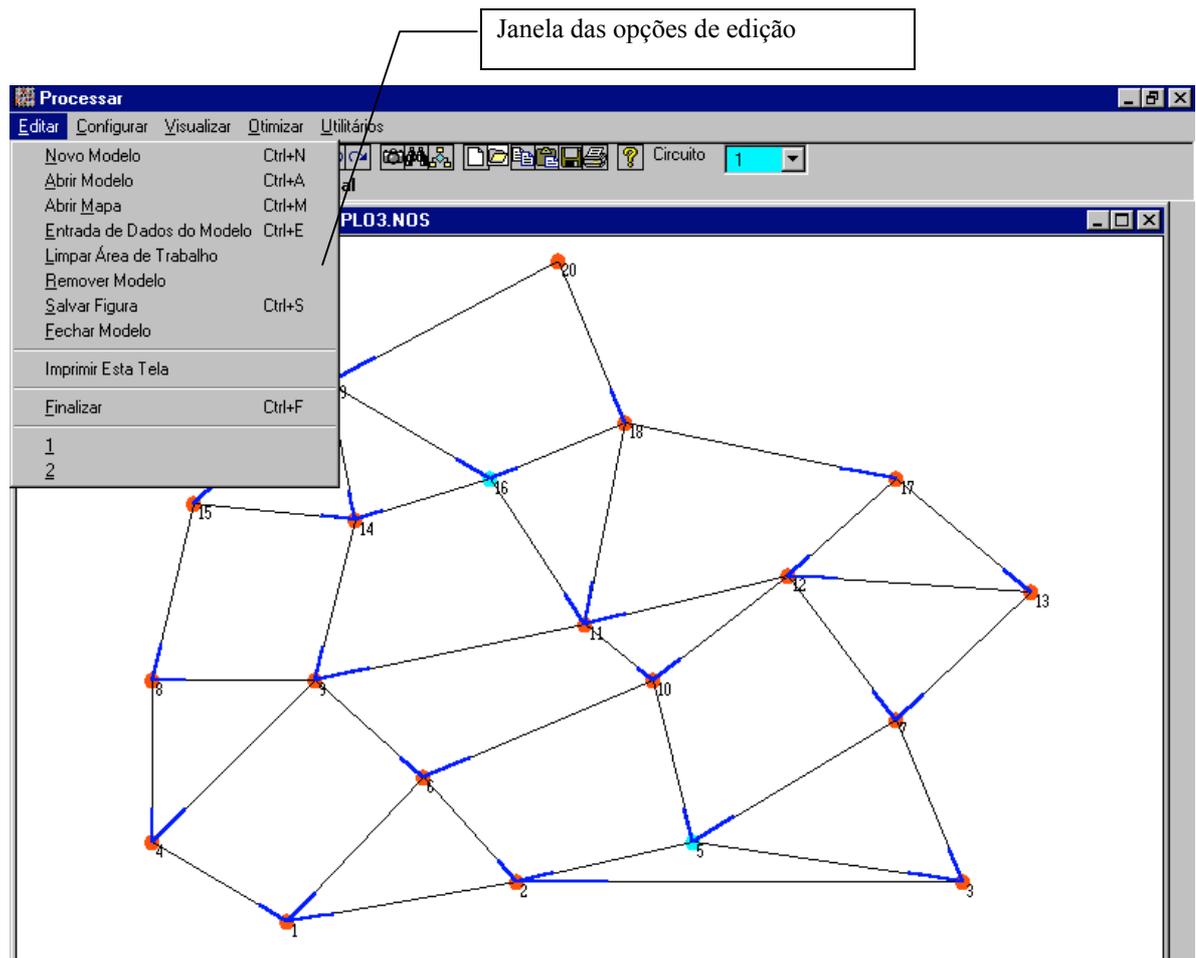


Figura 7. Janela Editar do Módulo de Processamento

### Entrada de Dados:

A entrada de dados no modelo é feita através da opção de ENTRADA DE DADOS e apresentada-se em uma janela com vários painéis (Nós, Ligações, Caminhos e Tubulações). Cada painel corresponde a uma particularidade da rede, ou seja, o usuário informará todos os detalhes do *layout* da rede para que o sistema possa processá-la quando solicitado. Para registrar os dados correspondentes o usuário deverá preencher os campos em destaque e, ao final, clicar no botão GRAVAR, para que os dados sejam incluídos ou alterados no arquivo do modelo em uso. Caso seja necessário a exclusão de um determinado registro o usuário deverá informá-lo e, em seguida, pressionar o botão EXCLUIR.

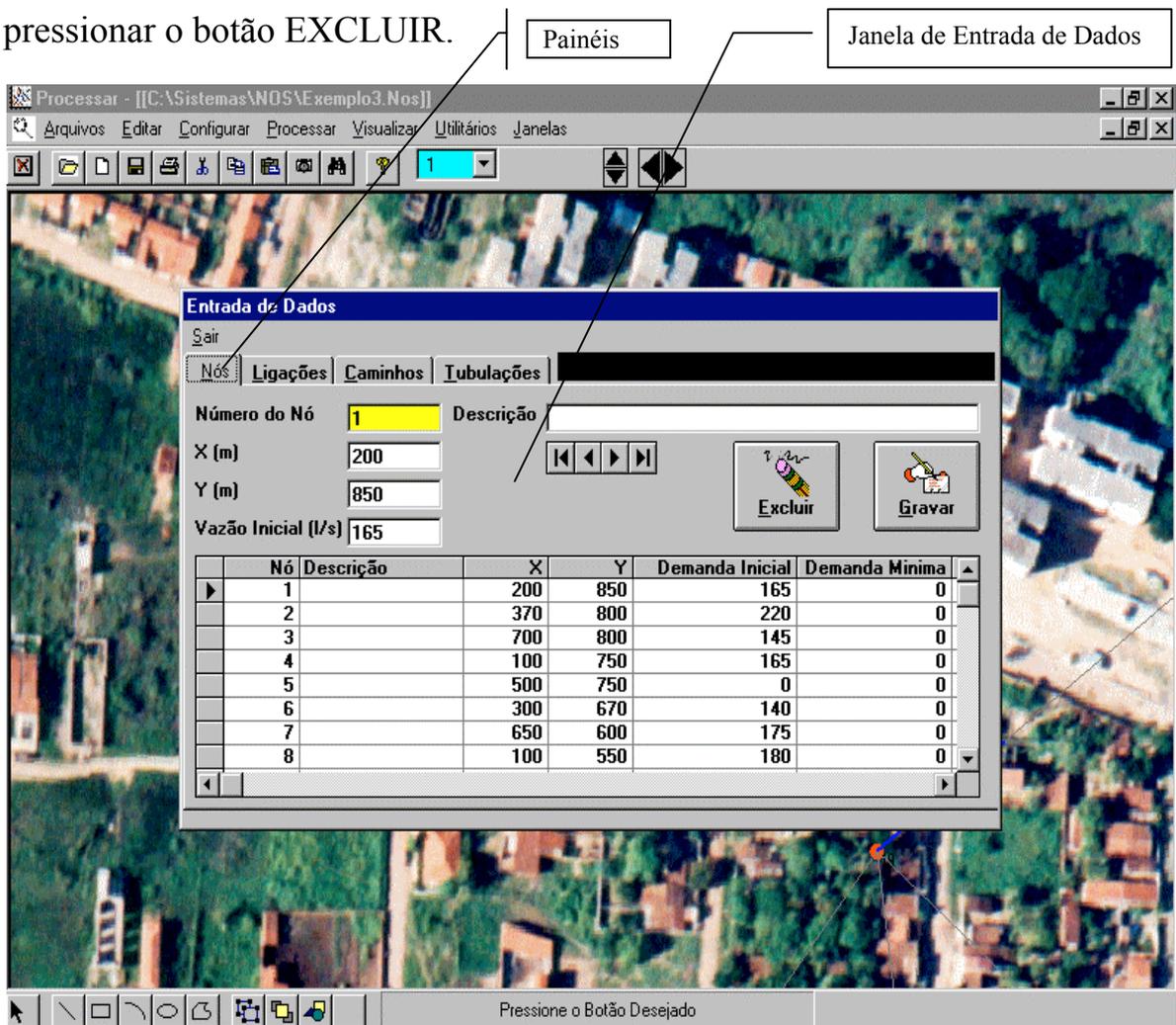
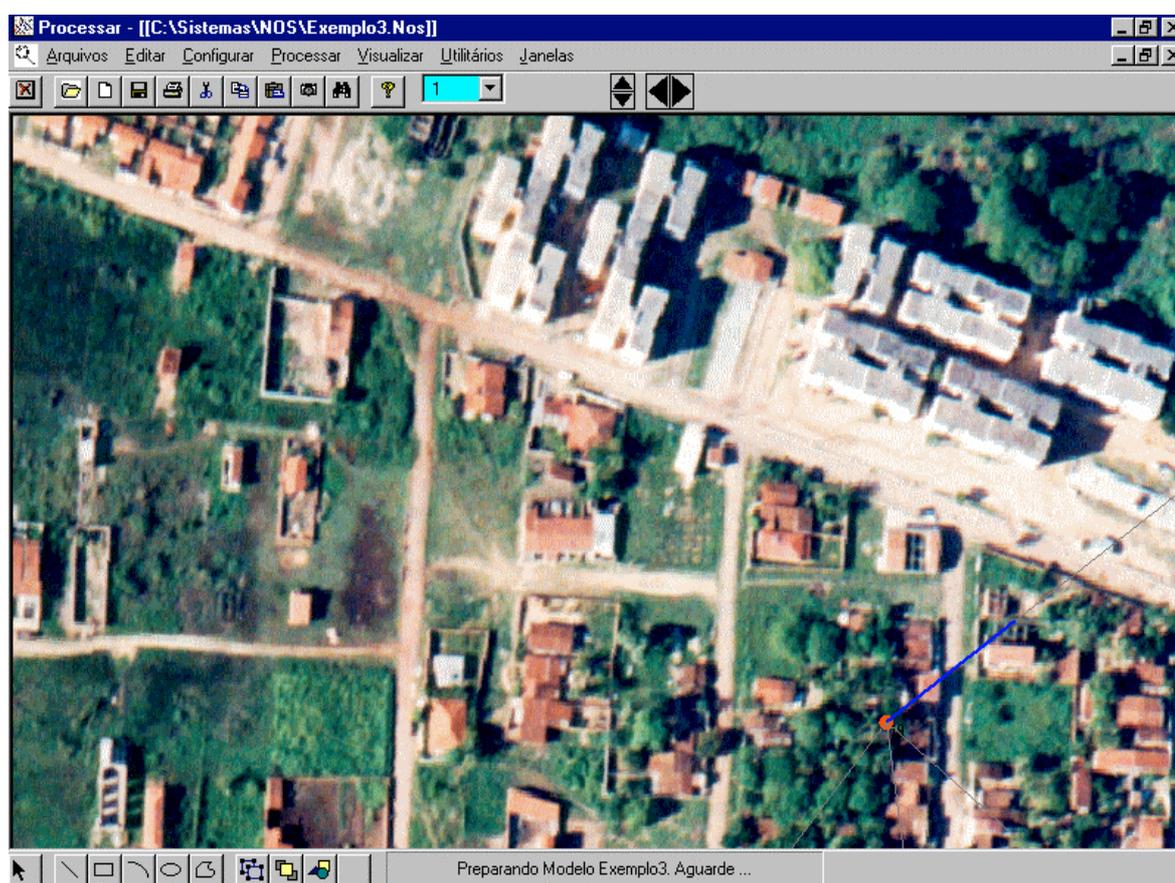


Figura 8. Entrada de Dados do Modelo

O modelo também pode ser associado com um gráfico ou imagem aerofotogramétrica para efeito da disposição real do *layout* da rede. Desta forma ao se abrir determinado modelo será solicitada a carga de uma imagem de fundo, a qual, se confirmada a opção, será exibida juntamente com os dados da rede. O gráfico abaixo mostra a exibição de uma imagem real obtida por aerofotogrametria e tomada no bairro do Castelão, em Fortaleza-Ceará. Recomendamos, sempre que possível, a não exibição desta imagem de fundo quando houver a necessidade do processamento do modelo, devido a grande ocupação de memória principal que será exigida, a não ser que os recursos computacionais disponíveis sejam propícios.



**Figura 9. Exibição da Imagem Aerofotogramétrica**

Para facilitar a navegação em imagens que cobrem grandes áreas, também dispomos no sistema de uma janela de *ZOOM*, ou seja, um recurso dado ao usuário de forma a aumentar ou diminuir o tamanho da imagem, ou *layout* da rede em questão. A imagem poderá ser alterada em padrões pré-definidos (10%, 25%, 50%, etc.) ou de forma livre, bastando que as bordas da janela sejam arrastadas. Recomendamos que esta opção somente seja utilizada quando realmente necessária, já que a memória principal necessária para a visualização em *ZOOM* praticamente é a mesma para a apresentação da imagem de fundo.

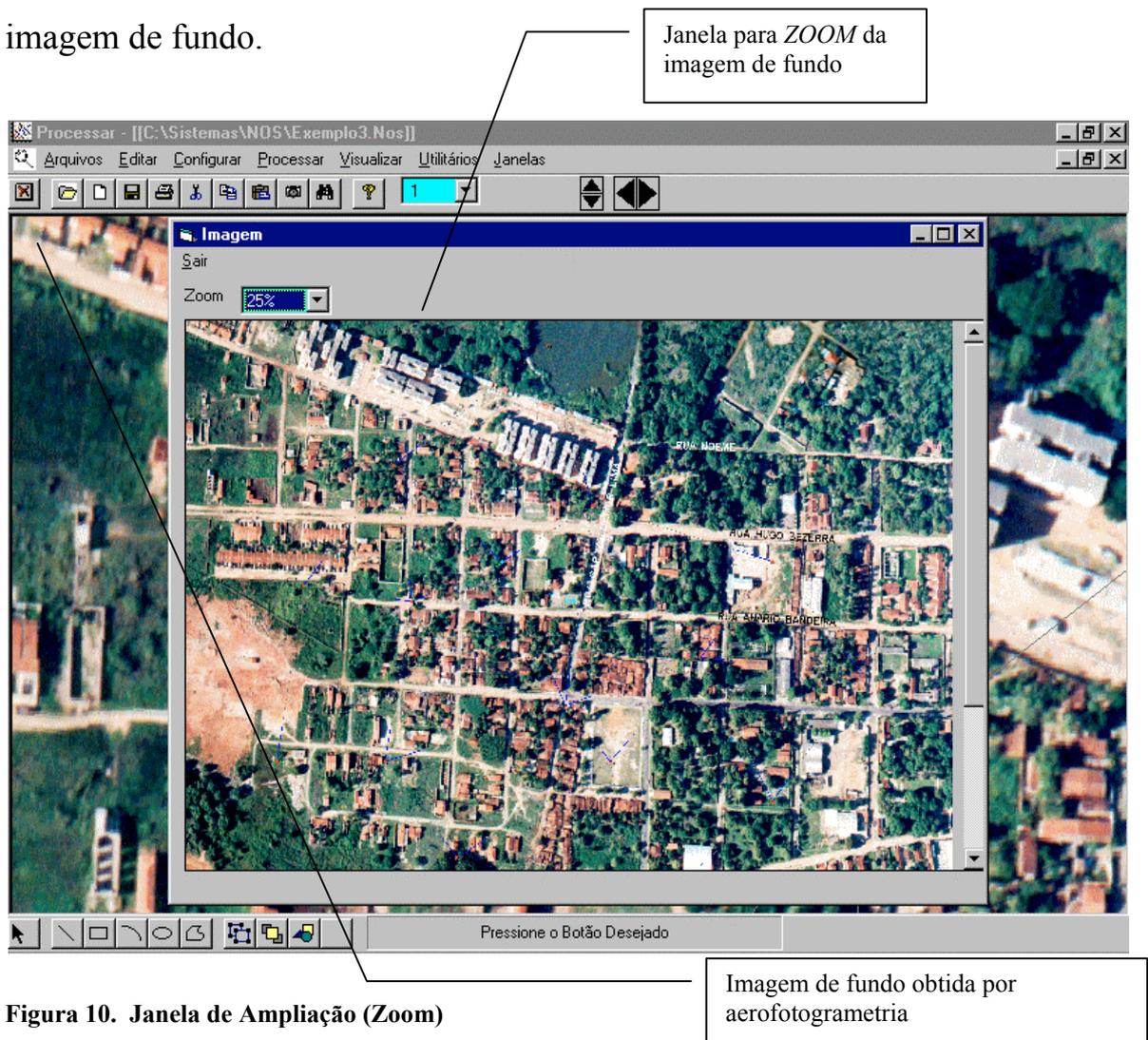


Figura 10. Janela de Ampliação (Zoom)

### Opções da Janela CONFIGURAR:

- Ambiente - Configura o ambiente manualmente.
- Cores - Configuração de cores da área de trabalho.
- Ativar L. de Chamada - Ativa as linhas de chamada.
- Ativa P. do Cursor - Exibe a coordenada corrente na tela.
- Linhas de Grade - Exibe linhas de grade na área de trabalho.

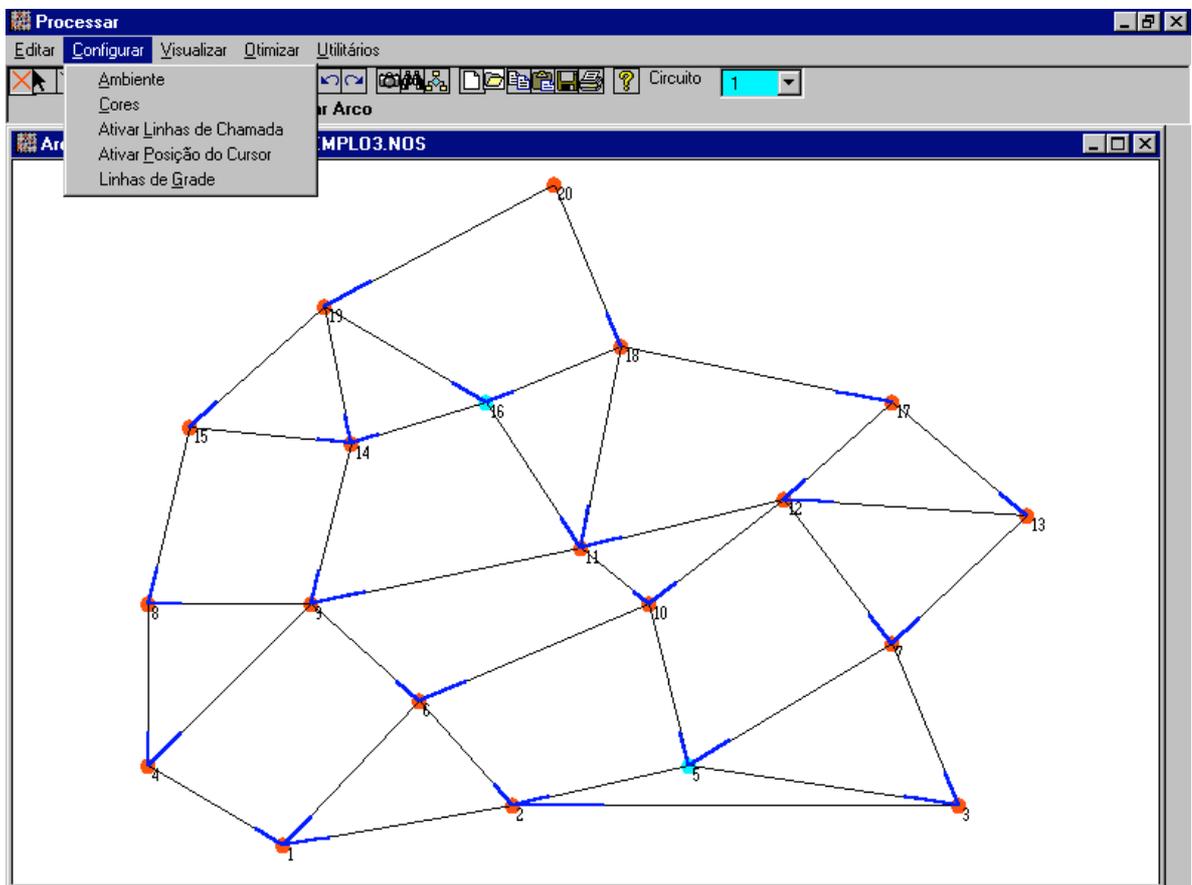


Figura 11. Janela Configurar do Módulo de Processamento

### Opções da Janela VISUALIZAR:

- |                   |   |  |
|-------------------|---|--|
| Diagrama de Cotas | - | Exibe o gráfico das cotas dos nós.         |
| Rede              | - | Exibe a rede baseado no arquivo do modelo. |
| Resumo            | - | Exibe um resumo do modelo.                 |
| Rotas             | - | Exibe uma rota de um nó a outro.           |
| Impressão         | - | Imprime o resultado dos cálculos.          |

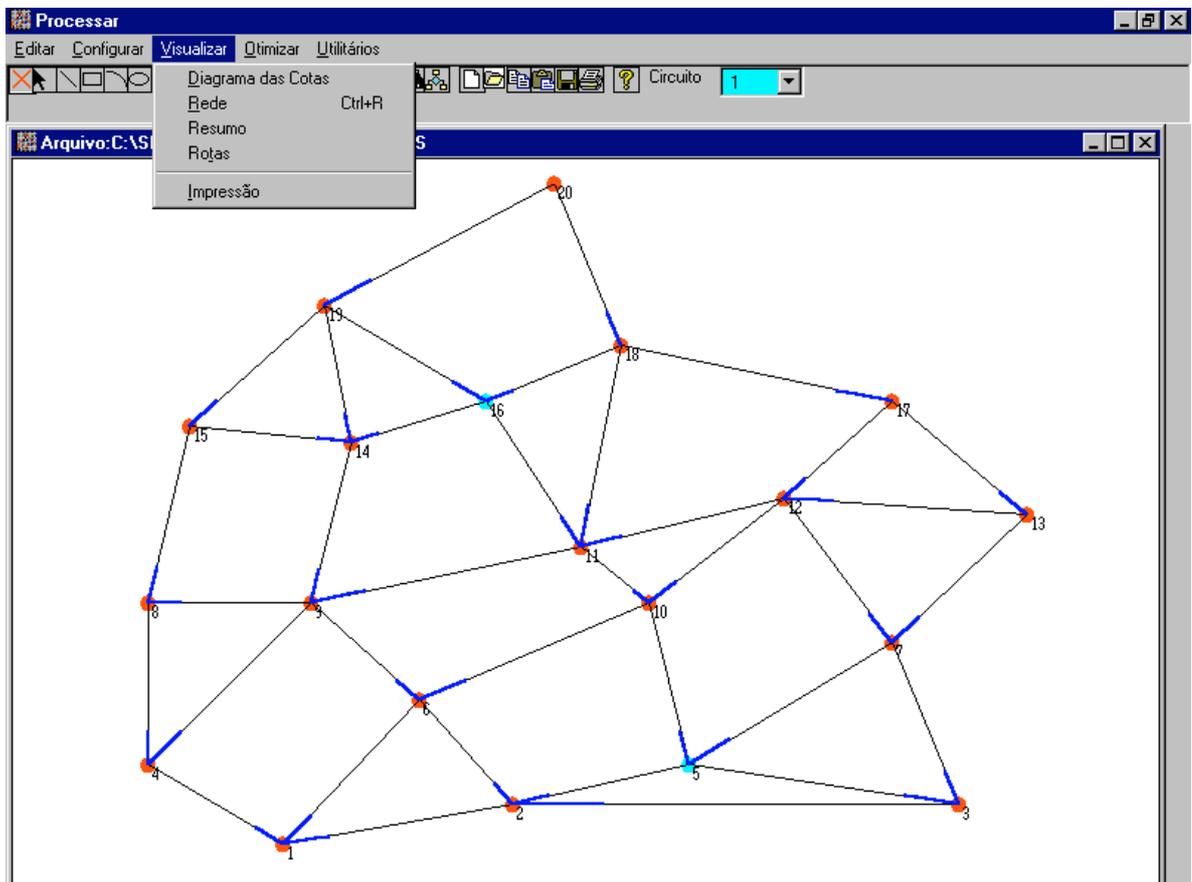


Figura 12. Janela Visualizar do Módulo de Processamento

A opção de VISUALIZAR DIAGRAMA DE COTAS permite ao usuário verificar, na distribuição dos nós da rede, suas cotas (ou alturas relativas), e verificar se, dada a ligação entre dois nós, existe um fluxo produzido pela própria atração gravitacional, caso a rede seja de dutos livres.

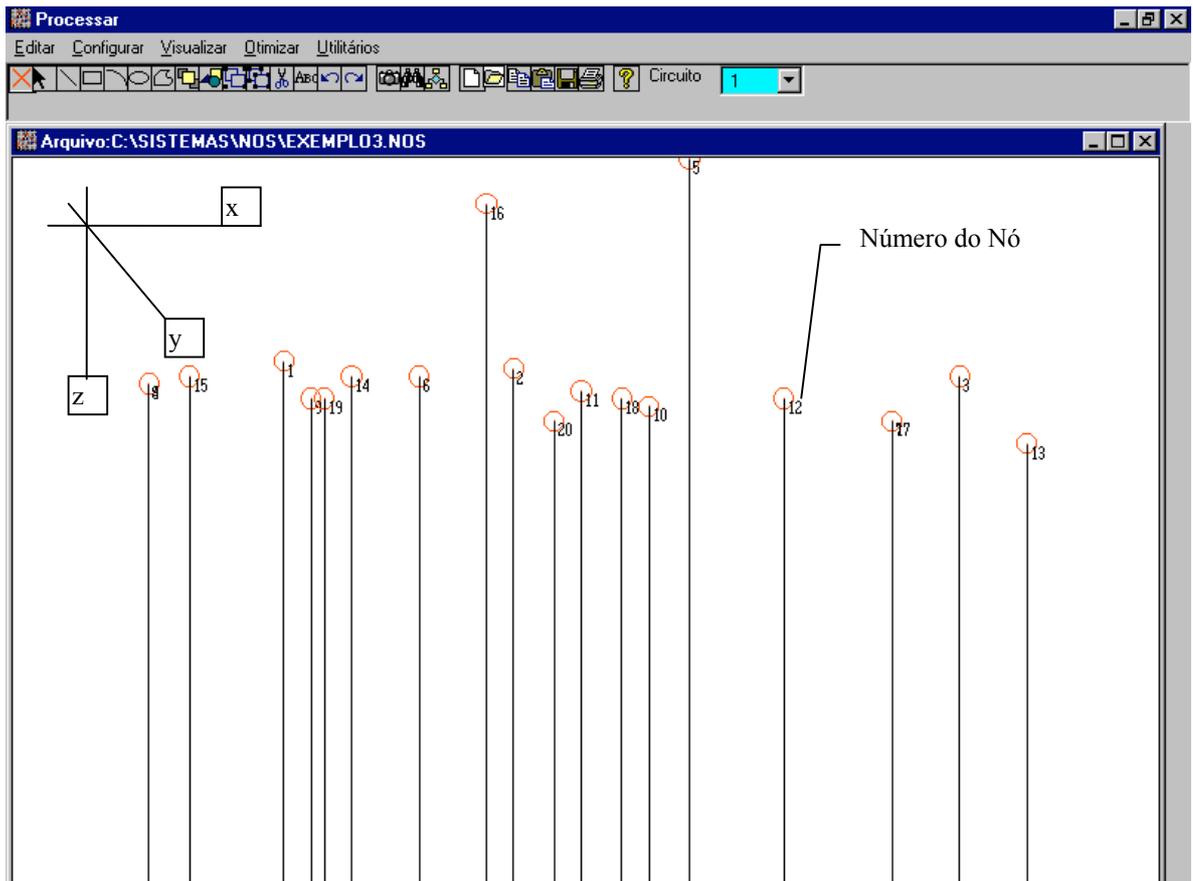


Figura 13. Diagrama de Cotas dos Nós do Modelo

### Opções da Janela de Otimização:

- Tolerância Requerida - Precisão dos cálculos.
- Iterações Máximas - Condição de parada por número de iterações.
- Tempo Máximo (Seg) - Tempo máximo de execução em segundos.
- Eliminar Trechos - Informe o número cujo peso menor será eliminado.
- Considerar Pesos - Ativado se o peso será considerado.
- Ativar Monitorização - Se ativado será gerado um LOG dos cálculos.
- Iniciar Otimização - Inicia o processo de otimização.

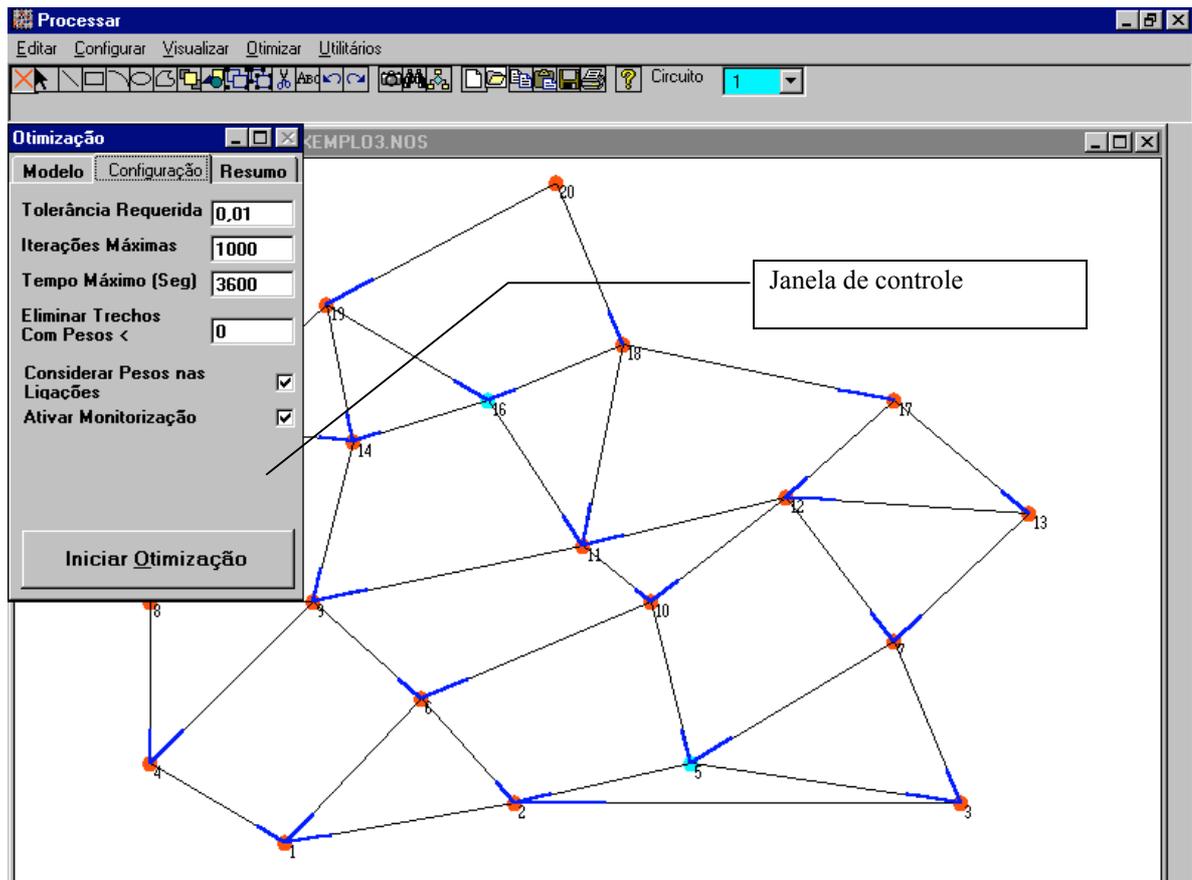


Figura 14. Janela de Início de Otimização

No processamento do modelo, como já descrevemos anteriormente, além do algoritmo de resolução de um problema de programação linear (PPL), utilizado para realizar a redução do custo da rede (SIMPLEX), e do algoritmo de HARDY-CROSS, que, para manter a rede estável, realiza os cálculos para garantir o equilíbrio (consistência) hidráulica, também embutimos alguns características novas em relação ao modelo estudado de Goulter e Morgan:

1. O usuário poderá, para cada ligação, informar o tipo de duto que será utilizado (Ferro, PVC, Cerâmica, etc.).
2. Cada nó poderá ter um ou mais ligações com os outros.
3. Poderemos ter uma ou mais fontes de abastecimento do fluido distribuído na rede.
4. Utilização do algoritmo de DIJKSTRA, por nós modificado, para calcular os caminhos mínimos de um nó a cada fonte de abastecimento, dando-nos possibilidade de simular na rede um possível falha de uma destas fontes.
5. O usuário poderá informar quais ligações com pesos (quantidade do fluxo) inferiores a determinado percentual podem ser eliminadas, reduzindo assim, o custo da rede com o embasamento na sensibilidade do projetista.
6. Utilização de coordenadas relativas (planares) para exibir o *layout* da rede, apesar de podermos fazer também a utilização de coordenadas plani-altimétricas ou UTM com imagem de fundo, o que facilitaria bastante a visualização para grandes redes.

### 6.3.3 Módulo de Relatórios

#### Opções do Módulo de Relatórios:

Sair - Sai do módulo de relatórios.

Configurar Impressora - Configura sua impressora. Nesta opção de configuração o usuário pode escolher a impressora na qual deseja imprimir o relatório, inclusive impressora da rede, tamanho do papel, tipo da mídia, etc.

Imprimir - Inicia o processo de impressão. Esta opção exibe o relatório na tela, podendo o usuário então escolher o intervalo de páginas que deseja imprimir, bem como o número de cópias. Para a escolha basta teclar no ícone correspondente mostrado na base do monitor. Para encerrar o relatório ou cancelar clique no botão CLOSE.

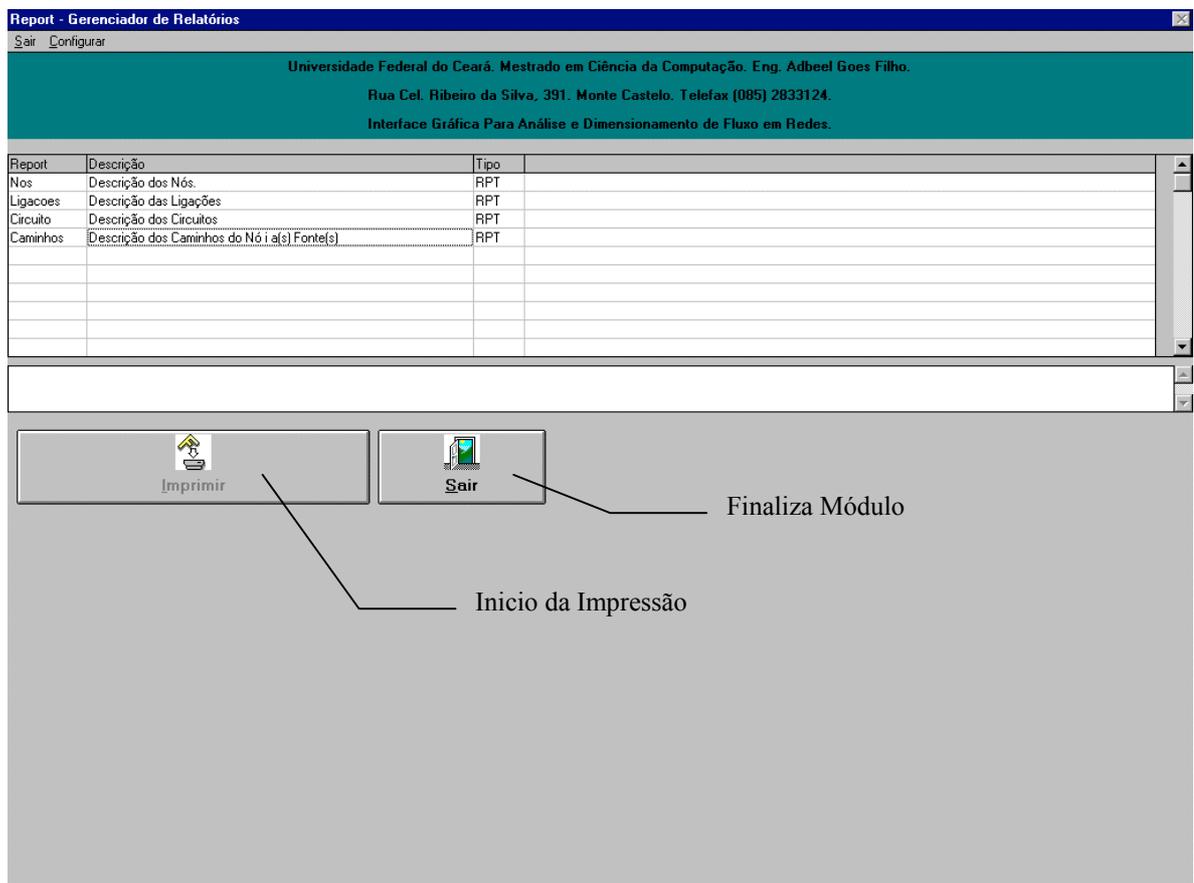


Figura 15. Módulo de Relatórios

### 6.3.4 Módulo de Suporte

#### Opções:

##### . Reparar banco de dados

Repara um banco de dados (padrão Access) caso haja erros no seu acesso. Os arquivos que podem ser reparados são os de extensões .MDB e .NOS. Algumas vezes, após quedas de energia, os arquivos de dados ficam corrompidos e será necessário efetuar uma reparação.

##### . Compactar banco de dados

Compacta um banco de dados removendo fisicamente, registros logicamente excluídos. Com a utilização freqüente de inclusões e exclusões nos arquivos do modelo, vários registros são armazenados com estado de MARCADO PARA EXCLUSÃO, ou seja para efeito de gerência dos arquivos, estes registros estão excluídos, contudo, eles ainda estão armazenados no arquivo e conseqüentemente, gastando área em disco. Esta opção, além de remover fisicamente os registros marcados para exclusão, faz uma checagem no banco de dados e recupera índices que porventura possam estar danificados.

Os arquivos que podem ser compactados são os de extensões .MDB e .NOS.

##### . Reparar e compactar todos os bancos de dados

Repara e compacta os bancos de dados (Padrão Access) do sistema. Os arquivos que podem ser compactados são os de extensões .MDB e .NOS.

## 7 OBJETO DO ESTUDO

Como objeto principal de nossos estudos tomamos as seguintes tabelas (Lembramos que para as ligações também poderão ser incluídas características do material tais seu tipo e rugosidade):

A) Dados do Layout da Rede:

<b>Ligação</b>	<b>Nó Inicial</b>	<b>Nó Final</b>	<b>Comprimento (metros)</b>	<b>Diâmetro Inicial (m)</b>
1	1	2	760	0,400
2	1	4	520	0,400
3	1	6	890	0,400
4	2	3	1120	0,400
5	2	5	610	0,400
6	2	6	680	0,400
7	3	5	680	0,400
8	3	7	870	0,400
9	4	8	860	0,400
10	4	9	980	0,400
11	5	7	890	0,400
12	5	10	750	0,400
13	6	9	620	0,400
14	6	10	800	0,400
15	7	12	730	0,400
16	7	13	680	0,400
17	8	9	480	0,400
18	8	15	860	0,400
19	9	11	800	0,400
20	9	14	770	0,400

21	10	11	350	0,400
22	10	12	620	0,400
23	11	12	670	0,400
24	11	16	790	0,400
25	11	18	1150	0,400
26	12	13	750	0,400
27	12	17	550	0,400
28	13	17	700	0,400
29	14	15	500	0,400
30	14	16	450	0,400
31	14	19	750	0,400
32	15	19	720	0,400
33	16	18	540	0,400
34	16	19	700	0,400
35	17	18	850	0,400
36	18	20	750	0,400
37	19	20	970	0,400

**Tabela 3. Estudo de Caso – Dados do Layout da Rede**

B) Demandas consideradas e características de pressão (Consideramos para este estudo uma rede com duas fontes de abastecimento):

<b>Nó</b>	<b>Demanda (Litros / Segundo)</b>	<b>Pressão Mínima (Metros)</b>	<b>Pressão Inicial (Metros)</b>
1	165	75,00	80,00
2	220	74,00	90,00
3	145	73,00	90,00
4	165	72,00	70,00
<b>5 (Fonte)</b>	-	102,00	102,00
6	140	73,00	80,00
7	175	67,00	90,00
8	180	72,00	70,00
9	140	70,00	75,00
10	160	69,00	90,00
11	170	71,00	93,00
12	160	70,00	85,00
13	190	64,00	80,00
14	200	73,00	90,00
15	150	73,00	80,00
<b>16 (Fonte)</b>	-	96,00	96,00
17	165	67,00	80,00
18	140	70,00	90,00
19	185	70,00	90,00
20	165	67,00	70,00

Tabela 4. Estudo de Caso – Demandas Consideradas e Características de Pressão

Após a entrada de dados baseada nas tabelas A) e B) anteriores, a rede (*layout*) no nosso sistema é apresentada na forma abaixo, com um quadro acoplado que mostra um resumo geral. Para dar início aos procedimentos de cálculo, o usuário deverá pressionar o botão INICIAR OTIMIZAÇÃO. Após o processamento, todos os cálculos finais serão armazenados no próprio arquivo do modelo e disponibilizados ao usuário através das opções de impressão.

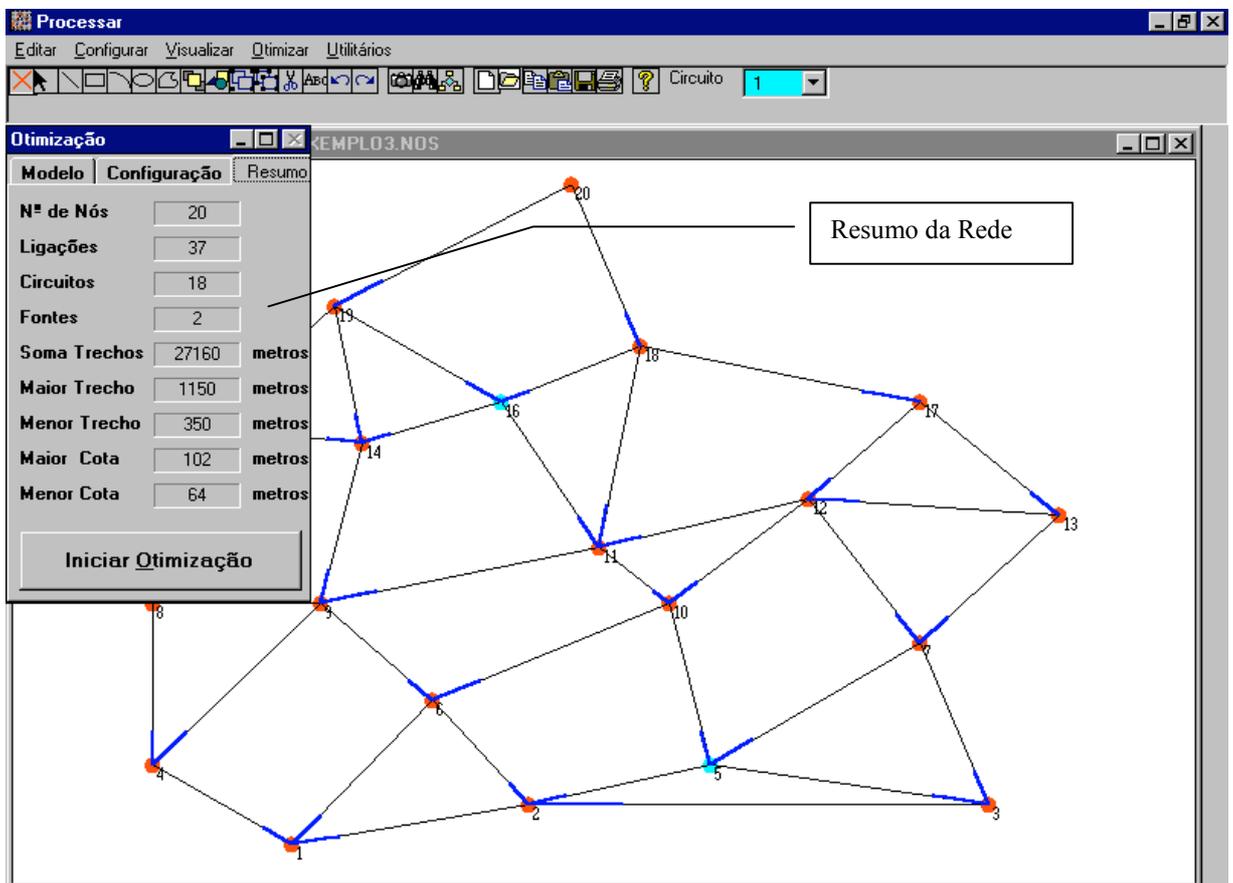


Figura 16. Layout após montagem dos nós e ligações baseado nas tabelas dadas

## 8 ANÁLISE DOS RESULTADOS

### Resultados dos Cálculos Considerando 20 Nós (Valores em US\$):

Processamento	Valor Base	Valor Otimizado	Índice de Redução
Modelo de Morgan e Goulter. Primeira Iteração.	4.590.040,00	2.074.762,00	0,5480
Modelo de Morgan e Goulter.	4.590.040,00	1.950.698,00	0,5750
Sistema NOS sem eliminação de ligações.	4.590.040,00	1.693.929,31	0,6310
Sistema NOS considerando eliminações de ligações com peso $\leq 0,30$ .	4.590.040,00	<b>1.257.542,47</b>	<b>0,7260</b>

Tabela 5. Estudo de Caso – Resultados dos Cálculos

Observações:

1. O peso na ligação consiste no percentual de utilização da ligação pelo fluxo do fluido.
2. O valor base é o valor total considerado sem otimização.
3. O valor otimizado consiste no valor total da rede após otimização.
4. Verificamos que, devido aos melhoramentos dos algoritmos do Sistema NOS, obtivemos melhores resultados que os apresentados com o modelo proposto por Morgan e Goulter.
5. O Índice de Redução consiste na diferença relativa entre o Valor Base e o Valor Otimizado.

### **Listagem dos Resultados dos Cálculos.**

Esta listagem exhibe tanto os valores e características iniciais das ligações como os valores resultantes dos cálculos. Ao final, também temos um comparativo de quanto se deu a redução (ou não) utilizando nosso sistema.

**Adbeel Goes Filho.** Página 1

Interface Gráfica Para Análise e Dimensionamento de Fluxo em Redes.

Descrição das Ligações

Ligação	Descrição	Nó		Vazão Inicial	Vazão (l/s)	Circuito		Velocidade Tipo	Diâmetro	Trecho (m)	Custo	Subtotal	Relatório		LIGACOES.RPT	
		Inicial	Final	( l/s )	Calculada	Primário	Secundário	( m/s ) do Tubo	Inicial (mm)	Peso	Inicial	Inicial	Diâmetro1	Trecho1	Custo1	Custo (1+2)
1		1	2	-175,50	-188,69	1	0	01	400,00	760,00	169,00	128.440,00	200,00	69,39	71,70	47.793,08
2		1	4	83,94	54,42	2	0			1,00			150,00	690,61	62,00	
3		1	6	-73,45	-57,12	1	2			520,00		87.880,00	200,00	25,61	71,70	32.488,42
Trecho Eliminado										0,33			150,00	494,39	62,00	
4		2	3	-118,06	109,08	3	0			890,00		150.410,00				
5		2	5	-438,79	-149,87	3	4			0,15						
6		2	6	161,35	209,93	1	4			1.120,00		189.280,00	200,00	17,46	71,70	69.609,36
7		3	5	-375,97	23,57	3	5			0,65			150,00	1.102,54	62,00	
8		3	7	112,91	-59,49	5	0			610,00		103.090,00	200,00	17,46	71,70	37.989,36
9		4	8	-8,66	-27,22	6	0			1,00			150,00	592,54	62,00	
Trecho Eliminado										680,00		114.920,00	200,00	31,19	71,70	42.462,51
10		4	9	-72,40	-83,36	2	6			0,56			150,00	648,81	62,00	
Trecho Eliminado										680,00		114.920,00	200,00	31,19	71,70	42.462,51
11 Fonte		5	7	348,65	62,42	5	7			1,00			150,00	648,81	62,00	
12 Fonte		5	10	402,44	226,84	4	7			870,00		147.030,00	200,00	39,36	71,70	54.321,74
13		6	9	72,24	62,03	2	8			0,95			150,00	830,64	62,00	
Trecho Eliminado										860,00		145.340,00				
14		6	10	-124,34	-166,81	4	8			0,13						
15		7	12	134,24	200,72	7	9			980,00		165.620,00				
16		7	13	152,33	199,68	9	0			0,25						
17		8	9	-105,52	-113,37	6	10			890,00		150.410,00	150,00	890,00	62,00	55.180,00
18		8	15	-83,14	-93,84	10	0			1,00			200,00	22,63	71,70	46.719,47
										0,90			150,00	727,37	62,00	
										620,00		104.780,00				
										0,19						
										800,00		135.200,00	200,00	23,08	71,70	49.823,92
										0,66			150,00	776,92	62,00	
										730,00		123.370,00	200,00	23,08	71,70	45.483,92
										0,42			150,00	706,92	62,00	
										680,00		114.920,00	200,00	27,21	71,70	42.423,93
										0,78			150,00	652,79	62,00	
										480,00		81.120,00	200,00	27,21	71,70	30.023,93
										0,34			150,00	452,79	62,00	
										860,00		145.340,00	200,00	28,34	71,70	53.594,87
										0,32			150,00	831,66	62,00	

**Adbeel Goes Filho.** Página 2

Interface Gráfica Para Análise e Dimensionamento de Fluxo em Redes.

## Descrição das Ligações

Ligação	Descrição	Nó		Vazão (l/s)		Circuito		Velocidade (m/s)	Tipo do Tubo	Diâmetro Inicial (mm)	Trecho (m)	Custo Inicial	Subtotal Inicial	Relatório		LIGACOES.RPT	
		Inicial	Final	(l/s)	Calculada	Primário	Secundário							Diâmetro 1	Trecho 1	Custo 1	Custo (1+2)
19		9	11	-138,80	-156,67	8	11				800,00	135.200,00	200,00	28,34	71,70	49.874,87	
											1,00		150,00	771,66	62,00		
20		9	14	-106,87	-116,13	10	11				770,00	130.130,00	200,00	33,75	71,70	48.067,34	
											0,55		150,00	736,25	62,00		
21		10	11	41,90	-24,62	8	12				350,00	59.150,00					
Trecho Eliminado											0,22						
22		10	12	76,20	142,83	7	12				620,00	104.780,00					
Trecho Eliminado											0,30						
23		11	12	65,33	136,41	12	13				670,00	113.230,00					
Trecho Eliminado											0,28						
24		11	16	-304,18	-112,60	11	14				790,00	133.510,00					
Trecho Eliminado											0,00						
25		11	18	-28,05	141,10	13	14				1.150,00	194.350,00	200,00	25,57	71,70	71.548,04	
											0,48		150,00	1.124,43	62,00		
26		12	13	51,78	55,69	9	15				750,00	126.750,00					
Trecho Eliminado											0,22						
27		12	17	63,99	-3,33	13	15				550,00	92.950,00	200,00	20,38	71,70	34.297,68	
											0,02		150,00	529,62	62,00		
28		13	17	14,11	57,56	15	0				700,00	118.300,00	200,00	27,01	71,70	43.661,97	
											0,34		150,00	672,99	62,00		
29		14	15	128,03	153,75	10	16				500,00	84.500,00	200,00	27,01	71,70	31.261,96	
											0,52		150,00	472,99	62,00		
30		14	16	-433,52	-210,76	11	17				450,00	76.050,00					
Trecho Eliminado											0,00						
31		14	19	-0,93	186,85	16	17				750,00	126.750,00	200,00	24,38	71,70	46.736,46	
											0,66		150,00	725,62	62,00		
32		15	19	-105,11	-141,53	16	0				720,00	121.680,00					
											0,50		150,00	720,00	62,00		
33 Fonte		16	18	370,10	154,76	14	18				540,00	91.260,00					
											0,52		150,00	540,00	62,00		
34 Fonte		16	19	341,34	94,83	17	18				700,00	118.300,00	200,00	15,33	71,70	43.548,75	
											0,34		150,00	684,67	62,00		
35		17	18	-86,90	-110,77	13	0				850,00	143.650,00	200,00	15,33	71,70	52.848,75	
											0,37		150,00	834,67	62,00		
36		18	20	115,15	137,47	18	0				750,00	126.750,00	200,00	28,85	71,70	46.779,81	
											0,66		150,00	721,15	62,00		
37		19	20	49,85	72,17	18	0				970,00	163.930,00	200,00	28,85	71,70	60.419,81	
											0,34		150,00	941,15	62,00		
Redução: <u>3.332.497,53</u>												<b><u>4.590.040,00</u></b>			<b><u>1.257.542,47</u></b>		

## 9 CONCLUSÕES

O Sistema NOS apresentado neste trabalho proporciona um suporte computadorizado às decisões de projetos freqüentemente solicitadas em empresas de distribuição de água ou de irrigação, sejam elas públicas ou privadas. O sistema estabelece uma ligação entre Sistemas de Informações Geográficas (Geographic Information System) e as tecnologias de otimização, bem como o agradável ambiente de trabalho do Windows ©, aqui abordado e utilizado exhaustivamente. Também os bancos de dados aqui utilizados obedecem a estrutura do ACCESS © e seguem a tecnologia de SQL aumentando consideravelmente a rapidez de acesso aos dados aqui utilizados.

Os modelos de otimização aqui abordados também proporcionam um desenvolvimento otimizado nos projetos referidos e satisfazem perfeitamente aos critérios e técnicas na área da hidráulica, sem as quais todo o nosso modelo empregado seria inviável.

Os procedimentos de otimização do sistemas NOS incorporam diretamente os tamanhos das tubulações como variáveis discretas de decisão enquanto outros modelos as fazem como contínuas. Podemos dizer também que a capacidade do modelo em dividir uma ligação de determinado comprimento em dois, contribui significativamente para a redução do custo na rede.

## 10 OBSERVAÇÕES FINAIS

Sabemos que, com todos os defeitos próprios de um ser humano, somos incapazes de elaborar um sistema plenamente perfeito, principalmente devido a escassa literatura a respeito do tema em questão. Devemos contudo, sempre aprofundar nossos estudos para torná-lo cada vez mais ágil e eficiente. Desta forma, realizando uma crítica, chegamos a conclusão que em um futuro próximo poderemos incluir as seguintes melhorias no nosso sistema:

- ⇒ Procedimento de reconhecimento dos circuitos da rede baseado nas coordenadas dos nós e das ligações, já que é extremamente necessário localizar estes circuitos para a utilização do Método de Hardy-Cross, usado para o cálculo da consistência hidráulica.
- ⇒ Elaboração de um sistema paralelo de orçamento para que, a partir dos resultados dos cálculos, o usuário possa elaborar todo o orçamento da rede, detalhando todos os custos que entram em sua composição.

## GLOSSÁRIO

<b>Chave</b>	<b>Descrição</b>
Duto	O mesmo que tubulação ou canalização
Fluido	Substância que se deforma continuamente sob a aplicação de uma tensão de cisalhamento (i.e., tangencial) por menor que seja esta tensão
Fluxo	Direção e sentido que o fluido toma na rede
Ligação	Caminho entre dois nós da rede
Nó	Ponto de encontro de ligações
Peso na Ligação	Percentual de utilização da ligação pela passagem do fluido

## APÊNDICE

## **Apêndice 1. Fundamentos de Hidráulica**

### **Escoamentos em Dutos Livres e Forçados**

Podemos classificar os dutos em dois tipos [17]: livres e forçados. Dutos livres são aqueles em que parte de seu contorno estão sujeitos à pressão atmosférica e, por conseguinte, o líquido só pode seguir o sentido descendente, o qual está sujeito a força gravitacional.

Nos dutos forçados, o líquido escoar inteiramente envolto por uma superfície sólida, geralmente de seção circular, e sob pressão diferente da atmosférica. O conduto opera totalmente cheio, podendo o líquido mover-se em sentido ascendente ou descendente.

Quando a vazão de um líquido num conduto é constante, seu movimento será classificado como permanente, do contrário, será chamado de não permanente ou variável. Quanto à estrutura interna os escoamentos são classificados como laminares ou turbulentos. Se considerarmos o regime laminar, a estrutura do escoamento é caracterizada pela movimentação em lâminas ou camadas. No regime turbulento, a forma do escoamento é caracterizada pelo movimento tridimensional aleatório das partículas do líquido sobreposto ao movimento da corrente.

Para considerarmos um escoamento como de regime laminar ou turbulento deveremos verificar suas propriedades. Se levarmos em consideração que o escoamento é realizado em um cano (dutos forçados), seu regime é determinado pelo valor de um número adimensional, chamado de número de Reynolds ( $Re = \rho \cdot V \cdot D / \mu$ , sendo  $\rho$  a massa específica do fluido,  $V$  a velocidade média do escoamento,  $D$  o diâmetro interno do cano e  $\mu$  a viscosidade do fluido).

O número de Reynolds também pode ser escrito na forma:

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu} = \frac{\rho V \cdot L}{\mu} \frac{V}{L} \frac{L}{L} \frac{1}{L/L} = \frac{\rho V^2 L^2}{(\mu V / L) L^2} \quad \text{Equação 10}$$

Esta expressão pode ser interpretada como:

$\rho V^2 L^2 \approx$  pressão dinâmica x área  $\approx$  força de inércia.

$(\mu V / L) L^2 \approx$  tensão viscosa x área  $\approx$  força viscosa.

Desta forma temos que

$Re \approx$  forças de inércia / forças viscosas.

Muito embora para  $Re > 2.300$  o escoamento seja geralmente turbulento e  $Re < 2.300$  o escoamento seja laminar, não podemos ter um valor definido para o número de Reynolds no qual o escoamento mude de laminar para turbulento [12].

De acordo com a literatura sobre o assunto [12], nos idos de 1880 um engenheiro britânico chamado Osborne Reynolds, estudou a transição dos escoamentos do regime laminar para turbulento em um cano. Descobriu que o parâmetro (Re) é um critério pelo qual o estado de um cano pode ser determinado. Desta forma,

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu} = \frac{V \cdot L}{\nu} \quad \text{Equação 11}$$

onde: L é um comprimento descrito do campo de escoamento, D(diâmetro do duto), V (velocidade de escoamento),  $\mu$  (viscosidade),  $\nu$  (viscosidade dinâmica),  $\rho$  (peso específico).

## Fórmulas Práticas Para Encanamentos

Da mecânica dos fluidos [12], vimos que a perda de carga entre as seções A e B de um duto forçado é dada por:

$$h = \left( z_A + \frac{P_A}{w} + \frac{\alpha U_A^2}{2g} \right) - \left( z_B + \frac{P_B}{w} + \frac{\alpha U_B^2}{2g} \right) \quad \text{Equação 12}$$

Porém, como no movimento permanente e uniforme,  $U_A = U_B$  (Sendo  $U_A$  e  $U_B$  velocidades de escoamento), temos que

$$h = \left( z_A + \frac{P_A}{w} \right) - \left( z_B + \frac{P_B}{w} \right) \quad \text{Equação 13}$$

Assim sendo, no movimento permanente e uniforme em um conduto forçado, a perda de carga  $h$  é dada tanto pelo abaixamento da linha de carga quanto pelo abaixamento da linha piezométrica. Podemos dizer então que a perda de carga por unidade de comprimento é dada por:

$$j = \frac{h}{L} = \frac{1}{L} \left[ \left( z_A + \frac{P_A}{w} \right) - \left( z_B + \frac{P_B}{w} \right) \right] \quad \text{Equação 14}$$

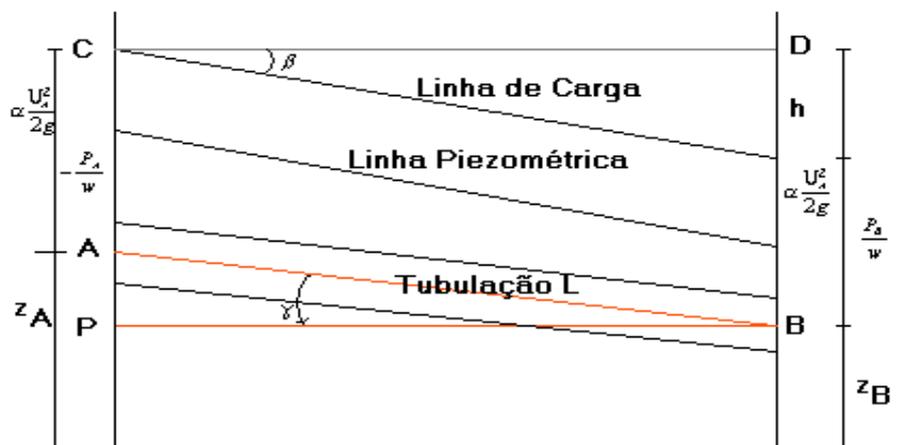


Figura 17. Linha Piezométrica

Pela Figura 1,  $PB = CD$ , ou seja  $L \cos \gamma = \frac{h}{\text{Tg}(\beta)}$

$$Tg(\beta) = \frac{h}{L \cos(\gamma)} = \frac{h}{L} \sec(\gamma) = J \sqrt{1 + Tg^2(\gamma)} \quad \text{Equação 15}$$

A expressão  $Tg(\beta) = \sqrt{1 + Tg^2(\gamma)}$  mostra ser a inclinação da linha piezométrica,  $Tg(\beta)$ , sempre maior que  $J$ , já que  $\sqrt{1 + Tg^2(\gamma)} > 1$ .

Quando o encanamento é horizontal,  $\gamma = 0$ , então  $J = Tg(\beta)$ . Podemos dizer então que  $J$  mede a inclinação da linha piezométrica.

A perda de carga ao longo de um trecho em uma rede de distribuição depende principalmente das características da tubulação e das condições de fluxo do fluido. Várias equações são utilizadas para a determinação da perda de carga, sendo as mais empregadas as de Darcy-Weisbach e Hazen-Williams. Mostraremos a seguir algumas equações para o cálculo das perdas de carga, já que elas são de fundamental importância para o desenvolvimento do sistema em questão.

### **Fórmula de Darcy-Weisbach**

$$J = \Delta H = f \frac{L}{2g} \frac{V^2}{D} \quad \text{Equação 16}$$

Onde,  $\Delta H$  é a perda de carga,  $f$  é o coeficiente de rugosidade,  $L$  é o comprimento do trecho,  $D$  é o diâmetro da tubulação,  $V$  é a velocidade do fluido e  $g$  é a aceleração da gravidade.

### **Fórmula de Hazen-Williams**

$$\Delta H = \frac{a}{C^{1,852}} \frac{L}{D^{1,167}} V^{1,852} \quad \text{Equação 17}$$

Onde,  $\Delta H$  é a perda de carga,  $a$  é o coeficiente que depende das unidades adotadas,  $C$  é coeficiente de Hazen-Williams,  $L$  é o comprimento do trecho,  $D$  é o diâmetro da tubulação e  $V$  é a velocidade do fluido.

De uma forma geral temos que a perda de carga é dada por  $\Delta H = KD^m V^n$ , onde  $K$  é um coeficiente de perda de carga.

A velocidade máxima da tubulação é limitada por vários fatores tais como corrosão, sobrepessão, desgaste, etc. Sendo assim, baixas velocidades podem indicar um mal aproveitamento das linhas.

### **CrITÉRIOS de Aplicação das Fórmulas Para Encanamentos**

De acordo com o Professor Azevedo Neto [20], em geral, podemos dizer que a fórmula apresentada por Darcy pode ser aplicada para tubos de ferro fundido em serviço até um diâmetro  $D = 500$  mm.

Para canalizações com  $D > 50$  mm, de qualquer espécie, recomenda-se a fórmula de Hazen-Williams com uma escolha meticulosa de seu coeficiente  $C$  (Vide Anexo).

As fórmulas aqui consideradas são aplicadas para a água, sendo de extrema importância o emprego de fórmulas mais modernas quando se tratar de outro líquido, ressaltando-se que o coeficiente de viscosidade tem influência fundamental nos cálculos.

Também, pela longa tendência e aplicabilidade nos dias atuais, utilizamos como padrão no nosso projeto a fórmula de Hazen-Williams, já que é de longa aceitação na área aqui considerada.

### Encanamentos Complexos (Redes)

Todo sistema constituído por diversos encanamentos que poderão formar malhas fixas de condutos são chamados encanamentos complexos ou redes. Como no nosso caso trabalharemos principalmente com este tipo de sistema, faremos agora algumas pequenas definições para propiciar ao leitor uma visão melhor do assunto.

#### Rede Ramificada

A rede ramificada é aquela em que os encanamentos que a compõem se dividem sucessivamente a partir de um ponto comum de alimentação, sem voltar a conectar-se entre si. É também denominada rede aberta, onde o fluido trafega em um único sentido.

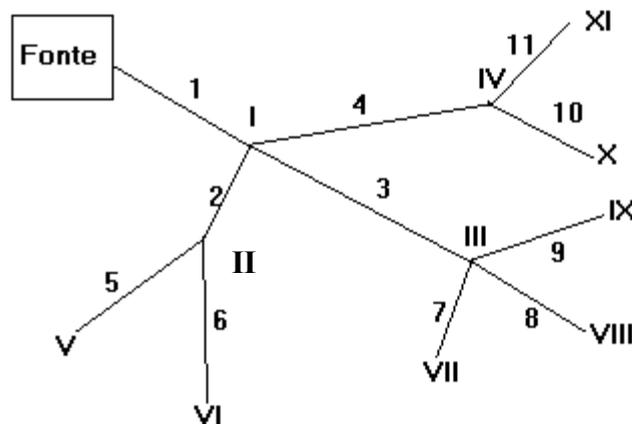


Figura 18. Rede Ramificada

### Cálculo da Rede Ramificada.

Na figura apresentada anteriormente, são dadas as diferenças de cotas piezométricas dos nós extremos,  $z_0 - z_V$ ,  $z_0 - z_{VI}$ , ...  $z_0 - z_{XI}$  e os diâmetros  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$ , ...  $D_{11}$  e se pedem as vazões  $Q_1$ ,  $Q_2$ , ... ,  $Q_{11}$ . Teremos desta forma três considerações de solução:

Para cada um dos pontos terminais V, VI, ..., XI tem-se uma equação do tipo:

$$(1) \quad z_0 - z_V = \frac{K_1 Q_1^2}{D_1^5} L_1 + \frac{K_2 Q_2^2}{D_2^5} L_2 + \frac{K_5 Q_5^2}{D_5^5} L_5 \quad \text{Equação 18}$$

No caso da figura teremos ao todo 7 equações.

Em relação a cada nó verifica-se uma equação de continuidade  $\sum Q = 0$ , isto é, vazões afluentes com o sinal (+), por exemplo, e vazões efluentes com sinal (-).

No caso da figura, são 4 nós, portanto, 4 equações. Ao todo teremos 11 equações e 11 incógnitas (vazões) e o problema pode ser então resolvido.

(2) São dados os diâmetros e as vazões e pedem-se as cotas piezométricas nos pontos  $z_V$ ,  $z_{VI}$ , ...  $z_{XI}$ . Teremos então 7 incógnitas determinadas por equações do tipo

$$z_0 - z_V = \frac{K_1 Q_1^2}{D_1^5} L_1 + \frac{K_2 Q_2^2}{D_2^5} L_2 + \frac{K_5 Q_5^2}{D_5^5} L_5 \quad \text{Equação 19}$$

(3) São dadas as diferenças de cotas piezométricas  $z_0 - z_V$ ,  $z_0 - z_{VI}$ , ...  $z_0 - z_{XI}$  e as vazões e pedem-se os diâmetros  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$ , ...  $D_{11}$ .

Teremos então um sistema de 7 equações do tipo (1) com 11 incógnitas. Veremos então que este problema é indeterminado. Esta indeterminação pode então ser levantada por dois processos diferentes. No primeiro processo, que é uma solução por tentativas, são estabelecidos limites máximos e mínimos para as pressões em cada nó e limites máximos para a velocidade. Assim, por

exemplo, considerando o trecho 1, ao qual é atribuído um dado valor para o diâmetro, com a vazão dada  $Q_1$  calcula-se a perda de carga  $h$  mediante a utilização da fórmula  $h = \frac{K_1 Q_1^2}{D_1^5} L_1$  e, conhecida a cota topográfica de I, teremos o valor da pressão neste ponto. Calcula-se também o valor da velocidade  $U_1$ . Confrontam-se, em seguida, os valores da pressão e da velocidade encontrados com os admitidos. Faremos então o mesmo procedimento para os outros trechos.

Note que o valor da altura representativa da pressão disponível em um nó é a diferença entre a cota da linha piezométrica e a cota do terreno neste nó.

No segundo processo, procura-se obter o sistema de custo mínimo e isto nos dará mais quatro equações, uma para cada nó do tipo  $\sum \frac{D_i^6}{Q_i^2} = \sum \frac{d_i^6}{q_i^2}$

O procedimento prático do primeiro processo é feito com o emprego de folhas de cálculo como o do modelo apresentado por J.M. Azevedo Neto [20] no volume III de seu manual de hidráulica e que transcrevemos a seguir.

Coluna (4):

Vazão a jusante,  $Q_j$  (l/s), assim obtida: na extremidade de jusante de uma ramificação, como em V, VI, etc.

$Q_j = 0$ . Na extremidade de jusante de um trecho, como em 2.

$Q_j = \Sigma Q_m$ , dos trechos abastecidos por 2, isto é, 5 e 6.

Coluna (5):

Vazão em marcha, expressa em l/s, igual a  $q_m L$ , onde  $q_m$  é a vazão distribuída por metro linear de canalização.

Coluna (6):

Vazão a montante,  $Q_m$  (litros/seg):

$$Q_m = Q_j + q_m L. \quad \text{Equação 20}$$

Coluna (7):

Vazão fictícia  $Q_f = Q_j + 0,55 q_m L$ . Mas, como  $q_m L = Q_m - Q_j$ , temos que

$$Q_f = Q_j + \frac{Q_m Q_j}{2} = \frac{Q_m + Q_j}{2} \quad \text{Equação 21}$$

Coluna (8):

Determinado pela imposição de velocidades limites e pela vazão a montante.

Coluna (9):

Velocidade em metros/segundo obtida com diâmetro pré-fixado e com a perda de carga unitária  $J$  calculável da coluna (11).

Coluna (11):

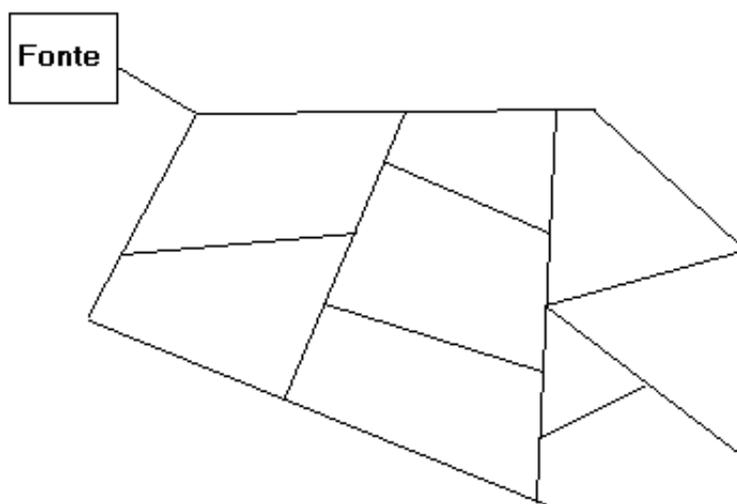
Perda de carga total em metros, determinada a partir da vazão fictícia  $Q_f$  e do diâmetro pré-fixado, com uma fórmula de resistência (Hazen-Williams, por exemplo).



## Rede Malhada

A rede malhada, fechada ou de circulação, é aquela onde as canalizações não têm extremidades, ou seja, os condutos são unidos entre si, formando um conduto fechado.

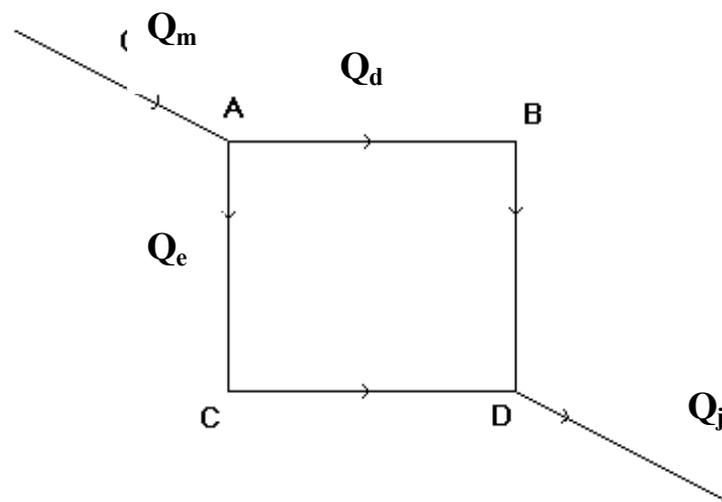
Nosso projeto admite a utilização de redes mistas, ou seja, aquelas em que poderemos ter ramos e circuitos fechados.



**Figura 20. Rede Malhada**

## Cálculo de Rede Malhada Pelo Método de Hardy-Cross

Consideremos a malha simples ABDC. São conhecidas a vazão alimentadora  $Q_m$ , os diâmetros dos trechos AB, BD, AC, CD. Deseja-se determinar a vazão e a perda de carga em cada trecho.



**Figura 21. Rede Fechada**

Temos desta forma:

$$Q_m = Q_e + Q_d = Q_j \text{ e}$$

$h_{AC} + h_{CD} = h_{AB} + h_{BD}$  ou  $\sum h_e = \sum h_d$ , onde o índice d refere-se aos trechos cujo escoamento se faz no sentido do movimento dos ponteiros do relógio e o índice e aos trechos em que o escoamento se dá no sentido contrário ao dos ponteiros do relógio.

Para o circuito fechado poderíamos escrever  $\sum h = 0$ , afetando  $h$  do sinal (+), por exemplo, para os trechos cujo escoamento seja no sentido destrógiro e do sinal (-) para trechos cujo escoamento seja no sentido sinistrógiro.

Se usarmos a fórmula de Hazen-Williams para o cálculo das perdas de carga teríamos

$$h = JL = \frac{10,62 Q^{1,852}}{C^{1,852} D^{4,87}} L, \quad \text{Equação 22}$$

poderemos fazer  $h = KQ^{1,852}$ , onde

$$k = \frac{10,62}{C^{1,852}} \frac{L}{D^{4,87}} \quad \text{Equação 23}$$

Sendo, J (Perda de carga), L (Comprimento do tubo), Q (Vazão), C (Constante que depende do material), D (Diâmetro do tubo).

Fazemos uma distribuição da vazão  $Q_m$  por estimativa e passemos a controlar os resultados, como mostraremos a seguir.

Se as vazões estiverem corretas, teremos:

$$\sum_d kQ_d^{1,852} = \sum_e kQ_e^{1,852}, \text{ ou, o que é o mesmo para o circuito fechado}$$

ABDC:

$$\sum h = \sum KQ^{1,852} = 0 \quad \text{Equação 24}$$

Entretanto, não estando certas as vazões atribuídas, conforme geralmente sucede nos primeiros ensaios, resultará:

$$\sum h = \sum KQ^{1,852} \neq 0 \text{ ou } \sum_d kQ_d^{1,852} \neq \sum_e kQ_e^{1,852} \quad \text{Equação 25}$$

Para facilitar o raciocínio, suponhamos que

$$\sum_d kQ_d^{1,852} > \sum_e kQ_e^{1,852} \quad \text{Equação 26}$$

A fim de retificar as vazões, vamos introduzir uma correção  $\Delta Q$  constante, que será subtraída do grupo das vazões excedentes (no caso dos trechos destrógiros) e adicionadas ao grupo das deficientes (trechos sinistrógiros). Assim, teremos:

$$\sum_d K(Q_d - \Delta Q)^{1,852} = \sum_e K(Q_e + \Delta Q)^{1,852} \quad \text{Equação 27}$$

Desenvolvendo as expressões acima pela fórmula do binômio de Newton e limitando-nos aos dois primeiros termos, por serem muito pequenas as potências de  $\Delta Q$  superiores a primeira, virá:

$$\sum_d k(Q_d^{1,852} - 1,852Q_d^{0,852} \Delta Q) = \sum_e k(Q_e^{1,852} + 1,852Q_e^{0,852} \Delta Q)$$

$$\sum_d KQ_d^{1,862} - \sum_e KQ_e^{1,852} = 1,852\Delta Q \sum_d KQ_d^{0,852} + 1,852\Delta Q \sum_e KQ_e^{0,852}$$

ou

$\sum KQ^{1,852} = 1,852\Delta Q \sum KQ^{0,852}$ , subtendendo-se que há soma algébrica no somatório do primeiro membro (perdas de cargas positivas no sentido destrógiro e negativos no sentido sinistrógiro) e soma de módulos no segundo membro.

Concluimos então que

$$\Delta Q = \frac{\sum KQ^{1,852}}{1,852 \sum |KQ^{0,852}|}, \text{ que também pode ser escrita como}$$

$$\Delta Q = \frac{KQ^{1,852}}{1,852 \sum \left| \frac{KQ^{1,852}}{Q} \right|} = \frac{\sum h}{1,852 \sum \frac{h}{Q}} \quad \text{Equação 28}$$

Nota-se que devemos afetar  $\Delta Q$  do sinal menos, pois é de sinal contrário ao grupo predominante. Desta forma teremos:

$$\Delta Q = - \frac{\sum KQ^{1,852}}{1,852 \sum \left| \frac{KQ^{1,852}}{Q} \right|} \quad \text{Equação 29}$$

*Exemplo*

Seja o sistema da figura abaixo:

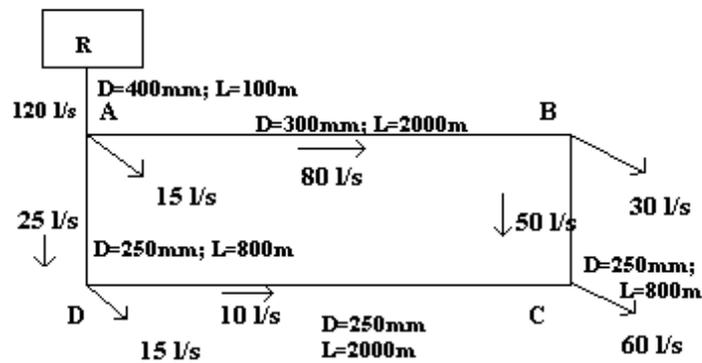


Figura 22. Exemplo de Cálculo por Hardy-Cross

Trata-se de um projeto para combate a incêndios, em uma instalação industrial. Em A,B,C e D estão instalados hidrantes para alimentação das vazões de 15, 30, 60 e 15 litros/segundo, respectivamente. Os diâmetros estão distribuídos conforme a figura para cada trechos, cujos comprimentos também são informados.

Vamos fixar para sentido positivo do escoamento o sentido horário e para sentido negativo o anti-horário.

Calculam-se as perdas de carga em cada trecho e para o circuito fechado ABCD determina-se o valor de  $\sum h$ . As perdas de carga terão o mesmo sinal das vazões correspondentes.

Organiza-se a tabela seguinte:

Consideramos aqui a fórmula de Hazen-Williams, com  $C=100$ .

Circuito	Trecho	Trecho (m)	Diâmetro (mm)	Vazão (l/s)	h1	h/Q	$\bar{\Delta}Q_1$	Q2	h2	h2/Q2	$\Delta Q_2$	Q3	h3	h3/Q3
I	AB	2000	300	80	14,00	0,17	-22,5	57,80	7,60	0,13	1,90	59,70	8,20	0,14
	BC	800	250	50	5,68	0,11	-22,5	27,50	1,84	0,07	1,90	29,40	2,16	0,07
	CD	2000	250	-10	-0,80	0,08	-22,5	-32,50	-6,20	0,19	1,90	30,60	-5,70	0,19
	DA	800	250	-25	-1,60	0,06	-22,5	-47,50	-5,04	0,11	1,90	45,60	-4,80	0,11
					17,28	0,42			-1,80	0,50				0,51

$$\Delta Q_1 = -\frac{\sum h}{1,852 \sum \frac{h}{Q}} = -\frac{17,28}{1,852 \times 0,42} = -22,21 \text{ l/s}$$

$$\Delta Q_2 = \frac{1,8}{1,852 \times 0,50} = 1,90 \text{ l/s};$$

$$\Delta Q_3 = \frac{0,14}{1,852 \times 0,51} = 0,15 \text{ l/s}.$$

O erro de -0,14 é desprezível e a distribuição de vazões é apresentada na figura abaixo.

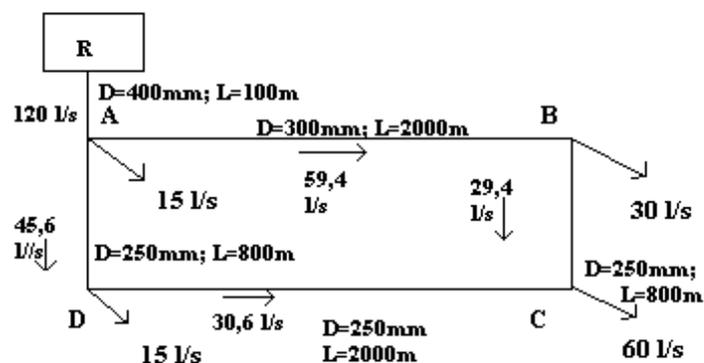


Figura 23. Resultado dos Cálculos por Hardy-Cross

## Cálculo das Velocidades

Trecho	Diâmetro(mm)	Vazão (l/s)	Velocidade (m/s)	Observações
RA	400	120,00	0,95	Valores Satisfatórios
AB	300	59,40	0,84	Valores Satisfatórios
BC	250	29,40	0,62	Valores Satisfatórios
CD	250	30,60	0,62	Valores Satisfatórios
DA	250	45,60	0,93	Valores Satisfatórios

**Tabela 6. Cálculo de Velocidades do Fluido**

Admitindo o nível do reservatório na cota 100 (início da linha piezométrica) a cota piezométrica em A será:

$$100 - h_{RA} = 100 - 0,36 = 99,64.$$

$h_{Ra}$  foi calculado utilizando  $D = 400\text{mm}$ ;  $Q = 120\text{ l/s}$  e  $L = 100\text{ m}$ .

Supondo ainda, igual a 70 a cota do terreno em todos os pontos, poderemos calcular as cotas piezométricas nos diversos nós e as pressões disponíveis, como mostraremos a seguir.

Nó	Perda de Carga do Reservatório ao nó (m)	Cota da Linha Piezométrica (m)	Cota do Terreno (m)	Pressão Disponível (m)
R		100,00		
A	0,36	99,64	70,00	29,64
B	$8,2+0,36=8,56$	91,44	70,00	21,44
C	$8,56+2,16=10,72$	89,28	70,00	19,28
D	$10,72-5,7=5,02$	94,98	70,00	24,98

**Tabela 7. Cálculo de Perdas de Cargas**

O método de Hardy-Cross supõe que sejam fornecidos todos os comprimentos dos dutos e a planta topográfica.

O sistema complexo de dutos forma circuitos ou anéis, denominando-se nó aos pontos de encontro de dois ou mais encanamentos. Admite-se que a distribuição em marcha é substituída por tomadas convenientemente localizadas em pontos fictícios. Cada trecho, entre duas tomadas sucessivas terá, portanto, vazão uniforme. Esta modalidade que mostramos com este exemplo chama-se de compensação de vazões. Outra modalidade seria a de compensação de perdas de carga.

## Apêndice 2. Valores do Coeficiente C da Fórmula de Hazen-Williams

<b>Tipo de Tubulação (Utilizado para cálculos de consistência)</b>	<b>C</b>
Aço corrugado ( chapa ondulada )	60
Aço de juntas “Lock - bar”, tubos novos	130
Aço galvanizado (novos e usados)	125
Aço rebitado (novos)	110
Aço rebitado (em uso)	85
Aço soldado (novos)	130
Aço soldado (em uso)	90
Aço soldado, com revestimento especial (novos e usados)	130
Chumbo	130
Cimento - amianto	135
Cobre	130
Concreto (bom acabamento)	130
Concreto (acabamento comum)	120
Ferro fundido (novo)	130
Ferro fundido (após 15-20 anos EUA)	100
Ferro fundido (usado - Brasil)	90
Ferro fundido com revestimento de cimento	110
Grez cerâmica vidrado (manilhas)	110
Latão	130
Madeiras em aduelas	120
Tijolos (condutos bem executados)	100
Vidro	140
Plástico	140

**Tabela 8. Valores do Coeficiente C da Fórmula de Hazen-Williams**

### **Apêndice 3. Instalação do Sistema**

#### A partir do Windows 95 ou NT 4.0 (Compilação em 32 bits)

1. Clicar no Menu INICIAR.
2. Clicar na opção executar.
3. Digitar A:\SETUP ou B:\SETUP, de acordo com sua unidade de disco.

#### A partir do Windows NT 3.51 (Compilação em 32 bits)

1. Clicar na opção ARQUIVOS do Gerenciador de Programas.
2. Clicar na opção EXECUTAR.
3. Digitar A:\SETUP ou B:\SETUP, de acordo com sua unidade de disco.

#### Observações:

1. Qualquer que seja seu Windows será solicitado um diretório para instalação do sistema, sendo o padrão C:\NOS. Mude o nome do diretório se desejado.
2. Caso ocorra algum erro na instalação repita o mesmo procedimento. Se o erro se repetir consulte seu suporte autorizado.
3. Se o seu sistema já estiver instalado e houver uma necessidade de reinstalação, tire uma cópia de segurança de seus dados antes. Todos os arquivos serão sobrepostos.

#### Apêndice 4. Definições e Formatação das Bases de Dados

Os arquivos que utilizamos para gerenciar os modelos são descritos a seguir e formatados no padrão ACCESS.

<b>Nome</b>	<b>Descrição</b>	<b>Tabela</b>
Modelo.Mdb	Descrição do ambiente	Ambiente
	Dados dos caminhos de cada nó às fontes	Caminhos
	Caracterização dos circuitos	Circuitos
	Descrição das ligações	Ligacoes
	Descrição dos nós	Nos
	Descrição dos símbolos utilizados	Símbolos
	Tipos de tubulações	Tipos
	Descrição dos tubos por tipo	Tubos
Tabelas.Mdb	Tabelas diversas de apoio	Metodos
	Tabela geral de símbolos	Simbolos
	Tabela geral de tipos de tubulações	Tipos
	Descrição geral dos tubos	Tubos

ARQUIVO : Modelo.Mdb.  
 TABELA : Ambiente.  
 ASSUNTO : Descrição do ambiente do modelo.  
 ÍNDICE : Variável ( em ordem ascendente ).

<b>Campo</b>	<b>Tipo</b>	<b>Tamanho</b>	<b>Descrição</b>
Variavel	Texto	50	Variável de controle.
Secao	Texto	10	Seção da variável.
Descricao	Texto	50	Descrição da variável.
Observacao	Memorando	-	Observações adicionais.
Inclusao	Data/Hora	8	Data de inclusão do registro.
Alteracao	Data/Hora	8	Data de alteração do registro.

ARQUIVO : Modelo.Mdb.

TABELA : Caminhos.

ASSUNTO : Armazena os caminhos de cada nó às fontes.

ÍNDICE : Caminho.

<b>Campo</b>	<b>Tipo</b>	<b>Tamanho</b>	<b>Descrição</b>
Registro	Número(Longo)	4	Número do registro.
No_Origem	Número(Longo)	4	Nó origem do caminho.
No_Destino	Número(Longo)	4	Nó destino do caminho.
Caminho	Número(Inteiro)	2	Número seqüencial do caminho.
No_Inicial	Número(Longo)	4	Variável de controle.
No_Final	Número(Longo)	4	Variável de controle.
Inclusao	Data/Hora	8	Data de inclusão do registro.
Alteracao	Data/Hora	8	Data de alteração do registro.

ARQUIVO : Modelo.Mdb.  
 TABELA : Circuitos.  
 ASSUNTO : Armazena os circuitos (anéis) do modelo.  
 ÍNDICE : Ordem.

<b>Campo</b>	<b>Tipo</b>	<b>Tamanho</b>	<b>Descrição</b>
Ordem	Número(Longo)	4	Número do registro.
Circuito	Número(Longo)	4	Número do circuito.
No_Inicial	Número(Longo)	4	Nó inicial.
No_Final	Número(Longo)	4	Nó final.
Perda	Número(Duplo)	8	Perda de carga.
Observacao	Texto	50	Observações adicionais.
Inclusao	Data/Hora	8	Data de inclusão do registro.
Alteracao	Data/Hora	8	Data de alteração do registro.

ARQUIVO : Modelo.Mdb.  
TABELA : Ligacoes.  
ASSUNTO : Armazena as características de todas as ligações e cálculos.  
ÍNDICE : Ligacao.

<b>Campo</b>	<b>Tipo</b>	<b>Tamanho</b>	<b>Descrição</b>
Ligacao	Número(Longo)	4	Número da ligação.
Descricao	Memorando	-	Descrição da ligação.
No_Inicial	Número(Longo)	4	Nó inicial.
No_Final	Número(Longo)	4	Nó final.
Comprimento	Número(Simples)	4	Comprimento da ligação.
Comprimento1	Número(Simples)	4	Comprimento da seção 1.
Comprimento2	Número(Simples)	4	Comprimento da seção 2.
Vazao_Inicial	Número(Simples)	4	Vazão inicial na ligação.
Vazao	Número(Simples)	4	Vazão calculada.
Tipo	Texto	2	Tipo da tubulação
Diametro_Inicial	Número(Simples)	4	Diâmetro inicial.
Diametro1	Número(Simples)	4	Diâmetro da seção 1.
Diametro2	Número(Simples)	4	Diâmetro da seção 2.
Valor_Inicial	Número(Simples)	4	Valor inicial por metro da ligação.
Valor1	Número(Simples)	4	Valor da seção 1 por metro.
Valor2	Número(Simples)	4	Valor da seção 2
Velocidade	Número(Simples)	8	Velocidade na ligação.

Nivel	Número(Inteiro)	2	Nível.
Circuito_ Primario	Número(Longo)	4	Circuito primário.
Circuito_ Secundario	Número(Longo)	4	Circuito secundário.
Peso	Número(Simples)	4	Peso da ligação.
Desligar	Texto	1	Indicador de ligação desprezada.
Inclusao	Data/Hora	8	Data de inclusão do registro.
Alteracao	Data/Hora	8	Data de alteração do registro.

ARQUIVO : Modelo.Mdb.  
TABELA : Nos.  
ASSUNTO : Armazena a descrição dos nós.  
ÍNDICE : No.

<b>Campo</b>	<b>Tipo</b>	<b>Tamanho</b>	<b>Descrição</b>
No	Número(Longo)	4	Número do nó.
Tipo	Texto	50	Tipo do nó.
Nivel	Número(Inteiro)	4	Nível.
Descricao	Memorando	-	Descrição do nó.
X	Número(Simples)	4	Coordenada x.
Y	Número(Simples)	4	Coordenada y.
Demanda	Número(Simples)	4	Demanda.
Demanda_Inicial	Número(Simples)	4	Demanda inicial.
Demanda_Minima	Número(Simples)	4	Demanda mínima
Demanda_Maxima	Número(Simples)	4	Demanda máxima
Vazao_Entrada	Número(Simples)	4	Vazão de entrada.
Vazao_Saida	Número(Simples)	4	Vazão de saída.
Cota	Número(Simples)	4	Cota.
Cota_Minima	Número(Simples)	4	Cota mínima.
Cota_Inicial	Número(Simples)	4	Cota inicial.
Peso	Número(Simples)	4	Peso do nó.
Inclusao	Data/Hora	8	Data de inclusão
Alteracao	Data/Hora	8	Data de alteração

ARQUIVO : Modelo.Mdb.  
 TABELA : Simbolos.  
 ASSUNTO : Armazenamento de símbolos.  
 ÍNDICE : Simbolo.

<b>Campo</b>	<b>Tipo</b>	<b>Tamanho</b>	<b>Descrição</b>
Simbolo	Texto	10	Nome do símbolo.
Descricao	Texto	50	Descrição.
Forma	Número(Inteiro)	4	Forma.
Cor	Número(Longo)	4	Cor.
Observacao	Memorando	-	Observações adicionais.
Inclusao	Data/Hora	8	Data de inclusão
Alteracao	Data/Hora	8	Data de alteração

ARQUIVO : Modelo.Mdb.

TABELA : Tipos.

ASSUNTO : Tabela de tipos de tubulações do modelo.

ÍNDICE : Tipo.

<b>Campo</b>	<b>Tipo</b>	<b>Tamanho</b>	<b>Descrição</b>
Tipo	Texto	2	Tipo da tubulação.
Descricao	Texto	50	Descrição do tipo.
Inclusao	Data/Hora	8	Data de inclusão do registro.
Alteracao	Data/Hora	8	Data de alteração do registro.

ARQUIVO : Modelo.Mdb.  
TABELA : Tubos.  
ASSUNTO : Tabela de tubulações do modelo.  
ÍNDICE : Tubo.

<b>Campo</b>	<b>Tipo</b>	<b>Tamanho</b>	<b>Descrição</b>
Tipo	Texto	2	Tipo da tubulação.
Diametro	Número(Simples)	4	Diâmetro.
Descricao	Texto	50	Descrição do tubo.
Valor	Número(Simples)	4	Valor comercial do tubo por metro.
Inclusao	Data/Hora	8	Data de inclusão
Alteracao	Data/Hora	8	Data de alteração

ARQUIVO : Tabelas.Mdb.

TABELA : Metodos.

ASSUNTO : Métodos disponíveis para cálculos das perdas de cargas.

ÍNDICE : Metodo.

<b>Campo</b>	<b>Tipo</b>	<b>Tamanho</b>	<b>Descrição</b>
Metodo	Texto	1	Código do método.
Descricao	Texto	50	Descrição do método.
Inclusao	Data/Hora	8	Data de inclusão do registro.
Alteracao	Data/Hora	8	Data de alteração do registro.

ARQUIVO : Tabelas.Mdb.  
 TABELA : Simbolos.  
 ASSUNTO : Armazena os símbolos gerais.  
 ÍNDICE : Símbolo.

<b>Campo</b>	<b>Tipo</b>	<b>Tamanho</b>	<b>Descrição</b>
Simbolo	Texto	10	Nome do simbolo.
Descricao	Texto	50	Descrição.
Forma	Número(Inteiro)	4	Forma.
Cor	Número(Longo)	4	Cor.
Observacao	Memorando	-	Observações adicionais.
Inclusao	Data/Hora	8	Data de inclusão
Alteracao	Data/Hora	8	Data de alteração

ARQUIVO : Tabelas.Mdb.  
TABELA : Tipos.  
ASSUNTO : Tabela de tipos de tubulações do modelo ( Padrão ).  
ÍNDICE : Tipo.

<b>Campo</b>	<b>Tipo</b>	<b>Tamanho</b>	<b>Descrição</b>
Tipo	Texto	2	Tipo da tubulação.
Descricao	Texto	50	Descrição do tipo.
Inclusao	Data/Hora	8	Data de inclusão do registro.
Alteracao	Data/Hora	8	Data de alteração do registro.

ARQUIVO : Tabelas.Mdb.

TABELA : Tubos.

ASSUNTO : Tabela de tubulações do modelo (Padrão).

ÍNDICE : Tubo.

<b>Campo</b>	<b>Tipo</b>	<b>Tamanho</b>	<b>Descrição</b>
Tipo	Texto	2	Tipo da tubulação.
Diametro	Número(Simples)	4	Diâmetro.
Descricao	Texto	50	Descrição do tubo.
Valor	Número(Simples)	4	Valor comercial do tubo por metro.
Inclusao	Data/Hora	8	Data de inclusão
Alteracao	Data/Hora	8	Data de alteração

## **Apêndice 5.** Exemplo de Relatório dos Nós do Modelo

**Adbeel Goes Filho.**

Interface Gráfica Para Análise e Dimensionamento de Fluxo em Redes.

Descrição dos Nós.

Página 1

Relatório NOS.RPT

<u>Nó</u>	<u>Descrição</u>	<u>Nível</u>	<u>Tipo</u>	<u>Coordenadas</u>		<u>Demanda</u>	<u>Demanda Inicial</u>	<u>Demanda Mínima</u>	<u>Demanda Máxima</u>	<u>Cota</u>	<u>Cota Mínima</u>	<u>Cota Inicial</u>
				<u>X</u>	<u>Y</u>	( l/s )	( l/s )	( l/s )	( l/s )	<u>Calculada</u>	<u>(Metros)</u>	<u>(Metros)</u>
1				200,00	850,00	165,00	165,00			80,00	75,00	80,00
2				370,00	800,00	220,00	220,00			90,00	74,00	90,00
3				700,00	800,00	145,00	145,00			90,00	73,00	90,00
4				100,00	750,00	165,00	165,00			70,00	72,00	70,00
5		Fonte		500,00	750,00					102,00	102,00	102,00
6				300,00	670,00	140,00	140,00			80,00	73,00	80,00
7				650,00	600,00	175,00	175,00			90,00	67,00	90,00
8				100,00	550,00	180,00	180,00			70,00	72,00	70,00
9				220,00	550,00	140,00	140,00			75,00	70,00	75,00
10				470,00	550,00	160,00	160,00			90,00	69,00	90,00
11				420,00	480,00	170,00	170,00			93,00	71,00	93,00
12				570,00	420,00	160,00	160,00			85,00	70,00	85,00
13				750,00	440,00	190,00	190,00			80,00	64,00	80,00
14				250,00	350,00	200,00	200,00			90,00	73,00	90,00
15				130,00	330,00	150,00	150,00			80,00	73,00	80,00
16		Fonte		350,00	300,00					96,00	96,00	96,00
17				650,00	300,00	165,00	165,00			80,00	67,00	80,00
18				450,00	230,00	140,00	140,00			90,00	70,00	90,00
19				230,00	180,00	185,00	185,00			90,00	70,00	90,00
20				400,00	30,00	165,00	165,00			70,00	67,00	70,00

Tabela 9. Descrição dos Nós de um Modelo

**Apêndice 6.** Exemplo de Relatório dos Caminhos Mínimos de um Nó a Todas as Fontes do Fluido

**Adbeel Goes Filho.** Página 1

Interface Gráfica Para Análise e Dimensionamento de Fluxo em Redes. Relatório CAMINHOS.RPT

Descrição dos Caminhos do Nó i a(s) Fonte(s)

<u>Registro</u>	<u>Nó Origem</u>	<u>Nó Destino</u>	<u>Caminho</u>	<u>Nó Inicial</u>	<u>Nó Final</u>
1	1	5	1	1	2
2				2	5
3			2	1	6
4				6	10
5				10	5
6			3	1	4
7				4	9
8				9	11
9				11	12
10				12	7
11				7	5
12		16	1	1	4
13				4	9
14				9	14
15				14	16
16			2	1	6
17				6	9
18				9	11
19				11	16
20			3	1	2
21				2	6
22				6	10
23				10	11
24				11	18
25				18	16
26	2	5	1	2	5
27			2	2	3
28				3	5
29			3	2	6
30				6	10
31				10	5
32		16	1	2	6
33				6	10
34				10	11
35				11	16
36			2	2	3
37				3	7
38				7	12
39				12	11
40				11	18
41				18	16
42			3	2	1
43				1	6
44				6	9
45				9	14
46				14	16
47	3	5	1	3	5
48			2	3	2
49				2	5
50			3	3	7

**Adbeel Goes Filho.** Página 2

Interface Gráfica Para Análise e Dimensionamento de Fluxo em Redes. Relatório CAMINHOS.RPT

Descrição dos Caminhos do Nó i a(s) Fonte(s)

<u>Registro</u>	<u>Nó Origem</u>	<u>Nó Destino</u>	<u>Caminho</u>	<u>Nó Inicial</u>	<u>Nó Final</u>
51				7	5
52		16	1	3	7
53				7	12
54				12	11
55				11	16
56			2	3	2
57				2	6
58				6	9
59				9	14
60				14	16
61	4	5	1	4	1
62				1	2
63				2	5
64			2	4	9
65				9	6
66				6	10
67				10	5
68			3	4	8
69				8	9
70				9	11
71				11	12
72				12	7
73				7	5
74		16	1	4	8
75				8	15
76				15	19
77				19	16
78			2	4	9
79				9	14
80				14	16
81			3	4	1
82				1	6
83				6	9
84				9	11
85				11	16
86	6	5	1	6	2
87				2	5
88			2	6	10
89				10	5
90			3	6	9
91				9	11
92				11	12
93				12	7
94				7	5
95			4	6	1
96				1	4
97				4	9
98				9	14
99				14	19
100				19	20

**Adbeel Goes Filho.** Página 3

Interface Gráfica Para Análise e Dimensionamento de Fluxo em Redes. Relatório CAMINHOS.RPT  
 Descrição dos Caminhos do Nó i a(s) Fonte(s)

<u>Registro</u>	<u>Nó Origem</u>	<u>Nó Destino</u>	<u>Caminho</u>	<u>Nó Inicial</u>	<u>Nó Final</u>
101				20	18
102				18	17
103				17	13
104				13	7
105				7	3
106				3	5
107		16	1	6	10
108				10	11
109				11	16
110			2	6	2
111				2	3
112				3	7
113				7	12
114				12	17
115				17	18
116				18	16
117			3	6	9
118				9	14
119				14	16
120			4	6	1
121				1	4
122				4	8
123				8	15
124				15	19
125				19	16
126	7	5	1	7	5
127			2	7	3
128				3	5
129			3	7	12
130				12	10
131				10	5
132			4	7	13
133				13	12
134				12	11
135				11	9
136				9	6
137				6	2
138				2	5
139		16	1	7	12
140				12	11
141				11	16
142			2	7	13
143				13	17
144				17	18
145				18	16
146			3	7	3
147				3	2
148				2	6
149				6	9
150				9	14

**Adbeel Goes Filho.** Página 4

Interface Gráfica Para Análise e Dimensionamento de Fluxo em Redes. Relatório CAMINHOS.RPT

## Descrição dos Caminhos do Nó i a(s) Fonte(s)

<u>Registro</u>	<u>Nó Origem</u>	<u>Nó Destino</u>	<u>Caminho</u>	<u>Nó Inicial</u>	<u>Nó Final</u>
151				14	16
152	8	5	1	8	4
153				4	1
154				1	2
155				2	5
156			2	8	9
157				9	6
158				6	10
159				10	5
160			3	8	15
161				15	19
162				19	20
163				20	18
164				18	11
165				11	12
166				12	7
167				7	3
168				3	5
169		16	1	8	9
170				9	11
171				11	16
172			2	8	4
173				4	1
174				1	6
175				6	10
176				10	11
177				11	18
178				18	16
179			3	8	15
180				15	14
181				14	16
182	9	5	1	9	4
183				4	1
184				1	2
185				2	5
186			2	9	6
187				6	10
188				10	5
189			3	9	11
190				11	12
191				12	7
192				7	5
193			4	9	14
194				14	19
195				19	20
196				20	18
197				18	17
198				17	13
199				13	7
200				7	3

**Adbeel Goes Filho.** Página 5

Interface Gráfica Para Análise e Dimensionamento de Fluxo em Redes. Relatório CAMINHOS.RPT

Descrição dos Caminhos do Nó i a(s) Fonte(s)

<u>Registro</u>	<u>Nó Origem</u>	<u>Nó Destino</u>	<u>Caminho</u>	<u>Nó Inicial</u>	<u>Nó Final</u>
201				3	5
202		16	1	9	11
203				11	16
204			2	9	6
205				6	10
206				10	11
207				11	18
208				18	16
209			3	9	14
210				14	16
211			4	9	8
212				8	15
213				15	19
214				19	16
215	10	5	1	10	5
216			2	10	12
217				12	7
218				7	5
219			3	10	6
220				6	2
221				2	5
222		16	1	10	11
223				11	16
224			2	10	12
225				12	11
226				11	18
227				18	16
228			3	10	6
229				6	9
230				9	14
231				14	16
232			4	10	6
233				6	1
234				1	4
235				4	8
236				8	15
237				15	19
238				19	16
239	11	5	1	11	10
240				10	5
241			2	11	12
242				12	7
243				7	5
244			3	11	9
245				9	6
246				6	2
247				2	5
248		16	1	11	16
249			2	11	18
250				18	16

**Adbeel Goes Filho. Página 6**

Interface Gráfica Para Análise e Dimensionamento de Fluxo em Redes. Relatório CAMINHOS.RPT

Descrição dos Caminhos do Nó i a(s) Fonte(s)

<u>Registro</u>	<u>Nó Origem</u>	<u>Nó Destino</u>	<u>Caminho</u>	<u>Nó Inicial</u>	<u>Nó Final</u>
251			3	11	12
252				12	17
253				17	18
254				18	20
255				20	19
256				19	16
257			4	11	9
258				9	14
259				14	16
260			5	11	10
261				10	6
262				6	9
263				9	8
264				8	15
265				15	19
266				19	16
267	12	5	1	12	10
268				10	5
269			2	12	7
270				7	5
271			3	12	11
272				11	9
273				9	6
274				6	2
275				2	5
276		16	1	12	17
277				17	18
278				18	16
279			2	12	11
280				11	16
281			3	12	10
282				10	11
283				11	9
284				9	14
285				14	16
286			4	12	7
287				7	3
288				3	2
289				2	1
290				1	4
291				4	8
292				8	15
293				15	19
294				19	16
295	13	5	1	13	7
296				7	5
297			2	13	12
298				12	10
299				10	5
300			3	13	17

**Adbeel Goes Filho.** Página 7

Interface Gráfica Para Análise e Dimensionamento de Fluxo em Redes. Relatório CAMINHOS.RPT

Descrição dos Caminhos do Nó i a(s) Fonte(s)

<u>Registro</u>	<u>Nó Origem</u>	<u>Nó Destino</u>	<u>Caminho</u>	<u>Nó Inicial</u>	<u>Nó Final</u>
301				17	18
302				18	11
303				11	10
304				10	6
305				6	2
306				2	5
307		16	1	13	17
308				17	18
309				18	16
310			2	13	12
311				12	11
312				11	16
313			3	3	7
314				7	12
315				12	10
316				10	11
317				11	9
318				9	14
319				14	16
320	14	5	1	14	9
321				9	11
322				11	10
323				10	5
324			2	14	15
325				15	8
326				8	4
327				4	1
328				1	2
329				2	5
330			3	14	19
331				19	20
332				20	18
333				18	17
334				17	12
335				12	7
336				7	5
337		16	1	14	16
338			2	14	9
339				9	11
340				11	16
341			3	14	15
342				15	19
343				19	16
344	15	5	1	15	14
345				14	9
346				9	11
347				11	10
348				10	5
349			2	15	8
350				8	4

**Adbeel Goes Filho.** Página 8

Interface Gráfica Para Análise e Dimensionamento de Fluxo em Redes. Relatório CAMINHOS.RPT

Descrição dos Caminhos do Nó i a(s) Fonte(s)

<u>Registro</u>	<u>Nó Origem</u>	<u>Nó Destino</u>	<u>Caminho</u>	<u>Nó Inicial</u>	<u>Nó Final</u>
351				4	1
352				1	2
353				2	5
354			3	15	19
355				19	20
356				20	18
357				18	17
358				17	12
359				12	7
360				7	5
361		16	1	15	14
362				14	16
363			2	15	19
364				19	16
365			3	15	8
366				8	9
367				9	11
368				11	16
369	17	5	1	17	12
370				12	7
371				7	5
372			2	17	18
373				18	11
374				11	10
375				10	5
376			3	17	18
377				18	20
378				20	19
379				19	14
380				14	9
381				9	6
382				6	2
383				2	5
384		16	1	17	12
385				12	11
386				11	16
387			2	17	13
388				13	12
389				12	10
390				10	11
391				11	9
392				9	14
393				14	16
394			3	17	18
395				18	16
396	18	5	1	18	11
397				11	10
398				10	5
399			2	18	17
400				17	12

**Adbeel Goes Filho.** Página 9

Interface Gráfica Para Análise e Dimensionamento de Fluxo em Redes. Relatório CAMINHOS.RPT

Descrição dos Caminhos do Nó i a(s) Fonte(s)

<u>Registro</u>	<u>Nó Origem</u>	<u>Nó Destino</u>	<u>Caminho</u>	<u>Nó Inicial</u>	<u>Nó Final</u>
401				12	7
402				7	5
403			3	18	20
404				20	19
405				19	14
406				14	9
407				9	6
408				6	2
409				2	5
410		16	1	18	16
411			2	18	11
412				11	16
413			3	18	20
414				20	19
415				19	16
416	19	5	1	19	14
417				14	9
418				9	6
419				6	10
420				10	5
421			2	19	15
422				15	8
423				8	4
424				4	1
425				1	2
426				2	5
427			3	19	20
428				20	18
429				18	11
430				11	12
431				12	7
432				7	5
433		16	1	19	16
434			2	19	14
435				14	16
436			3	19	20
437				20	18
438				18	16
439			4	19	15
440				15	8
441				8	9
442				9	11
443				11	16
444	20	5	1	20	18
445				18	11
446				11	10
447				10	5
448			2	20	19
449				19	14
450				14	9

**Adbeel Goes Filho.** Página 10

Interface Gráfica Para Análise e Dimensionamento de Fluxo em Redes. Relatório CAMINHOS.RPT

Descrição dos Caminhos do Nó i a(s) Fonte(s)

<u>Registro</u>	<u>Nó Origem</u>	<u>Nó Destino</u>	<u>Caminho</u>	<u>Nó Inicial</u>	<u>Nó Final</u>
451				9	6
452				6	2
453				2	5
454		16	1	20	18
455				18	16
456			2	20	19

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [01] CAMPELLO, R. EDUARDO e MACULLAN, NELSON, *Algoritmos e Heurísticas. Desenvolvimento e Avaliação de Performance*. Niterói, RJ: EDUFF, 1974.
- [02] HOROWITZ, ELLIS e SAHNI, SARTAJ, *Fundamentos de Estruturas de Dados*. 3a. Edição. Rio de Janeiro, RJ: Campus, 1987.
- [03] BOAVENTURA NETO, P. O., *Teoria e Modelos de Grafos*. São Paulo, SP: E. Blücher, 1979.
- [04] KUMAR, VIPIN et al, *Introduction to Parallel Computing. Design And Analysis of Algorithms*. Califórnia, USA: The Benjamin/Cummings Publishing Company, Inc., 1994.
- [05] RUGGIERO, M.A. GOMES e LOPES, VERA L. R., *Cálculo Numérico - Aspectos Teóricos e Computacionais*. São Paulo, SP: McGraw-Hill, 1988.
- [06] DEMIDOVITCH, B.P, *Computational Mathematics*. Moscou: Editora Mir. 1988.

- [07] KOPCHENOVA, B., *Computational Mathematics*. Moscou: Editora Mir,1988.
- [08] SYSLO, MACIEJ M, *Discrete Optimization Algorithms*. USA-New Jersey: Prentice-Hall, Inc. ISBN 0-13-215509-5, 1983.
- [09] MILIDIÚ, Ruy Luiz, *Fundamentos de Redes Neurais. Notas de Aula*. Sociedade Brasileira de Matemática Aplicada e Computacional - SBMAC. Curitiba, PR: 1995.
- [10] SCHMITZ, EBER ASSIS e TELES, ANTÔNIO A.. S., SOUZA, *Pascal e Técnicas de Programação*.-3.e.d.-Rio de Janeiro,RJ: LTC, 1988.
- [11] MICROSOFT, *Visual Basic ® Version 5.0. Programmer's Guide – Programming System for Windows ®*. USA: Microsoft Corporation, 1997.
- [12] FOX, Rober W. e McDOLANL, Alan T. *Introdução à Mecânica dos Fluidos*. Rio de Janeiro, RJ: Editora Guanabara Dois S.A., 1981.
- [13] MIRSHAWKA,Vítor, *Pesquisa Operacional*. Vol.1. São Paulo, SP: Nobel, 1981.
- [14] MIRSHAWKA,Vítor, *Aplicações de Pesquisa Operacional*. Vol.1. São Paulo, SP: Nobel, 1981.

- [15] MORGAN, D. R. e GOULTER, I. C, *Optimal Urban Water Distribution Design*. Water Resources Research, Vol.21, No.5.pp.642-652. Paper No. 5W0070. USA: American Geophysical Union, 1985.
- [16] DANDY, G. C. ;SIMPSON, ANGUS R.; MURPHY, LAURENCE J., *An Improved Genetic Algorithm For Pipe Network Optimization*. Water Resources Research, Vol. 32. nº 2, pp 449-458. Paper No. 95WR02917. USA: 1996.
- [17] SAFAVIAN, S. Rasoul e LANDGREBE, David., *A Survey of Decision Tree Classifier Methodology*. IEEE Transactions on Systems, Man, And Cybernetics, Vol. 21, No.3. May/June 1991. USA: IEEE, 1991.
- [18] S. KIRKPATRICK, C.D.GELLAT, Jr., M.P.VECCHI.,*Optimization by Simulated Annealing*. Science.Vol. 220.No. 4598. USA: 1983.
- [19] WOORD, DON J. And CHARLES, CARL O.A., *Journal of The Hydraulics Division*. “Proceedings of the American Society of Civil Engineers. Hydraulic Network Analysis Using Linear Theory”. USA: 1986.
- [20] AZEVEDO NETO, J.M., *Manual de Hidráulica*. Vol. 3. Rio de Janeiro, RJ: Editora Campus, 1981.

**Editado eletronicamente no Núcleo de Informática da  
VIRTVS Engenharia e Informática Ltda.  
Rua Coronel Ribeiro da Silva, 391. Monte Castelo.  
CEP 60.325-210. Fortaleza - Ceará - Brasil.  
Telefones +55 085 2819997 / 2833124  
Fax 2831656. E-mail:virtvs@secrel.com.br**