



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO  
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ  
Reconhecida lei 3232 - 05/01/1917

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Regulação de Geradores de Fluxo  
Pela  
Variação da Rotação**

Paulo Marcelo Tasinaffo

**ORIENTADOR : Dr. Afonso Henriques Moreira Santos**

**Itajubá - MG  
1998**



Ministério da Educação e do Desporto  
**ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ**

## **ANEXO I**

### **PRONUNCIAMENTO DA BANCA EXAMINADORA**

A Banca Examinadora, abaixo assinada, nomeada pela Portaria nº 339 de 18 de dezembro de 1998, considerando o resultado do Julgamento da Prova de Defesa Pública da Dissertação de Mestrado intitulada: "**Regulação de Geradores de Fluxo pela Variação da Rotação**" apresenta pronunciamento no sentido de que o Coordenador dos Cursos de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Escola Federal de Engenharia de Itajubá, solicite ao DRA (Departamento de Registro Acadêmico) a expedição do título de **Mestre em Ciências em Engenharia Mecânica, na Área de Concentração: Máquinas de Fluxo**, satisfeitas as demais exigências regimentais, à **Paulo Marcelo Tasinaffo**.

Itajubá, 19 de dezembro de 1998.

Prof. Lineu Belico dos Reis  
1º Examinador - USP

Prof. Augusto Nelson Carvalho Viana  
2º Examinador - EFEI

Prof. Jamil Haddad  
3º Examinador - EFEI

Prof. Afonso Henriques Moreira Santos  
4º Examinador (Orientador) - EFEI



Ministério da Educação e do Desporto  
**ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ**  
Reconhecida Lei 3232 - 05/01/1917

**ANEXO II**

**FOLHA DE JULGAMENTO DA BANCA EXAMINADORA**

Título da Dissertação: "Regulação de Geradores de Fluxo pela Variação da Rotação".

Autor: **Paulo Marcelo Tasinaffo**

**JULGAMENTO**

| Examinadores | Conceito | Rubrica                               |
|--------------|----------|---------------------------------------|
| 1º           | A+       | <i>BR</i>                             |
| 2º           | A+       | <i>Augusto Nelson Carvalho Viana</i>  |
| 3º           | A+       | <i>Jamil Haddad</i>                   |
| 4º           | A+       | <i>Afonso Henrique Moreira Santos</i> |

Resultado Médio: Conceito A+, ou seja, aprovado com distinção

Observações: \_\_\_\_\_

Itajubá, 19 de dezembro de 1998.

*BR*  
Prof. Lineu Belico dos Reis  
1º Examinador - USP

*Augusto Nelson Carvalho Viana*  
Prof. Augusto Nelson Carvalho Viana  
2º Examinador - EFEI

*Jamil Haddad*  
Prof. Jamil Haddad  
3º Examinador - EFEI

*Afonso Henrique Moreira Santos*  
Prof. Afonso Henrique Moreira Santos  
4º Examinador(Orientador)-EFEI

A Deus, minha família e amigos.

## **Agradecimentos**

Primeiramente agradeço, ao professor e orientador, Dr. Afonso Henriques Moreira Santos, pela orientação e apoio, pois, foi responsável direto pela criação e elaboração do modelo matemático no qual se baseia toda essa Dissertação. Agradeço também aos meus pais, pela motivação, apoio e confiança que em mim depositaram. Em geral, agradeço a todas as pessoas que me incentivaram e me apoiaram na conclusão desta Dissertação de Mestrado.

Aos colegas do LHPCH pelo apoio e amizade. Ao professor Augusto Nelson Carvalho Viana pela obtenção experimental do diagrama colina da bomba centrífuga utilizada no bairro Vista Verde, como também aos alunos Eduardo Zanirato (pelas leituras hidrométricas realizadas no bairro Vista Verde) e Paulo Santiago Ribeiro (pelo auxílio na manipulação das ferramentas de redes neurais contidas no Matlab).

Ao professor Jamil Haddad pelas soluções práticas e burocráticas necessárias para a conclusão desse trabalho. Ao CNPq, agradeço pelo apoio financeiro. Ao PROCEL, agradeço pelo financiamento dos equipamentos utilizados e ensaiados durante este trabalho. À PPG, agradeço as secretárias que contribuíram para solucionar as questões burocráticas e administrativas do dia-a-dia. Aos engenheiros da COPASA que permitiram realizar ensaios experimentais, em suas instalações hidráulicas, na cidade de Itajubá/MG. Enfim, a todos os amigos da EFEI, que direta ou indiretamente contribuíram para a finalização dessa Dissertação. Em especial e com admiração, agradeço pela glória de Deus e pelo milagre da vida.

# Índice

|                          |      |
|--------------------------|------|
| <b>Agradecimentos</b>    | i    |
| <b>Índice</b>            | ii   |
| <b>Índice de Figuras</b> | v    |
| <b>Índice de Tabelas</b> | xi   |
| <b>Simbologia</b>        | xii  |
| <b>Resumo</b>            | xiv  |
| <b>Abstract</b>          | Xvii |

## Capítulo 1 - Descrição da Instalação Hidráulica

|   |   |
|---|---|
| 1.1 - Introdução .....  | 1 |
| 1.2 - Visita Técnica às Instalações da COPASA e Escolha da Instalação .....<br>de Bombeamento Mais Adequada na Cidade de Itajubá/MG.        | 2 |
| 1.2.1 - Visita Técnica às Instalações da Copasa .....   | 2 |
| 1.2.2 - Escolha da Instalação de Bombeamento Mais Adequada .....  | 2 |
| 1.2.3- Reuniões no LHPCH e no Laboratório de Eletrônica Para Definições .....<br>Básicas do Sistema a Ser Montado nas Instalações do LHPCH. | 5 |
| 1.2.4 - Especificações da Bomba e dos Motores Para Seu Acionamento .....  | 6 |
| 1.2.5 - Esquema Ilustrativo da Instalação .....   | 6 |
| 1.3 - Comentários finais .....  | 8 |

## Capítulo 2 - Modelo Matemático da Simulação

|   |    |
|---|----|
| 2.1 - Introdução .....  | 9  |
| 2.2 - Simulação Pelo Método de Monte Carlo Para Diagnóstico do Sistema .....  | 10 |
| 2.2.1 - Desenvolvimento Teórico .....   | 10 |
| 2.2.1.1 - O Método de Monte Carlo .....   | 12 |
| 2.2.2 - Aplicação do Método de Monte Carlo .....  | 14 |
| 2.2.2.1 - Levantamento de Campo .....   | 15 |
| 2.2.2.2 - Simulação Energética de sistemas de Abastecimento de Água .....<br>Potável Por Bombeamento.                 | 17 |
| 2.2.2.3 - Algoritmo Para a Conservação de Energia em Sistema .....<br>de Bombeamento Com Controle à Rotação Variável. | 25 |
| 2.3 - Transposição dos Resultados .....   | 30 |
| 2.4 - Simplificação do Modelo de Simulação .....  | 34 |

## Capítulo 3 - Redes Neurais Artificiais

|   |    |
|---|----|
| 3.1 - Introdução .....                                | 47 |
| 3.2 - Uma Visão Geral Sobre Redes Neurais .....       | 48 |
| 3.3 - A Rede Back-Propagation .....                   | 50 |
| 3.3.1 - A Estrutura da Rede Back-Propagation .....    | 51 |
| 3.3.1.1 - Micro-Estrutura Neural .....                | 51 |
| 3.3.1.2 - Meso-Estrutura Neural .....                 | 52 |
| 3.3.1.3 - Macroestrutura Neural .....                 | 53 |
| 3.3.2 - Dinâmica da Rede Back-Propagation .....       | 53 |
| 3.3.3 - Treinamento da Rede Back-Propagation .....    | 54 |
| 3.4 - Interpolação de Funções por Redes Neurais ..... | 55 |

## Capítulo 4 - Manual de Utilização do Software EFEI/PROCEL V1.0

|  |     |
|--|-----|
| 4.1 - Introdução .....   | 69  |
| 4.2 - Instalando o Software EFEI/PROCEL V-1.0 .....              | 70  |
| 4.3 - Aprendendo a Utilizar o Aplicativo EFEI/PROCEL V-1.0 ..... | 71  |
| 4.3.1 - Monte Carlo .....  | 73  |
| 4.3.1.1 - Usar os Dados já Existentes dos Hidrômetros .....      | 73  |
| (Opção 1 da Figura 4.5).   |     |
| 4.3.1.2 - Entrar Com os Novos Dados dos Hidrômetros .....        | 75  |
| (Opção 2 da Fig. 4.5)  |     |
| 4.3.2 - Transposição dos Resultados .....                        | 87  |
| 4.3.3 - Usando o Editor Gráfico do Matlab Para Desenhar a .....  | 96  |
| Instalação Hidráulica.   |     |
| 4.3.3.1 - Desenhando as Tubulações .....                         | 98  |
| 4.3.3.2 - Desenhando as Válvulas dos Consumidores .....          | 101 |
| 4.3.3.3 - Desenhando a Bomba .....                               | 104 |
| 4.3.3.4 - Desenhando o Cotovelo .....                            | 105 |
| 4.3.3.5 - Desenhando o Tê .....                                  | 106 |
| 4.3.3.6 - Desenhando a Cruzeta .....                             | 106 |
| 4.3.3.7 - Apagando Um Objeto de Desenho .....                    | 107 |
| 4.3.3.8 - Ícone Para a Entrada de Dados .....                    | 109 |
| 4.3.3.8.1 - Entrada de Dados dos Elementos da Planta .....       | 109 |
| 4.3.3.8.2 - Especificando os Caminhos da Bomba aos .....         | 116 |
| Consumidores.  |     |
| 4.3.3.9 - Ler ou Gravar Um Desenho .....                         | 120 |
| 4.3.3.10 - Saindo do Editor Gráfico do Matlab .....              | 123 |
| 4.4 - Limitações do Aplicativo .....                             | 125 |

## **Capítulo 5 - Apresentação dos Resultados das Simulações**

|   |     |
|---|-----|
| 5.1 - Introdução .....  | 126 |
| 5.2 - Testes Iniciais do Aplicativo EFEI/PROCEL V1.0 .....                  | 127 |
| 5.3 - Utilização do Aplicativo EFEI/PROCEL V1.0 no Bairro Vista Verde ..... | 134 |

## **Capítulo 6 - Conclusões**

|  |     |
|--|-----|
| 6.1 - Comentários Finais .....               | 139 |
| 6.2 - Propostas Para Trabalhos Futuros ..... | 140 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>*<sup>1</sup>Referências Bibliográficas</b> | 141 |
|--|-----|

|  |     |
|--|-----|
| <b>Apêndice A - Perda de Carga da Instalação</b> | 145 |
|--|-----|

|  |     |
|--|-----|
| <b>Apêndice B - Tabelas e Gráficos</b> | 152 |
|--|-----|

|  |     |
|--|-----|
| <b>*<sup>2</sup>Apêndice C - Aproximadores Universais de Funções</b> | 164 |
|--|-----|

|  |     |
|--|-----|
| <b>*<sup>3</sup>Apêndice D - Revisão Bibliográfica</b> | 172 |
|--|-----|

<sup>\*1</sup>As Referências Bibliográficas desta Dissertação de Mestrado foram atualizadas em 2015 quando da geração de sua versão em formato PDF. Isto explica porque algumas Referências Bibliográfica datam depois de 1998.

<sup>\*2</sup> e <sup>\*3</sup>Os Apêndices C e D são novos nessa versão em PDF. A versão original desta Dissertação de Mestrado de 1998 não possuem estes Apêndices.

## Índice de Figuras

### Capítulo 1

|   |   |
|---|---|
| 1.1 - Estação Elevatória do Bairro Vista Verde.....           | 3 |
| 1.2 - Casa de Máquinas da Estação Elevatória Vista Verde..... | 7 |

### Capítulo 2

|  |    |
|--|----|
| 2.1- Exemplo Gráfico Ilustrando o Método Utilizado Para Interpolar os Valores do Volume Acumulado dos Vários Consumidores a Intervalos de Tempos Iguais..... | 15 |
| 2.2 - Representação Gráfica do Cálculo da Vazão Média do I-ésimo Consumidor Para Um Intervalo de Tempo Genérico t.....                                       | 16 |
| 2.3 - Tabela de Dados (Vazão x Tempo) Para os n Consumidores Analisados.....   | 16 |
| 2.4 - Simulação de Monte Carlo Para Obtenção das Vazões dos n Consumidores da Rede de Abastecimento de Água Potável.....                                     | 18 |
| 2.5 - Diagrama H x Q de uma Bomba Centrífuga Funcionando com Rotação Constante.....  | 19 |
| 2.6 - Trajeto Hidráulico do Fluido a Ser Bombeado Desde a Saída da Bomba Até o I-ésimo Consumidor.....   | 21 |
| 2.7 - Representação Esquemática do Diagrama Colina do Conjunto Moto-Bomba...   | 23 |
| 2.8 - Exemplo Gráfico de um Tipo Particular de Distribuições de Probabilidade.....   | 32 |
| 2.9 - Representação Gráfica da Média e do Desvio Padrão da Distribuição dos Valores Unitários do Vetor Variância.....  | 36 |
| 2.10 - Função Densidade de Probabilidade (Incerteza) da Variância da Vazão da Bomba.....   | 37 |
| 2.11- Histograma, Dividido em 7 Partes, Representativo de uma Normal Qualquer de Média ( $\mu_x$ ) e Desvio Padrão ( $\sigma_x$ ).....                       | 38 |

### Capítulo 3

|   |    |
|---|----|
| 3.1 - Estrutura de Uma Rede Tipo BPN.....   | 49 |
| 3.2 - Estrutura de Uma Rede Tipo CMAC.....  | 49 |
| 3.3 - Estrutura de uma Rede Tipo RBF.....   | 50 |
| 3.4 - Modelo de Neurônio Artificial Com Entrada de Viés.....  | 51 |
| 3.5 - Exemplos Mais Comuns de Funções de Transferências Utilizadas Em Sistemas Computacionais de Redes Neurais.....   | 52 |
| 3.6 - Rede Neural Com Duas Entradas (Vazão da Bomba e Pressão Total) e Uma Saída (Rendimento) Para a Representação do Diagrama Colina da Bomba Empregada no Bairro Vista Verde..... | 58 |

|  |    |
|--|----|
| 3.7 - Rede Neural Com Duas Entradas (Vazão da Bomba e Pressão Total) e Uma Saída (Rotação) Para a Representação do Diagrama Colina da Bomba Empregada no Bairro Vista Verde..... | 58 |
| 3.8 - Função de Transferência Aplicável a Cada um dos Neurônios Representados nas Redes das Figuras 3.6 e 3.7.....   | 59 |
| 3.9 - Diagrama Colina que Representa o Campo Básico de Funcionamento da Bomba Centrífuga Utilizada no Bairro Vista Verde (Itajubá/MG).....                                       | 59 |
| 3.10- Rede Neural Com Três Entradas (ns, PHP e PDH) e Uma Saída (Eficiência) Para Representação dos Diagramas Colina Referentes às Turbinas Hidráulicas.....                     | 60 |
| 3.11.a - Diagrama Colina Para Representação das Turbinas Francis Com ns=22.....  | 62 |
| 3.11.b - Diagrama Colina Para Representação das Turbinas Francis Com ns=27.....  | 63 |
| 3.11.c - Diagrama Colina Para Representação das Turbinas Francis Com ns=32.....  | 63 |
| 3.11.d - Diagrama Colina Para Representação das Turbinas Francis Com ns=40.....  | 64 |
| 3.11.e - Diagrama Colina Para Representação das Turbinas Francis Com ns=44.....  | 64 |
| 3.11.f - Diagrama Colina Para Representação das Turbinas Francis Com ns=50.....  | 65 |
| 3.11.g - Diagrama Colina Para Representação das Turbinas Francis Com ns=62.....  | 65 |
| 3.11.h - Diagrama Colina Para Representação das Turbinas Francis Com ns=80.....  | 66 |
| 3.12 - Interpolação do Diagrama de Moody Por Redes Neurais.....  | 67 |
| 3.13 - Ilustração Didática da Rede Neural Que Interpola o Diagrama de Moody.....   | 68 |

## Capítulo 4

|   |    |
|---|----|
| 4.1 - Tela Inicial Para Instalação do Software EFEI/PROCEL V1.0.....  | 70 |
| 4.2 - Mensagem de Finalização da Instalação do Aplicativo.....  | 70 |
| 4.3 - Janela Inicial do Aplicativo EFEI/PROCEL V1.0.....  | 71 |
| 4.4 - Tela de Entrada do MATLAB e do Aplicativo EFEI/PROCEL.....  | 72 |
| 4.5- Janela Inicial Caso a Opção do Usuário Tenha Sido 1)Monte Carlo na Figura 4.4.....   | 73 |
| 4.6 - Permite Escolher Entre Ler os Dados Padrões dos Hidrômetros (Que Já Acompanham o Aplicativo) ou Outro Arquivo Equivalente Elaborado Por Terceiros.....        | 74 |
| 4.7 - Entrada do Nome do Arquivo Que Contêm os Dados dos Hidrômetros Obtidos por Terceiros.....   | 74 |
| 4.8 - Mensagem de Erro Caso o Arquivo a Ser Lido Não Exista na Memória do Computador.....   | 75 |
| 4.9- Janela Que Confirma a Entrada do Editor DOS.....   | 76 |
| 4.10 - Entrada dos Valores das Medições Temporais dos Hidrômetros dos n Consumidores da Rede Hidráulica Obtidos de Leituras Efetuadas em Campo.....                 | 76 |
| 4.11 - Janela Que Confirma o Nome do Arquivo Onde Foi Gravada a Leitura dos Hidrômetros dos n Consumidores da Rede.....   | 78 |
| 4.12 - Caso a Confirmação do Nome do Arquivo Onde Foi Gravada a Leitura dos Hidrômetros Seja Diferente do Nome Original Então, Aparecerá Esta Mensagem de Erro..... | 78 |

|  |    |
|--|----|
| 4.13 - Janela Que Pede a Confirmação ou Não da Correção Gráfica dos Valores Lidos nos Hidrômetros.....   | 79 |
| 4.14 - Representação Gráfica dos Valores Medidos em Campo dos Volumes Acumulados dos Hidrômetros.....  | 79 |
| 4.15 - Janela de Opções que Permite Corrigir os Valores Lidos nos Hidrômetros, Caso Estas Medições Venham Acompanhadas de Algum Erro.  | 80 |
| 4.16 - Consumidor Com Hidrômetro Danificado.....   | 80 |
| 4.17 - Janela Que Pede a Confirmação de Exclusão do Consumidor Selecionado.....  | 81 |
| 4.18 - Janela Que Possibilita a Finalização da Correção das Leituras de Todos os Hidrômetros da Instalação Hidráulica.....   | 81 |
| 4.19 - Ajuste das Leituras dos Hidrômetros Para os Mesmos Instantes de Tempo (Número Total de Interpolações).....  | 82 |
| 4.20 - Alteração Manual do Número Total de Interpolações dos Valores Medidos nos Hidrômetros pelo Método da Spline Cúbica.....   | 82 |
| 4.21 - Entrada dos Parâmetros Finais da Instalação Hidráulica Para a Realização da Simulação da Bomba Centrífuga Funcionando à Rotação Variável.....                                       | 83 |
| 4.22 - Editor Gráfico do Matlab Onde Será Possível Entrar Com o Desenho da Planta e os Parâmetros Físicos da Instalação.....   | 84 |
| 4.23 - Parâmetros Finais de Entrada de Dados Para a Realização da Simulação.....   | 85 |
| 4.24 - Apresentação Gráfica dos Resultados Obtidos na Simulação de Monte Carlo.....  | 86 |
| 4.25 - Janela Informando Quantas Simulações Não Caíram no Campo Básico de Funcionamento da Bomba Centrífuga.....   | 87 |
| 4.26 - Janela Inicial Para Realizar a Transposição dos Resultados.....   | 88 |
| 4.27 - Especificação do Nome do Arquivo das Novas Medições dos Hidrômetros Para a Realização da Transposição dos Resultados.....   | 88 |
| 4.28 - Interpolação Temporal dos Dados dos Hidrômetros a Partir da Spline Cúbica.....  | 89 |
| 4.29 - Total de Interpolações no Tempo na Leitura dos Hidrômetros.....   | 89 |
| 4.30 - Tabela de Entrada de Dados Principal.....   | 90 |
| 4.31 - Editor Gráfico Para Entrada da Instalação Hidráulica.....   | 91 |
| 4.32 - Últimos Valores a Serem Inseridos no Computador Para a Realização da Simulação.....   | 92 |
| 4.33 - Histogramas e Probabilidades Acumuladas dos Valores Medidos nos Hidrômetros de Uma Determinada Instalação Hidráulica e Que Serão Utilizados Para a Transposição dos Resultados..... | 92 |
| 4.34 - Janela Auxiliar que Permite a Escolha do Aspecto Gráfico dos Histogramas e Probabilidades Acumuladas Gerados a Partir da Leitura Detalhada dos Hidrômetros.....                     | 93 |
| 4.35 - Entrada de Dados Que Permite Alterar o Aspecto Gráfico dos Histogramas e Probabilidades Acumuladas.....   | 93 |
| 4.36 - Gráficos Obtidos Após a Simulação da Instalação Hidráulica Com o Conjunto Moto-Bomba Funcionando à Rotação Variável.....  | 94 |

|  |     |
|--|-----|
| 4.37 - Janela Informando Quantas Simulações Não Caíram no Campo Básico de Funcionamento da Bomba Centrífuga.....                       | 95  |
| 4.38 - Ícones Básicas Para a Manipulação do Editor Gráfico do Matlab na Construção da Instalação Hidráulica.....                       | 96  |
| 4.39 - Exemplo de Uma Instalação Hidráulica Construída Inteiramente no Editor Gráfico do Matlab.....                                   | 98  |
| 4.40 - Etapas Necessárias Para Desenhar um Tubo na Tela do Editor Gráfico do Matlab.....   | 99  |
| 4.41 - O Editor Gráfico do Matlab Faz a União de Dois Tubos Próximos Automaticamente.....  | 99  |
| 4.42 - União Automática de Dois Tubos Formando Um Nó Que Separa Três Novos Tubos da Instalação.....                                    | 100 |
| 4.43 - União de Dois Tubos Que o Aplicativo Não é Capaz de Executar .....  | 100 |
| 4.44 - Tipo de Concordância Que o Computador Aceita Mas Que Deve Ser Evitada.....  | 101 |
| 4.45 - Um Tubo Não Pode Ser Desenhado Isoladamente dos Demais.....   | 101 |
| 4.46 - Desenhando Uma Válvula (Bóia) de Um Consumidor na Planta da Instalação Hidráulica.....  | 102 |
| 4.47 - Desenhando Consumidores Vizinhos na Planta.....   | 102 |
| 4.48 - Rotacionando em 180 Graus Uma Bóia.....   | 103 |
| 4.49 - Válvula em Final de Linha Quando Encobre o Tubo Já Existente.....   | 103 |
| 4.50 - Rotacionando Uma Válvula em Final de Linha.....   | 103 |
| 4.51 - Limpando os Borrões de Um Desenho.....  | 104 |
| 4.52 - Desenhando a Bomba Centrífuga Sobre a Planta.....   | 104 |
| 4.53 - Deslocando a Bomba Para Uma Nova Posição.....   | 105 |
| 4.54 - Desenhando Um Cotovelo na Instalação.....   | 105 |
| 4.55 - Desenhando Um Tê.....   | 106 |
| 4.56 - Desenhando Uma Cruzeta.....   | 106 |
| 4.57 - Apagando Uma Cruzeta no Desenho.....  | 107 |
| 4.58.a - Instalação Completa.....  | 108 |
| 4.58.b - Instalação Final Após a Tentativa de se Apagar o Tubo 2 .....   | 108 |
| 4.59 - Resultado Final da Tentativa de se Apagar o Tubo 7 da Figura 4.58.b.....  | 108 |
| 4.60 - Ícone Para Entrada do Dimensionamento da Planta.....  | 109 |
| 4.61 - Janela Que Confirma o Início da Entrada de Dados.....   | 110 |
| 4.62 - Mensagem de Aviso Para Início da Entrada de Dados.....  | 110 |
| 4.63 - Entrada de Dados Para a Condição Nominal da Bomba.....  | 111 |
| 4.64 - Dimensionando Um Tubo.....  | 112 |
| 4.65 - Dimensionamento de Uma Cruzeta.....   | 112 |
| 4.66 - Dimensionamento de Um Cotovelo.....   | 113 |
| 4.67 - Tipos de Cotovelos Que o Aplicativo Possui.....   | 113 |
| 4.68- Janela de Entrada de Dados Para as Bóias dos Consumidores Quando Estiver Sendo Aplicado Diretamente o Método de Monte Carlo..... | 114 |
| 4.69 - Janela de Entrada de Dados Para as Bóias dos Consumidores Quando Estiver Sendo Aplicado a Transposição dos Resultados.....      | 115 |
| 4.70 - Finalização da Entrada de Dados.....  | 115 |

|   |     |
|---|-----|
| 4.71 - Mensagem Que Pede ao Usuário Iniciar a Especificação dos Caminhos Existentes Entre a Bomba e os Consumidores.....                              | 115 |
| 4.72 - Especificação dos Caminhos Existentes Entre os Consumidores 1, 2 e 3 e a Bomba Centrífuga.....   | 116 |
| 4.73 - Especificando o Caminho de Um Consumidor.....  | 117 |
| 4.74 - Mensagem Que Finaliza a Especificação de Um Caminho.....   | 117 |
| 4.75 - Mensagem Que Permite ao Usuário Reaproveitar ou Não Um Caminho Já Existente Para Especificar Um Novo Caminho de Um Outro Consumidor.....       | 118 |
| 4.76 - Reaproveitando Um Caminho.....   | 118 |
| 4.77 - Menu de Opção ao Especificar Um Elemento Como Um Tê ou Uma Cruzeta Durante a Especificação dos Caminhos (Entre os Consumidores e a Bomba)..... | 119 |
| 4.78 - Os Consumidores Que Já Tiverem Seu Caminho Especificado Permanecem Marcados Com Um Círculo Vermelho.....                                       | 120 |
| 4.79 - Ícone Que Possibilita Ler ou Gravar Um Desenho no Editor do Matlab V4.0.....   | 120 |
| 4.80 - Menu Inicial Para Escolher Entre: Gravar ou Ler Um Desenho.....  | 121 |
| 4.81 - Mensagem Que é Exibida na Tela, Momentos Antes, do Usuário Tentar Abrir Um Desenho Novo.....   | 121 |
| 4.82- Exemplos de Nomes de Desenhos Que Podem Ser Lidos Pelo Computador.....  | 122 |
| 4.83 - Janela Que Permite Alterar o Nome Do Arquivo Gravado.....  | 122 |
| 4.84 - Janela Que Solicita ao Usuário Que Faça a Alteração do Nome do Arquivo (a Ser Gravado) na Tela de Fundo do Matlab.....                         | 123 |
| 4.85 - Tela de Fundo do Matlab Onde é Feita a Troca do Nome a Ser Gravado.....  | 123 |
| 4.86 - Janela de Finalização do Editor Gráfico.....   | 124 |
| 4.87 - Janela Que Solicita ao Usuário Atualizar ou Não o Desenho Atual Antes de Sair Definitivamente do Editor.....                                   | 124 |

## Capítulo 5

|  |     |
|--|-----|
| 5.1 - Volumes Acumulados Fictícios de 20 Consumidores Para a Realização do Teste de Verificação da Transposição dos Resultados Aplicada ao Método de Monte Carlo.....                  | 127 |
| 5.2 - Esquema Ilustrativo da Instalação Hidráulica Fictícia Empregada no Teste da Transposição dos Resultados.....   | 128 |
| 5.3 - Dados Auxiliares da Instalação Hidráulica Para a Realização da Simulação de Monte Carlo.....   | 129 |
| 5.4 - Resultado Gráfico Obtido Para a Instalação Fictícia da Figura 5.2 Através da Aplicação Direta do Método de Monte Carlo.....  | 130 |
| 5.5 - Histogramas e Probabilidades Acumuladas da Matriz Variância-Covariância Unitária Gerada a Partir dos Volumes Acumulados dos 20 Consumidores Fictícios das Figuras 5.1 e 5.2..... | 131 |

|  |     |
|--|-----|
| 5.6 - Resultados da Simulação de Monte Carlo Obtidos Através da Transposição dos Resultados.....   | 133 |
| 5.7 - Esquema Ilustrativo da Instalação Hidráulica de Abastecimento de Água Potável do Bairro Vista Verde (Itajubá/MG).....  | 134 |
| 5.8 - Histogramas e Probabilidades Acumuladas da Matriz Variância-Covariância Unitária Gerada a Partir da Leitura de Um Dia (dos Hidrômetros) de 15 Casas do Bairro Vista Verde..... | 135 |
| 5.9 - Dados Auxiliares Para a Realização da Simulação da Rede Hidráulica do Bairro Vista Verde.....  | 136 |
| 5.10 - Resultados da Simulação do Bairro Vista Verde (30 estados).....   | 136 |
| 5.11 - Resultados da Simulação do Bairro Vista Verde (50 estados).....   | 136 |

## Apêndice A

|   |     |
|---|-----|
| A.1 - A Rugosidade Relativa de Uma Tubulação é Expressa Pela Relação $\left(\frac{\varepsilon}{d}\right)$ ..... | 146 |
| A.2 - Representação gráfica de uma tubulação de seção circular de diâmetro (d) e comprimento (L).....           | 148 |
| A.3 - Conceito de Comprimento Equivalente aplicado ao tê.....   | 149 |
| A.4 - Exemplo de Cálculo de Perda de Carga em uma Tubulação.....  | 151 |

## Apêndice B

|   |     |
|---|-----|
| B.1 - Esboço das Ruas do Sistema de Abastecimento de Água Potável do Bairro Vista Verde (Itajubá/MG) .....  | 157 |
| B.2 - Planta Hidráulica do Sistema de Abastecimento de Água Potável do Bairro Vista Verde (Itajubá/MG).....   | 158 |
| B.3 - Esboço das Ruas e Planta Hidráulica do Sistema de Abastecimento de Água Potável do Bairro Vista Verde (Itajubá/MG) .....                        | 159 |
| B.4 - Diagrama Colina da Bomba Centrífuga Utilizada no Bairro Vista Verde (Itajubá/MG) e Que Foi Interpolado Por Redes Neurais Nesta Dissertação..... | 162 |
| B.5 - Diagrama de Moody Que é Utilizado Para a Determinação do Fator de Atrito $f$ e Que Foi Interpolado Por Redes Neurais Nesta Dissertação.....     | 163 |

## Apêndice C

|  |     |
|--|-----|
| D.1 – Exemplo Geométrico Simples para Ilustrar o Fato de que o <i>Supremo</i> de uma Função $y = f(x)$ Nem Sempre é o Seu Máximo ..... | 165 |
| D.2 – Função tangente hiperbólica .....  | 169 |
| D.3 – Função logística .....   | 169 |

# Índice de Tabelas

## Capítulo 1

|   |   |
|---|---|
| 1.1 - Instalação de Bombeamento da COPASA de Alguns Bairros de Itajubá..... | 2 |
| 1.2 - Dados Nominais do Fabricante do Conjunto Moto-Bomba.....              | 4 |
| 1.3 - Dados do Conjunto Moto-Bomba Que Foi Adquirido.....                   | 7 |

## Capítulo 2

|  |    |
|--|----|
| 2.1- Conjunto de Amostras Temporais dos Elementos Que Serão Envolvidos na Simulação..... | 11 |
| 2.2 - Valores de Vazão Média dos n Consumidores.....                                     | 17 |

## Capítulo 5

|   |     |
|---|-----|
| 5.1 - Vazões Médias Fictícias dos Consumidores da Figura 5.2. A Unidade de Medida é Dada em [Litros/Segundo].....           | 128 |
| 5.2 - Tabela de Valores Obtidos Para Várias Simulações Distintas.....   | 130 |
| 5.3 - Tabela de Valores Obtidos Para Várias Simulações Distintas Utilizando-se a Transposição dos Resultados.....           | 133 |
| 5.4 - Apresentação dos Resultados Para 4 Testes Distintos do Aplicativo EFENPROCEL V1.0 Aplicado ao Bairro Vista Verde..... | 137 |

## Apêndice A

|  |     |
|--|-----|
| A.1 - Valores da Rugosidade Equivalente ( $\epsilon$ ).....            | 147 |
| A.2 - Comprimentos Equivalentes em Perdas Localizadas (em Metros)..... | 150 |

## Apêndice B

|   |     |
|---|-----|
| B.1 - Valores Lidos nos Hidrômetros em $m^3$ de 15 Residências do Bairro Vista Verde (5/09/1996).....   | 153 |
| B.2 - Numeração dos Consumidores (Residências) Representados na Figura B.1 e Seus Respectivos Valores de Vazão Mensal e Elevação em Relação a Bomba Centrífuga..... | 160 |

## Simbologia

### Caracteres Latinos

|                             |   |
|-----------------------------|---|
| A                           | Área da seção transversal da tubulação, [m <sup>2</sup> ]   |
| D                           | Diâmetro da tubulação, [m]  |
| d                           | Diâmetro da tubulação, [m]  |
| E <sub>i</sub>              | Energia hidráulica total da bomba centrífuga operando na rotação n <sub>i</sub> , [J]                         |
| f                           | Fator de atrito, [-]  |
| f(s)                        | Função de transferência dos neurônios da rede Backpropagation, [-]  |
| g                           | Aceleração da gravidade, [m/s <sup>2</sup> ]  |
| H                           | Pressão média total na saída da bomba, [m]  |
| H <sub>b</sub>              | Pressão média total na saída da bomba, [m]  |
| H <sub>bi</sub>             | Pressão média total da bomba na rotação n <sub>i</sub> , [m]  |
| H <sub>ci</sub>             | Pressão de fornecimento no i-ésimo consumidor, [m]  |
| H <sub>ci<sub>k</sub></sub> | Pressão de fornecimento no i-ésimo consumidor quando a bomba estiver operando na rotação n <sub>k</sub> , [m] |
| L                           | Conjunto de todos os tubos e elementos de singularidade que interliga a bomba e o i-ésimo consumidor, [-]     |
| n ou n <sub>i</sub>         | Rotação da bomba centrífuga, [rpm]  |
| n <sub>qa</sub>             | Rotação específica das máquinas de fluxo, [-]   |
| n <sub>s</sub>              | Rotação específica das máquinas de fluxo, [-]   |
| P <sub>el</sub>             | Potência elétrica, [w]  |
| P <sub>eli</sub>            | Potência elétrica da bomba centrífuga operando na rotação n <sub>i</sub> , [w]                                |
| P <sub>h</sub>              | Potência hidráulica, [w]  |
| $\bar{P}_{hi}$              | Potência hidráulica média da bomba centrífuga operando na rotação n <sub>i</sub> , [w]                        |
| P <sub>hik</sub>            | Potência hidráulica da bomba centrífuga operando na rotação n <sub>i</sub> da k-ésima simulação, [w]          |
| p <sub>i</sub>              | Perda de carga do elemento i da instalação hidráulica, [m]  |
| Q <sub>bi</sub>             | Vazão da bomba centrífuga na rotação n <sub>i</sub> , [m <sup>3</sup> /s]                                     |
| Q <sub>i</sub> (t)          | Vazão média do i-ésimo consumidor no instante t, [m <sup>3</sup> /s]  |
| Q <sub>ki</sub>             | Vazão média do i-ésimo consumidor no instante k, [m <sup>3</sup> /s]  |
| $\bar{Q}_i$                 | Médias das vazões médias do consumidor i, [m <sup>3</sup> /s]   |
| Q <sub>b</sub>              | Vazão da bomba centrífuga, [m <sup>3</sup> /s]  |
| Re                          | Número de Reynolds, [-]   |
| t <sub>i</sub>              | Tempo total de operação da bomba centrífuga operando na rotação n <sub>i</sub> , [s]                          |
| VA                          | Volume Acumulado, [m <sup>3</sup> ]   |
| v                           | Velocidade do escoamento na tubulação, [m/s]  |
| Z                           | Vetor de n variáveis aleatórias de normais padronizadas independentes, [-]                                    |
| Z <sub>i</sub>              | Nível de elevação existente entre a bomba e o i-ésimo consumidor da instalação hidráulica, [m]                |
| W                           | Vetor dos pesos das conexões da Rede Backpropagation, [-]   |

Y Matriz Y, [-]  
Y' Matriz transposta de Y, [-]

### Caracteres Gregos

$\Delta H$  Perda de carga, [m]  
 $\varepsilon$  Rugosidade equivalente, [mm]  
( $\varepsilon/d$ ) Rugosidade relativa, [-]  
 $\eta_t$  Rendimento total do conjunto motor-bomba, [%]  
 $\mu$  Viscosidade absoluta, [kg/m.s]  
 $\mu_x$  Vetor média da matriz X  
 $\nu$  Viscosidade cinemática, [m<sup>2</sup>/s]  
 $\rho$  Massa específica da água na temperatura ambiente, [kg/m<sup>3</sup>]  
 $\sigma_{ij}$  Covariância do consumidor i em relação ao consumidor j  
•<sup>2</sup>  
 $\sigma$  Vetor dos elementos da diagonal principal da matriz Variância-Covariância Unitária  
•  
 $\sigma_{ij}$  Vetor dos elementos ou abaixo ou acima da diagonal principal da matriz Variância-Covariância Unitária  
 $\Sigma_x$  Matriz Variância-Covariância da matriz X  
•  
 $\Sigma_x$  Matriz Variância-Covariância Unitária da matriz X

## Resumo

O balanço energético de um conjunto moto-bomba na presença do inversor de frequência é o tema principal desta Dissertação de Mestrado. Dessa forma, um simulador (software) foi desenvolvido para realização desta tarefa.

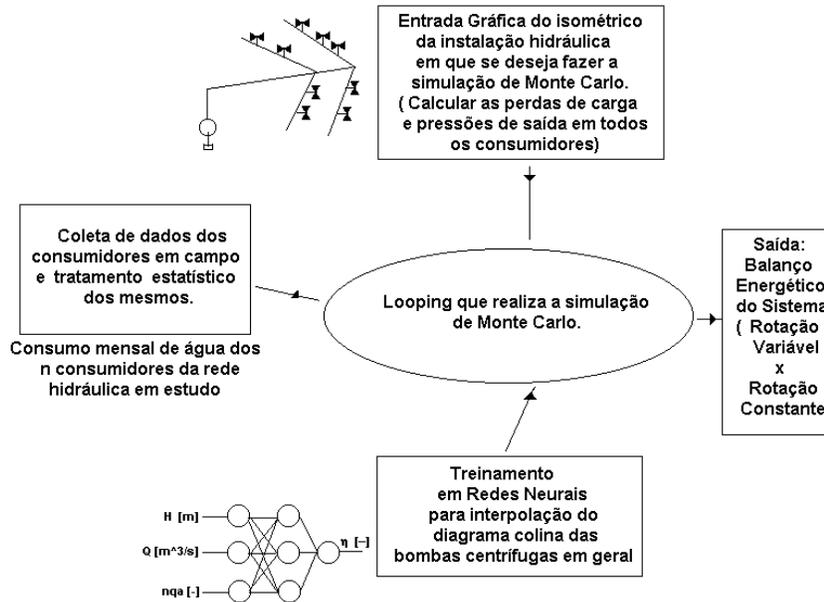
Esse software considera, durante a simulação do sistema, tanto as características de funcionamento do conjunto moto-bomba, como também, as características físicas e geométricas da instalação hidráulica em que esse conjunto estará atuando.

As instalações de abastecimento de água potável por bombeamento, existentes nas cidades para o abastecimento das residências, são referidas neste trabalho.

Deste modo, dadas as características de funcionamento do conjunto moto-bomba (diagrama colina), as características física e geométrica da rede hidráulica (isométrico da instalação) e o consumo mensal de água potável das residências beneficiadas por essa rede, então, o balanço energético do sistema (na presença do inversor de frequência) poderá ser realizado.

As ferramentas matemáticas utilizadas nessa Dissertação foram as combinações do método de simulação de Monte Carlo e das Redes Neurais Artificiais. A Figura 1 ilustra didaticamente os princípios básicos de funcionamento do simulador aqui desenvolvido. Como pode ser observado nesta Figura, um editor gráfico permite a entrada do isométrico da rede hidráulica. Por outro lado, a Rede Neural foi utilizada para prever o comportamento do conjunto moto-bomba através da interpolação do diagrama colina.

Medidas hidrométricas foram realizadas em campo, e, desta forma, foi possível armazenar no computador o comportamento estatístico dos consumidores de água potável. Assim sendo, o método da Transposição dos Resultados permitirá prever o comportamento do consumo de água (de qualquer outra instalação hidráulica) sem a necessidade de novas medições hidrométricas. Deste modo, o computador estará apto a aplicar o método de Monte Carlo, para a realização do balanço energético do sistema, para qualquer outra instalação hidráulica além daquela ensaiada nesta Dissertação.



**Figura 1 - Esquema Simplificado do Simulador Desenvolvido Nessa Dissertação de Mestrado.**

Finalmente, a seguir serão explicados (resumidamente) os capítulos que compõem esta Dissertação:

**Capítulo 1** - Descrição da Instalação Hidráulica Vista Verde (Itajubá/ MG) que possibilitou serem levantados os dados experimentais utilizados nesse trabalho.

**Capítulo 2** - Apresentação do modelo matemático utilizando a técnica de Monte Carlo aplicada aos sistemas de saneamento básico.

**Capítulo 3** - Teoria da Rede Neural empregada para prever o campo básico de funcionamento do conjunto moto-bomba.

**Capítulo 4** - Manual de utilização do software desenvolvido nessa Dissertação.

**Capítulo 5** - Primeiros testes e resultados obtidos pelo simulador no Bairro Vista Verde (Itajubá/MG).

**Capítulo 6** - Conclusões desse trabalho.

**Apêndice A** - Metodologia empregada, para determinação da perda de carga, nas redes hidráulicas de abastecimento de água potável.

**Apêndice B** - Tabelas e gráficos experimentais obtidos em campo ou em laboratório.

**Apêndice C** - Uma descrição matemática para os aproximadores universais de funções.

**Apêndice D** - Uma sucinta revisão bibliográfica sobre todas as referências utilizadas nesta Dissertação.

## Abstract

The energetic balance of motor pump set in the presence of an inverter of frequency is the main theme of this master's dissertation. A simulator (software) was developed to accomplish of this task.

This software considers not only the characteristics of the operation of the motor pump set, but also the physical and geometric characteristics of the hydraulic facility in which this set will be operating during the simulation of the system.

Drinking water pumping facilities for the supply of homes which exists in cities are the ones mentioned in this work.

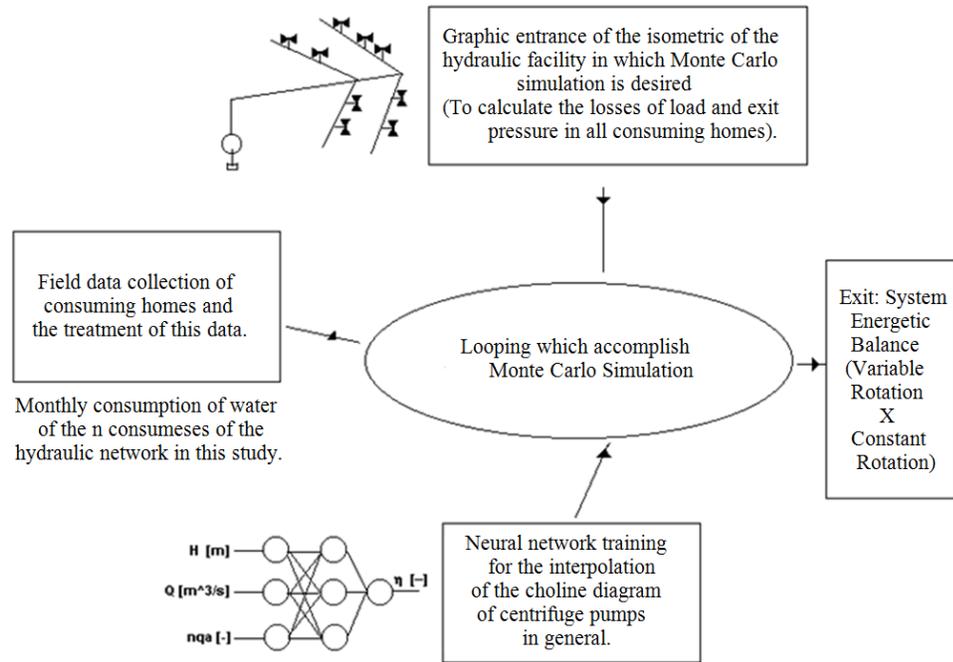
Thus, given the characteristics of the operation of the motor pump set (choline diagram) and the physical and geometric characteristics of the hydraulic network (isometric of the facility) and the monthly consumption of potable water in homes benefited by this network, so the energetic balance of the system (in the presence of the inverter of frequency) can be accomplished.

The mathematic tools used in this dissertation were the combinations of Monte Carlo method and Artificial Neural Networks. Figure 1 illustrates didactically the basic principles of the operation of the simulator developed here.

As it can be seen in this figure, a graphic editor allows the hydraulic network of the isometric entrance. By the other hand, the Neural Network was used to foresee the behavior of the motor pump set through the choline diagram interpolation.

Hydrometric measures were accomplished in field, and thus, it was possible to store the statistical behavior of the consumers of potable water on the computer. Therefore, the method of Transposition of Results will allow us to foresee the behavior of the water consumption (from any other hydraulic installation) without the need of new hydrometric measures.

Thus, the computer will be able to apply the Monte Carlo method to accomplish the energetic balance of the system for any other hydraulic installation besides the one analyzed in this Dissertation.



**Figure 1 -Simplified Scheme of the Simulator Developed on this master's dissertation.**

Finally, the chapters that compose this work are briefly explained as follows:

**Chapter 1:** Description of Vista Verde Hydraulic Facility (MG), which enabled the experimental data collection used in this work.

**Chapter 2:** Presentation of the mathematic model which uses the Monte Carlo technique applied to sanitation systems.

**Chapter 3:** Theory of the Neural Network used to foresee the basic field of the motor bomb set operation.

**Chapter 4:** Handbook of the software developed on this Dissertation.

**Chapter 5:** First tests and obtained results by the simulator in Vista Verde village (Itajubá/MG).

**Chapter 6:** Conclusions of this work.

**Appendix A:** Used methodology for the determination of loss of load in the hydraulic networks of potable water supplying.

**Appendix B:** Tables and experimental graphics obtained in field or in laboratory.

**Appendix C** - Mathematical description of the universal approximators of functions.

**Appendix D** - A Succinct bibliographic revision about all references used in this Dissertation.

# Capítulo 1

## Descrição da Instalação Hidráulica

### 1.1) Introdução

A descrição detalhada da instalação do conjunto moto-bomba, utilizada no bombeamento de água potável do bairro Vista Verde em Itajubá/MG, bem como do sistema (consumidores de água potável deste bairro) são descritos neste capítulo.

A razão disso justifica-se pelo fato de que o modelo matemático e computacional, a ser apresentado e desenvolvido no Capítulo 2 para a simulação do sistema de bombeamento à rotação variável, baseia-se também em alguns dados experimentais obtidos a partir da coleta de dados desta instalação em particular.

Desta forma, o conhecimento do diagrama colina do conjunto moto-bomba, a leitura dos hidrômetros dos consumidores de água potável desta instalação (residências do bairro) durante um determinado período do dia (das 8:00 até 18:00 horas), o consumo médio mensal de água dos consumidores e a planta da instalação hidráulica em questão foram utilizados e incorporados à simulação computacional que será apresentada no Capítulo 5.

Assim sendo, a descrição da sala onde estão instaladas as bombas, a localização dos consumidores de água (residências do bairro Vista Verde) e da caixa d'água são descritos neste capítulo.

A empresa de distribuição de água potável em Itajubá/MG é a COPASA e esta permitiu a realização de coletas de dados e ensaios sobre suas instalações hidráulicas.

É importante observar que a instalação hidráulica em questão é descrita em detalhes uma vez que bombas semelhantes foram adquiridas pelo laboratório hidráulico da EFEI, pois isto demonstrou-se necessário durante o decorrer das pesquisas.

## 1.2) Visita Técnica às Instalações da COPASA e Escolha da Instalação de Bombeamento Mais Adequada na Cidade de Itajubá/MG

### 1.2.1) Visita Técnica às Instalações da COPASA

A visita técnica às instalações de bombeamento de água potável da COPASA em Itajubá / MG foi realizada com o objetivo básico de analisar os tipos e as potências das instalações atualmente em uso. A Tabela 1.1 mostra as instalações de bombeamento acima de 10 [cv] de alguns bairros de Itajubá, e seus tipos de distribuição.

**Tabela 1.1 - Instalação de Bombeamento da COPASA de Alguns Bairros de Itajubá.**

| <b>Bairro</b>      | <b>Potência</b> | <b>Instalação</b> | <b>Distribuição</b> |
|--------------------|-----------------|-------------------|---------------------|
| Jardim das Colinas | 50 cv           | Elevatória        | Virgem              |
| Santo Antônio      | 40 cv           | Elevatória        | Virgem              |
| Novo Horizonte     | 20 cv           | Elevatória        | Virgem              |
| Vista Verde        | 15 cv           | Elevatória        | Em Marcha           |
| Rebourgeon         | 15 cv           | Elevatória        | Virgem              |
| Jardim América     | 10 cv           | Booster           | Virgem              |

\*Elevatória com distribuição virgem - Somente por gravidade

\*\*Elevatória com distribuição em marcha - Com bomba ou por gravidade

\*\*\* Booster - Reforço na linha através de bomba

### 1.2.2) Escolha da Instalação de Bombeamento Mais Adequada

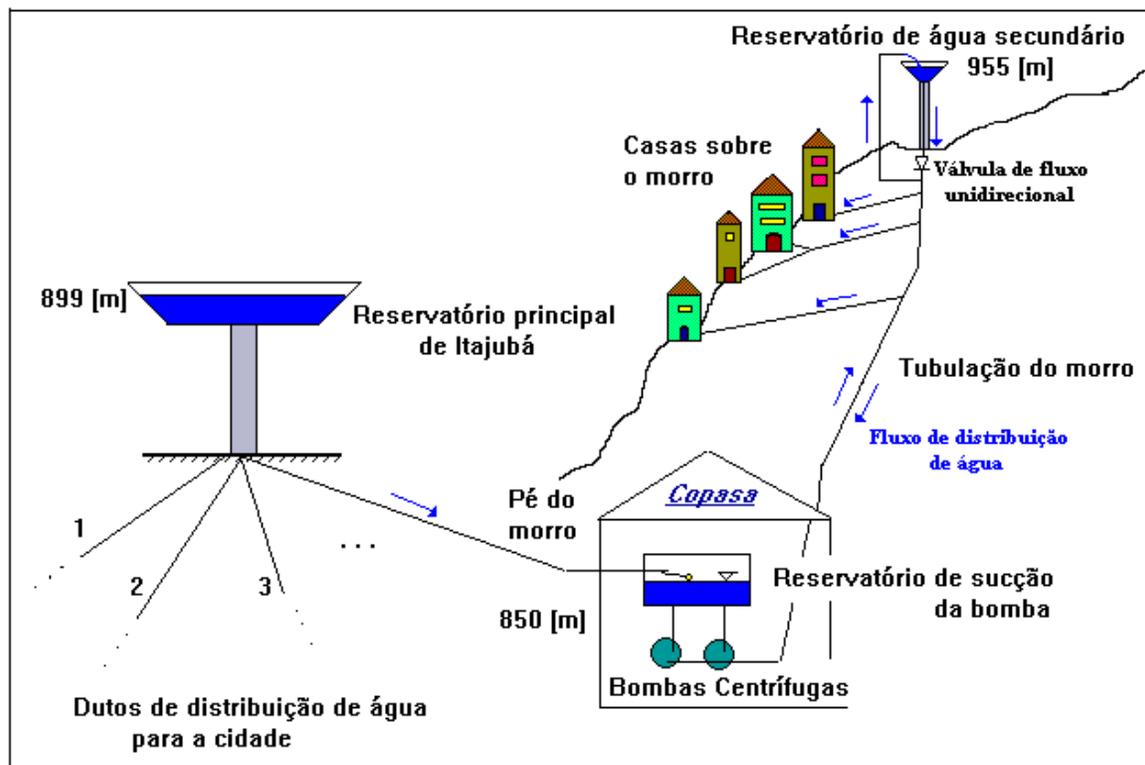
As instalações foram analisadas, optando-se por aquela do Bairro Vista Verde.

#### Descrição da Instalação

A instalação escolhida é do tipo estação elevatória em marcha. O reservatório principal da cidade, que se encontra em uma cota de altitude 899 [m], alimenta por gravidade o reservatório de sucção da bomba na cota de 850 [m]. A Figura 1.1 mostra um croqui da estação elevatória Vista Verde.

A casa de máquinas possui dois conjuntos moto-bombas de potência 15 [cv], sendo que sempre um deles está funcionando ou prestes a funcionar e o outro fica de reserva. A COPASA adota como rodízio, para utilização de cada conjunto, o tempo de uma semana.

O reservatório de sucção ou de alimentação das bombas possui uma válvula bóia para controle de seu nível. As bombas são instaladas abaixo do nível do reservatório, o que caracteriza serem afogadas, muito comum neste tipo de instalação. Na linha de sucção de cada bomba, de diâmetro 4", está instalada uma válvula gaveta que permanece aberta no conjunto que está em operação e fechada no de reserva. No caso da linha de recalque, de diâmetro 3", cada bomba em sua saída possui uma válvula gaveta, que permanece sempre aberta.



**Figura 1.1 - Estação Elevatória do Bairro Vista Verde.**

Um pouco acima da saída, estão instalados um manômetro tipo Bourdon e um pressostato que desliga o conjunto quando a pressão atinge  $12 \text{ [kgf/cm}^2\text{]}$ .

A bomba alimenta a linha principal do bairro, no sentido de seu reservatório na cota 955 [m]. Nesse sentido, existe a distribuição para os consumidores. A linha possui um “by pass” que alimenta o reservatório e uma válvula unidirecional que atende, no retorno, os consumidores por gravidade.

A bomba liga novamente através de um controle por “timer”, instalado no painel elétrico, duas horas após o desligamento. Em situações críticas de consumo de água, quando o tempo de duas horas for excessivo, a bomba é ligada manualmente por um operador solicitado pela população. A Tabela 1.2 apresenta dados da bomba e do motor de acionamento.

**Tabela 1.2 - Dados Nominais do Fabricante do Conjunto Moto-Bomba.**

| <b>Motor</b>        |            | <b>Bomba</b>       |                            |
|---------------------|------------|--------------------|----------------------------|
| Tipo                | Gaiola     | Tipo               | Centrífuga                 |
| Carcaça             | Monobloco  | Carcaça            | Difusora                   |
| Quantidade          | 02         | Quantidade         | 02                         |
| Tensão              | 220 [V]    | Altura             | 113,4 [m]                  |
| Corrente            | 38 [A]     | Vazão              | 15,73 [m <sup>3</sup> / h] |
| Proteção/Isolamento | IP-54/13   | Número de Estágios | 04                         |
| Rotação             | 3500 [rpm] | Rotação            | 3500 [rpm]                 |
| Potência            | 15 [cv]    | Potência           | 15 [cv]                    |
| Fabricante          | WEG        | Fabricante         | MARK- PEERLESS             |

#### Justificativa da Escolha da Instalação

Os motivos que levaram a escolha desta instalação são os seguintes:

- Distribuição em Marcha - Como esse tipo de distribuição ocorre tanto no recalque da bomba para o reservatório elevado, como também após o desligamento do conjunto, por gravidade, achou-se por bem abordar este caso, mais complexo do que os outros, no estudo da efficientização energética.

- Consumo maior de energia elétrica - No caso desta instalação, a bomba desliga através de um pressostato colocado na saída da mesma quando a pressão atinge 12

$[\text{kgf} / \text{cm}^2]$ , que corresponde ao reservatório superior estar na cota máxima, e volta a ligar duas horas depois através de um timer colocado no painel de comando. Nesta situação, a bomba operará com vazão maior e com altura de elevação menor devido ao consumo de água, o que representa um consumo maior de energia elétrica, visto que as bombas centrífugas consomem mais quando operam com maior vazão.

- Potência pequena - Como o conjunto possui uma potência de 15 [cv], o custo dos equipamentos a serem adquiridos para essa pesquisa serão menores, além do que serão facilitados os testes em laboratórios.

- Consumo de água pequeno - Como se trata de um trabalho piloto, o bairro escolhido possui um consumo menor de água em relação a outros, que proporcionará aquisição de dados mais consistentes e serão transpostos para outras instalações maiores. No caso do bairro Vista Verde o consumo mensal é de 1620  $[\text{m}^3]$ , atendendo 85 residências.

Finalizando a descrição desta instalação hidráulica, existem 78 casas espelhadas sobre o morro onde encontra-se o Bairro Vista Verde. Como será visto no Capítulo 2 a leitura dos hidrômetros, das residências que são abastecidas pelo sistema de bombeamento, será necessária. Como o número de casas é relativamente pequeno, então isto facilitará as coletas de dados.

### **1.2.3) Reuniões no LHPCH e no Laboratório de Eletrônica Para Definições Básicas do Sistema a Ser Montado nas Instalações do LHPCH**

Em várias reuniões realizadas pelos professores da EFEI foram decididos os locais dos testes de laboratório e os tipos de testes a serem realizados.

## Local dos Testes e Tipos de Testes

- Laboratório Hidromecânico para Pequenas Centrais Hidráulicas-LHPCH.

Neste laboratório haverá necessidade de adaptação de uma bancada já existente, para os testes a serem realizados, que são:

- levantamento das curvas características da bomba para várias rotações;
- levantamento das curvas características do motor para várias rotações;
- testes do conjunto motor, bomba e inversor de frequência de 15 [CV].

### **1.2.4) Especificações da Bomba e dos Motores Para Seu Acionamento**

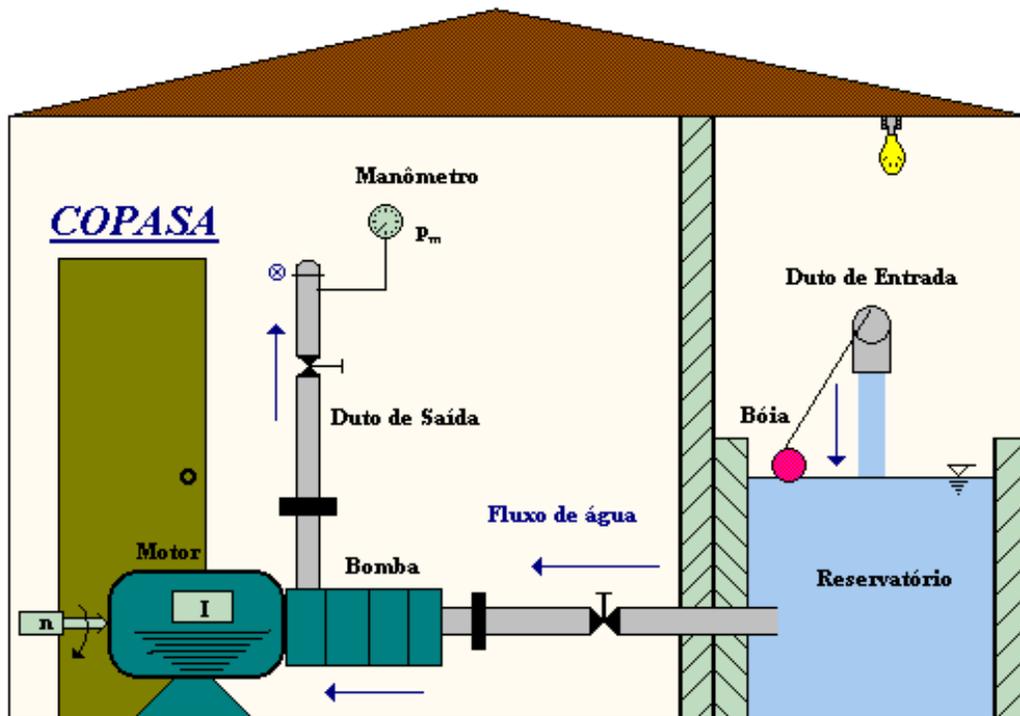
Para os testes de laboratórios, será necessária a aquisição da bomba e a do motor de acionamento iguais aqueles da estação elevatória do bairro Vista Verda, com apenas uma diferença em relação a montagem do conjunto já existente, ou seja, com execução mancal, em vez de monobloco. Isto porque o teste de laboratório, levantamento das curvas características da bomba a rotação variável, será obtido através do acoplamento de um freio eletrodinamométrico na ponta do eixo da mesma. Os dados do conjunto moto-bomba, que foram adquiridos no projeto, são descritos na Tabela 1.3.

### **1.2.5) Esquema Ilustrativo da Instalação.**

A Figura 1.2 mostra o esquema de uma das bombas de quatro estágios no interior da casa de máquinas da estação elevatória. A bomba afogada succiona água do reservatório e recalca para a linha principal de distribuição, onde, na saída da bomba, está instalada uma válvula gaveta que permanece sempre aberta e um manômetro de Bourdon para leitura da pressão de saída. O motor que aciona a bomba é do tipo monobloco.

**Tabela 1.3 - Dados do Conjunto Moto-Bomba que Foi Adquirido.**

| Motor               |             | Bomba               |                           |
|---------------------|-------------|---------------------|---------------------------|
| Tipo                | Indução     | Tipo                | Centrífuga                |
| Fabricante          | WEG         | Fabricante          | Mark-Peerless             |
| Modelo              | 04901       | Modelo              | HUP4                      |
| Carcaça             | 132 M       | Carcaça (Mat.)      | Ferro Fundido             |
| Rotor               | Gaiola      | Rotor (Mat.)        | Latão                     |
| Polaridade          | 2           | Eixo (ponta)        | Inóx 420                  |
| Temperatura (Amb.)  | 40 [°C]     | Número de Estágios  | 04                        |
| Temperatura (Elev.) | 80 [°C]     | Execução (Montagem) | Mancal                    |
| Tensão              | 220/380 [v] | Altura              | 1134 [m]                  |
| Corrente            | 38/22 [A]   | Vazão               | 15,73 [m <sup>3</sup> /h] |
| Rendimento          | 85 [%]      | Rendimento          | 56 [%]                    |
| Rotação             | 3500 [rpm]  | Rotação             | 3500 [rpm]                |
| Potência            | 15 [cv]     | Potência            | 15 [cv]                   |
| Reg. Serviço        | 2           | NPSH (Req.)         | 4,5 [m]                   |
| Fator de Serviço    | 1,15        | NPSH (Disp.)        | 9,39 [m]                  |
| Classe Isol.        | B           | Diâmetro (Rotor)    | 140 [mm]                  |
| Corrente (Partida)  | 331/191 [A] | Diâmetro (Sucção)   | 1 1/2''                   |
| Escorregamento      | 2,78 [%]    | Diâmetro (Recalque) | 1''                       |



**Figura 1.2 -Casa de Máquinas da Estação Elevatória Vista Verde.**

### **1.3) Comentários Finais**

Com a descrição detalhada da instalação de bombeamento do bairro Vista Verde fica mais claro compreender as tabelas e os gráficos obtidos em ensaio de laboratório e medições de campo.

No laboratório da EFEI foi obtido, através de ensaios, o diagrama colina de uma bomba semelhante à utilizada neste bairro. O diagrama Colina é um gráfico que descreve o campo básico de funcionamento das Máquinas de Fluxo em geral.

Em campo, foi realizada a leitura detalhada dos hidrômetros de todas as residências do bairro Vista Verde. Essas leituras como também o Diagrama Colina da bomba podem ser vistos no Apêndice B desta Dissertação.

Desta forma, conhecidos os dados experimentais mencionados acima e a instalação hidráulica em estudo, será possível utilizá-los em um modelo computacional de simulação de um sistema de bombeamento funcionando à rotação variável. Isto será o próximo assunto a ser abordado no Capítulo 2 desta Dissertação.

## Capítulo 2

### Modelo Matemático da Simulação

#### 2.1) Introdução

Este capítulo pretende apresentar um modelo de simulação computacional para prever o comportamento de um sistema de abastecimento de água potável com bombeamento. O objetivo maior deste trabalho será estimar a potência elétrica requerida por tal sistema e, desta forma, desenvolver uma metodologia de controle para minimizar o consumo de energia elétrica da rede.

Em um sistema de abastecimento de água com  $n$  consumidores, sabe-se que o consumo de água é realizado de forma aleatória e portanto não-determinística. Por exemplo, é impossível prever com exatidão quando, quantas vezes e por quanto tempo cada consumidor irá necessitar de água potável.

Apesar disto, a rede de abastecimento d'água poderá apresentar alguns comportamentos previsíveis, mesmo que estes sejam bastante incertos. Sabe-se que de madrugada o consumo de água é mínimo e no período da noite, por exemplo das 19:00 às 21 horas, o consumo se eleva, pois é o horário preferido, entre a maioria das pessoas, para a utilização do chuveiro.

Métodos estatísticos de simulação de sistemas poderão se adaptar muito bem ao problema descrito e, por isso, foram os escolhidos para serem aplicados neste trabalho.

Inicialmente, será apresentado o modelo de simulação de Monte Carlo para prever o funcionamento da rede a partir da coleta realizada em campo de alguns dados dos consumidores. Feito isto, dois algoritmos computacionais, para analisar a potência elétrica consumida pelo sistema a partir dos resultados obtidos, serão apresentados: o primeiro para ser aplicado ao sistema de bombeamento quando a bomba estiver funcionando à rotação constante e o outro para o caso de rotação variável.

O método de Monte Carlo caracteriza-se pelo elevado número de simulações computacionais para a obtenção de resultados estatísticos. Nestas condições poder-se-á

descobrir que tipo de função densidade de probabilidade (fdp) poderá descrever mais adequadamente o comportamento dos parâmetros do sistema em estudo.

A fdp gerada será de grande utilidade, pois será o ponto central da segunda parte deste trabalho, ou seja, a partir desta distribuição e de um procedimento estatístico será possível estender este modelo para outros sistemas de bombeamento, sem a necessidade de realizar novas coletas de dados.

Neste ponto, é importante observar que enquanto modelos matemáticos convencionais e determinísticos procuram “resolver de forma exata problemas aproximados”, os métodos de simulações tentam “resolver de forma aproximada problemas mais reais” e com isto tentar obter resultados mais condizentes com a realidade.

No final deste capítulo será apresentado um modelo simplificado que poderá ser utilizado futuramente para comparação ao modelo de Monte Carlo apresentado nesta Dissertação.

Desta forma, realizado um extenso trabalho em laboratório tanto em termos de programação e simulação como também da coleta de dados no campo, poder-se-á empregar o modelo obtido para qualquer outro sistema de abastecimento d’água potável sem mais a necessidade de grandes esforços.

## **2.2) Simulação Pelo Método de Monte Carlo Para Diagnóstico do Sistema**

### **2.2.1) Desenvolvimento Teórico**

Nesta seção será desenvolvida a metodologia matemática necessária para realizar a simulação de Monte Carlo. Para que isso seja possível, inicialmente deve-se ter um conjunto de amostras temporais dos elementos envolvidos na simulação. Desta forma, para um conjunto de  $n$  elementos com  $m$  amostras temporais em cada elemento, pode-se formar a seguinte tabela inicial de dados.

**Tabela 2.1- Conjunto de Amostras Temporais dos Elementos Que Serão Envolvidos na Simulação.**

|            | Elemento 1 | Elemento 2 | Elemento 3 | ... | Elemento n |
|------------|------------|------------|------------|-----|------------|
| Instante 1 | $x_{11}$   | $x_{12}$   | $x_{13}$   | ... | $x_{1n}$   |
| Instante 2 | $x_{21}$   | $x_{22}$   | $x_{23}$   | ... | $x_{2n}$   |
| .          | .          | .          | .          | ... | .          |
| .          | .          | .          | .          | ... | .          |
| .          | .          | .          | .          | ... | .          |
| Instante m | $x_{m1}$   | $x_{m2}$   | $x_{m3}$   | ... | $x_{mn}$   |

De posse das amostras da Tabela 2.1 deve-se obter o vetor das médias ( $\mu_x$ ) dos n elementos e a matriz variância-covariância  $\Sigma_x$  das amostras. Estas expressões são dadas respectivamente por :

$$\mu_x = \begin{bmatrix} \frac{x_{11} + x_{21} + \dots + x_{m1}}{m} \\ \frac{x_{12} + x_{22} + \dots + x_{m2}}{m} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \frac{x_{1n} + x_{2n} + \dots + x_{mn}}{m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ x_n \end{bmatrix} \quad (2.1.a)$$

$$\Sigma_x = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \dots & \sigma_{1n} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \dots & \sigma_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \sigma_{n1} & \sigma_{n2} & \dots & \sigma_{nn} \end{bmatrix} \quad (2.1.b)$$

Para  $\sigma_{ij} = \frac{1}{m-1} \cdot \sum_{k=1}^m (x_{k,i} - x_i) \cdot (x_{k,j} - x_j)$ , onde  $i = 1, 2, \dots, n$   
 $j = 1, 2, \dots, n$

### 2.2.1.1) O Método de Monte Carlo

A seguir será apresentado o modelo teórico, propriamente dito, do método de Monte Carlo a ser empregado para a simulação do comportamento do sistema. Assim, de posse de  $\mu_x$  e  $\Sigma_x$  pode-se prever, pelo método de Monte Carlo, o comportamento de cada elemento bem como do conjunto desses. Para que as variâncias e covariâncias sejam respeitadas, é necessário um procedimento conforme descrito a seguir.

Seja  $\mathbf{W}$  o vetor das variáveis aleatórias que representa o comportamento dos  $n$  elementos do conjunto em um determinado instante, porém, para o caso particular no qual  $\Sigma_x = \Sigma_w$  e  $\mu_w=0$  (vetor nulo), ou seja, variáveis centradas em zero. É possível escrever a expressão (2.2), onde  $\mathbf{Z}$  é um vetor de  $n$  variáveis aleatórias de normais padronizadas independentes (normais padronizadas são aquelas que possuem média zero e desvio padrão igual a 1), e  $\mathbf{Y}$  uma matriz cujos elementos ( $y_{ij}$ ) devem ser calculados para que a identidade (2.2) seja válida.

$$\mathbf{W} = \mathbf{Y} \cdot \mathbf{Z} \quad (2.2)$$

Daí, pode-se provar que a matriz variância-covariância de  $\mathbf{W}$  ( $\Sigma_w$ ) é dada pela propriedade (2.3), em que  $\Sigma_z$  é a matriz variância-covariância de  $\mathbf{Z}$ .

$$\Sigma_w = \mathbf{Y} \cdot \Sigma_z \cdot \mathbf{Y}' \quad \text{onde, } \mathbf{Y}' \text{ denota a matriz transposta de } \mathbf{Y} \quad (2.3)$$

A matriz  $\Sigma_z$  é a própria matriz identidade de ordem  $n \times n$  uma vez que ela pertence a uma amostra de  $n$  normais padronizadas independentes. Assim,

$$\Sigma_w = \mathbf{Y} \cdot \mathbf{Y}' = \Sigma_x \quad (2.4)$$

Pode-se agora, através da expressão (2.4), calcular os elementos de  $\mathbf{Y}$ . Entretanto, existem infinitas soluções. Para facilitar o cálculo, admite-se que  $\mathbf{Y}$  seja

triangular. Pelo método “Forward substitution”, calcula-se esses elementos. Seja, por exemplo, n igual a 3. Assim, ter-se-ia que:

$$\mathbf{Y} \cdot \mathbf{Y}' = \begin{bmatrix} y_{11} & 0 & 0 \\ y_{21} & y_{22} & 0 \\ y_{31} & y_{32} & y_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} y_{11} & y_{21} & y_{31} \\ 0 & y_{22} & y_{32} \\ 0 & 0 & y_{33} \end{bmatrix} \quad (2.5.a)$$

ou

$$\mathbf{Y} \cdot \mathbf{Y}' = \begin{bmatrix} y_{11}^2 & y_{11} \cdot y_{21} & y_{11} \cdot y_{31} \\ y_{11} \cdot y_{21} & y_{21}^2 + y_{22}^2 & (y_{21} \cdot y_{31} + y_{22} \cdot y_{32}) \\ y_{11} \cdot y_{31} & (y_{21} \cdot y_{31} + y_{22} \cdot y_{32}) & (y_{31}^2 + y_{32}^2 + y_{33}^2) \end{bmatrix} \quad (2.5.b)$$

Assim:

$$y_{11} = \sqrt{\sigma_{11}} \quad (2.6)$$

$$y_{21} = \frac{\sigma_{21}}{y_{11}} \quad (2.7)$$

$$y_{31} = \frac{\sigma_{31}}{y_{11}} \quad (2.8)$$

$$y_{22} = \sqrt{\sigma_{22} - y_{21}^2} \quad (2.9)$$

$$y_{32} = \frac{\sigma_{32} - y_{21} \cdot y_{31}}{y_{22}} \quad (2.10)$$

$$y_{33} = \sqrt{\sigma_{33} - y_{31}^2 - y_{32}^2} \quad (2.11)$$

De posse da matriz  $\mathbf{Y}$ , volta-se a expressão (2.2). Sorteia-se valores para as n variáveis y (normais independentes) e calcula-se as n variáveis z. Somando-se as respectivas médias  $\mu_x$ , tem-se um conjunto de dados simulados para os consumos individuais, ou seja :

$$\mathbf{X} = \mathbf{W} + \mu_x \quad (2.12)$$

Ou na forma matricial, tem-se:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} & 0 & \dots & 0 \\ y_{21} & y_{22} & \dots & 0 \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ y_{n1} & y_{n2} & \dots & y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ z_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ x_n \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Observando-se a expressão (2.12) vê-se que os vetores  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  e  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  representam, respectivamente, o vetor média dos n elementos da amostra colhida no início e o vetor resultante da simulação. Realizando-se um elevado número de sorteios, ou seja, obtendo-se vários vetores  $\mathbf{X}$ , é possível estudar o comportamento típico do sistema nos seus aspectos de interesse.

O método de Monte Carlo pode ser definido então, como sendo a realização sucessiva de vários sorteios para a obtenção de vários vetores  $\mathbf{X}$  que devem obedecer a igualdade (2.13).

### 2.2.2) Aplicação do Método de Monte Carlo

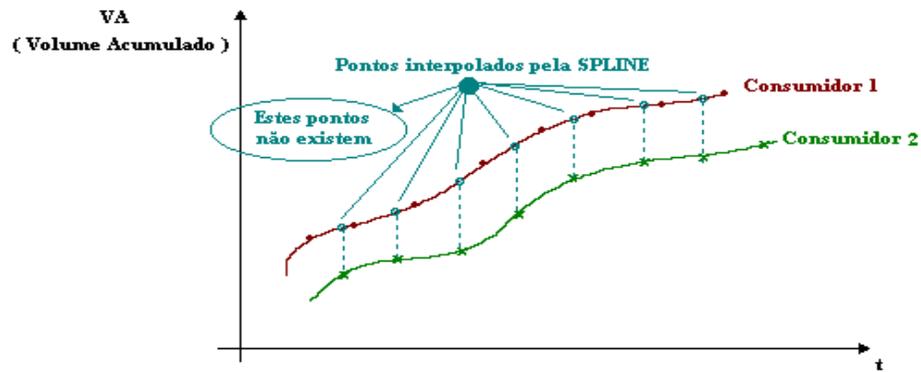
Nesta seção será mostrado como aplicar a teoria referente ao método de simulação de Monte Carlo, como explicada no item 2.1, ao sistema de abastecimento de água potável. Para isto, esta seção foi dividida em outras duas subseções: a primeira abordará como foram realizadas as coletas de dados em campo e, com isto, definirá as grandezas e os valores numéricos mencionados na Tabela 2.1 e aplicá-los na simulação; a segunda subseção abordará como aplicar os valores obtidos nas simulações para prever o consumo de água dos vários consumidores e, com isto, estimar a potência média do sistema para os casos de rotações constante e variável do conjunto moto-bomba.

Na seção 2.3, como será visto posteriormente, desenvolver-se-á uma metodologia estatística para transpor os resultados obtidos na simulação da instalação estudada para outras instalações de abastecimento de água e, como já mencionado, sem a necessidade do levantamento de campo para obtenção de novos dados.

### 2.2.2.1) Levantamento de Campo

No procedimento adotado levanta-se, nos vários consumidores, a posição no hidrômetro, indicando-se o instante da medida. As medidas nos vários consumidores não são simultâneas, e representam o volume acumulado e não a vazão.

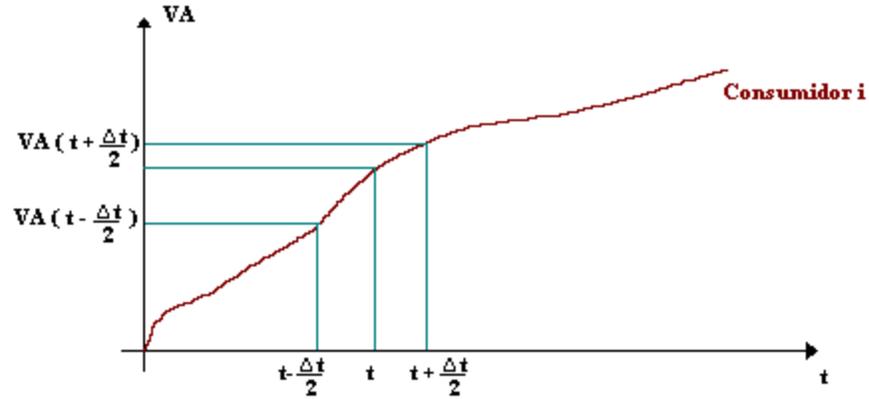
Para resolver este problema, de posse dos pontos levantados para cada consumidor, faz-se uma interpolação através da técnica da SPLINE. A Figura 2.1 ilustra um exemplo gráfico para compreensão desta interpolação.



**Figura 2.1- Exemplo Gráfico Ilustrando o Método Utilizado Para Interpolar os Valores do Volume Acumulado dos Vários Consumidores a Intervalos de Tempos Iguais.**

Dessa maneira, pode-se discretizar o tempo em intervalos iguais  $\Delta t$  (por exemplo: 30 minutos) e obter a vazão média  $Q$  neste intervalo de tempo, para cada consumidor  $i$  (ver Figura 2.2).

$$Q_i(t) = \frac{VA_i(t + \Delta t/2) - VA_i(t - \Delta t/2)}{\Delta t} \quad (2.14)$$



**Figura 2.2 - Representação Gráfica do Cálculo da Vazão Média do I-ésimo Consumidor Para Um Intervalo de Tempo Genérico t.**

É possível, então, obter um conjunto de dados de vazão para todos os  $n$  consumidores como segue:

| <b>Tempo</b> | <b>Casa 1</b> | <b>Casa 2</b> | <b>. . .</b> | <b>Casa n</b> |
|--------------|---------------|---------------|--------------|---------------|
| $t_1$        | $Q_{11}$      | $Q_{12}$      | . . .        | $Q_{1n}$      |
| $t_2$        | $Q_{21}$      | $Q_{22}$      | . . .        | $Q_{2n}$      |
| .            | .             | .             | .            | .             |
| .            | .             | .             | .            | .             |
| .            | .             | .             | .            | .             |
| $t_m$        | $Q_{m1}$      | $Q_{m2}$      | . . .        | $Q_{mn}$      |

**Figura 2.3 - Tabela de Dados (Vazão x Tempo) Para os  $n$  Consumidores Analisados.**

A Figura 2.3 representa a Tabela 2.1 do modelo teórico, apresentado no início da seção 2.1, e é a interpretação daquela tabela aplicada ao sistema de abastecimento de água potável. Com base no conjunto de dados levantado, é possível calcular a matriz variância-covariância ( $\sum_Q$ ), cujos elementos são dados em (2.15).

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{m-1} \cdot \sum_{k=1}^m \left[ \left( Q_{i,k} - \bar{Q}_i \right) \cdot \left( Q_{j,k} - \bar{Q}_j \right) \right] \quad (2.15)$$

Também pode-se ter o vetor das vazões médias  $\bar{Q}_i$  dos n consumidores como mostrado na Tabela 2.2.

**Tabela 2.2 - Valores de Vazão Média dos n Consumidores.**

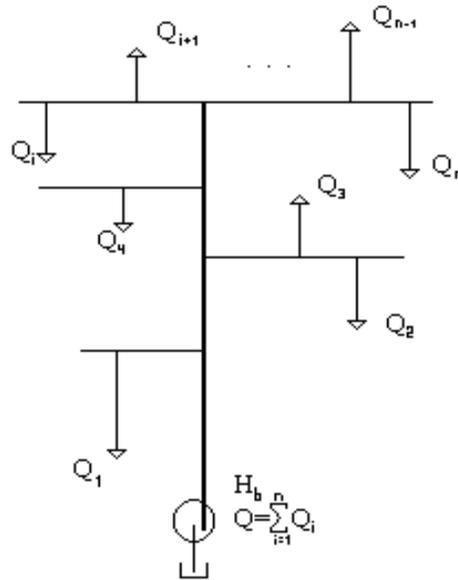
|               | <b>Média</b>      |
|---------------|-------------------|
| <b>Casa 1</b> | $x_1 = \bar{Q}_1$ |
| <b>Casa 2</b> | $x_2 = \bar{Q}_2$ |
| .             | .                 |
| .             | .                 |
| .             | .                 |
| <b>Casa n</b> | $x_n = \bar{Q}_n$ |

$$\bar{Q}_i = \frac{1}{m} \cdot \sum_{j=1}^m Q_{ji} \quad p / i = 1, \dots, m$$

De posse destes valores é possível simular, aplicando a metodologia da simulação de Monte Carlo explicada na seção (2.1), o consumo de água da rede hidráulica para um instante qualquer. Neste modelo físico, representativo da rede hidráulica de abastecimento de água potável, é importante observar que o vetor das vazões simuladas  $\mathbf{Q}$ , a Tabela 2.2 e a eq. (2.15) são, respectivamente, o vetor  $\mathbf{X}$ , o vetor  $\mu_x$  e os elementos da matriz variância-covariância ( $\Sigma_x$ ) do modelo matemático.

### **2.2.2.2) Simulação Energética de Sistemas de Abastecimento de Água Potável Por Bombeamento**

Com os dados colhidos em campo e aplicando o método de Monte Carlo em uma instalação de abastecimento de água, como mostra a Figura 2.4, pode-se obter as vazões aproximadas para cada um dos n consumidores da rede e com isto iniciar a análise energética do sistema como será explicada a seguir.



**Figura 2.4 - Simulação de Monte Carlo Para Obtenção das Vazões dos n Consumidores da Rede de Abastecimento de Água Potável.**

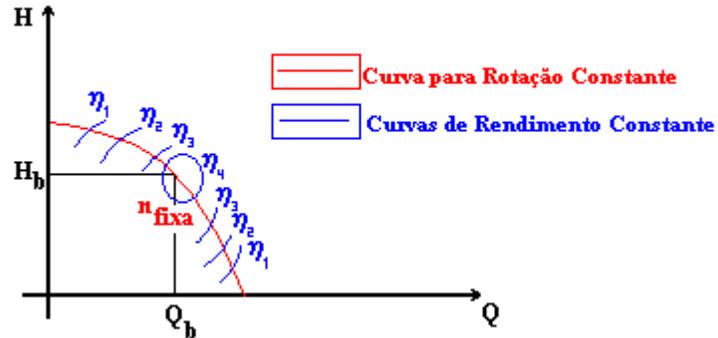
Partindo-se então do fato de que as vazões  $Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_n$  são conhecidas, então é possível de imediato determinar a vazão requerida da bomba através da seguinte expressão:

$$Q_b = \sum_{i=1}^n Q_i \quad (2.16)$$

De posse do valor encontrado em (2.16) é possível determinar a altura total de energia da bomba ( $H_b$ ), conhecendo-se apenas o seu diagrama de funcionamento, que poderá ser fornecido pelo fabricante, obtido por ensaios em laboratório ou se basear em curvas padronizadas e interpoladas por redes neurais artificiais (ver próximo capítulo), como realizou-se neste trabalho. Por hora, suponha que este diagrama seja conhecido e esteja pronto para ser utilizado. Desta forma, pode-se analisar energeticamente o sistema em duas situações distintas: primeiro com o sistema funcionando com a bomba à rotação constante e depois com a bomba à rotação variável. Assim, seja cada situação analisada separadamente.

a) Bomba funcionando com rotação constante.

A Figura 2.5 mostra o diagrama H x Q da bomba centrífuga e de posse da vazão, obtida de acordo com a eq. (2.16), é possível obter  $H_b$  como ilustra esta mesma Figura.



**Figura 2.5 - Diagrama H x Q de Uma Bomba Centrífuga  
Funcionando Com Rotação Constante.**

De posse dos valores de  $Q_b$  e  $H_b$  é possível determinar a potência hidráulica exigida pela bomba, referente ao primeiro sorteio das  $n$  vazões para os  $n$  consumidores da rede, através da eq. (2.17.a).

$$P_h = \rho \cdot g \cdot Q_b \cdot H_b \quad (2.17.a)$$

Onde,  $P_h$  - Potência hidráulica, [W]

$\rho$  - Massa específica da água na temperatura ambiente, [kg / m<sup>3</sup>]

$g$  - Aceleração da gravidade local, [m / s<sup>2</sup>]

$Q_b$  - Vazão da bomba, [m<sup>3</sup> / s]

$H$  - Pressão média na saída da bomba, [m]

Conhecendo-se as curvas de rendimento total do conjunto moto-bomba ( $\eta_t$ ), pode-se calcular a potência elétrica demandada ( $P_{el}$ ).

$$P_{el} = \frac{P_h}{\eta_t} \quad (2.17.b)$$

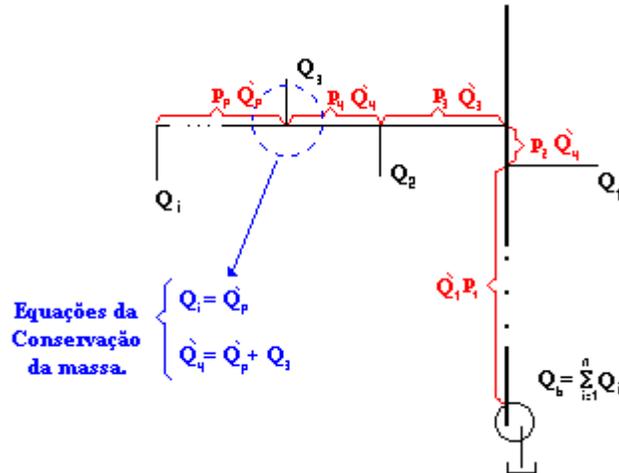
Pelo princípio do Método de Monte Carlo repete-se este processo várias vezes, ou seja, sorteia-se as vazões para os n consumidores da rede, calcula-se a vazão requerida pela bomba ( $Q_b$ ) através da equação (2.16), determina-se a altura total da bomba ( $H_b$ ) pelo diagrama  $H \times Q$ , obtêm-se a potência hidráulica pela equação (2.17.a) e a potência elétrica pela expressão (2.17.b). Então será possível obter várias potências elétricas exigidas pelo sistema para várias situações distintas.

A média de todas estas potências fornecerá a potência média demandada pelo sistema, que nada mais é do que uma medida da energia consumida.

Ainda com base nesta simulação, pode-se analisar a instalação de vários pontos de vistas distintos. Por exemplo, pode-se avaliar a perda de carga do sistema e a pressão dos consumidores e na linha (se muito alta ou muito baixa).

- Avaliação da perda de carga do sistema

Seja a Figura 2.6, que representa o trajeto hidráulico realizado pelo fluido bombeado, desde a bomba até o i-ésimo consumidor. Partindo-se no sentido do ramal para o duto principal, e através da aplicação da equação da conservação da massa em cada bifurcação, existente neste trajeto, é possível determinar a vazão em cada um dos p trechos fechados do duto que interligam o i-ésimo consumidor à bomba centrífuga.



**Figura 2.6 - Trajeto Hidráulico do Fluido a Ser Bombeado Desde a Saída da Bomba Até o I-ésimo Consumidor.**

Conhecidos os valores das vazões ( $Q_1, Q_2, \dots, Q_p$ ), das geometrias e do material dos tubos é possível, através de fórmulas ou tabelas da mecânica dos fluidos (ver apêndice A), determinar a perda de carga existente entre a bomba centrífuga até o i-ésimo consumidor. Estes valores são representados, na Figura 2.6, pelos símbolos  $p_1, p_2, \dots, p_p$ .

- Avaliação das pressões existentes nos consumidores

No ponto de fornecimento, em cada um dos  $n$  consumidores, a pressão pode ser facilmente calculada. Seja  $Z_i$  o nível existente entre o i-ésimo consumidor e a bomba centrífuga,  $H_b$  a altura total da bomba e  $(p_1 + p_2 + \dots + p_p)$  a perda de carga existente entre o i-ésimo consumidor e a bomba, desta forma tem-se:

$$H_{ci} = H_b - \sum_{l \in L} p_l - Z_i \quad (2.18)$$

Onde:

$H_{ci}$  - Pressão de fornecimento no i-ésimo consumidor;

$H_b$  - Altura total de energia da bomba;

$\sum_{l \in L} p_l$  - Perda de carga na tubulação existente entre a saída da

bomba e o i-ésimo consumidor;

L - Conjunto de todos os tubos que interligam a bomba até o I-ésimo consumidor;

$Z_i$  - Nível existente entre a bomba e o I-ésimo consumidor.

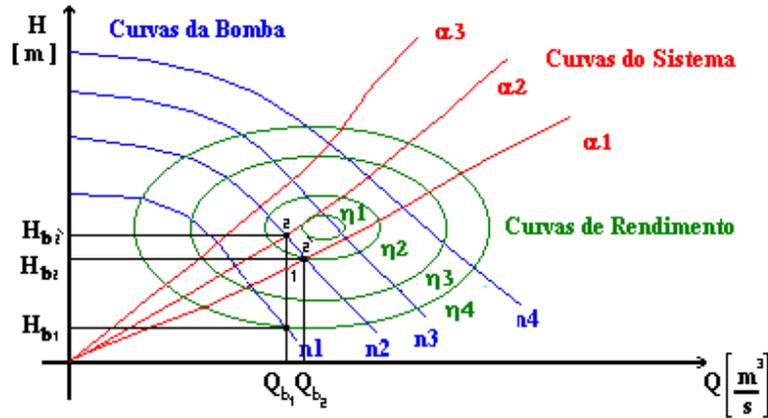
Desta forma, aplicando a equação (2.18) para todos os n consumidores da rede é possível avaliar as pressões de fornecimento para os consumidores. Este fato permitirá avaliar uma região ou grupo de consumidores que possuam pressões ou muito altas ou muito baixas, além de pontos de desperdício de energia.

b) Bomba funcionando com rotação variável.

Para analisar o sistema onde há o controle de rotação do conjunto moto-bomba, deve-se inicialmente entender o diagrama colina que relaciona as grandezas físicas  $Q_b$  (Vazão da bomba),  $n_b$  (Rotação da bomba),  $H_b$  (Altura total da bomba) e  $\eta_b$  (Rendimento da bomba). A Figura 2.7 ilustra como é composto o diagrama geral de tais equipamentos.

Como pode ser observado, as linhas azuis representam as várias rotações admitidas pelo sistema. O aumento da rotação sempre se dará da esquerda para a direita, ou seja,  $n_1 < n_2 < n_3 < n_4$  para qualquer bomba.

As curvas de rendimento constante são representadas pelas curvas fechadas com cor verde no diagrama. Os rendimentos aumentam sempre de fora para dentro do diagrama, desta forma, tem-se sempre que  $\eta_1 > \eta_2 > \eta_3 > \eta_4$ .



**Figura 2.7 - Representação Esquemática do Diagrama Colina do Conjunto Moto-Bomba.**

As curvas vermelhas representam o sistema para uma dada configuração e estado de uma rede hidráulica. Entende-se por estado, no caso em questão, principalmente a posição das válvulas dos consumidores (bóias das caixas d'água). Para o caso em que o sistema trabalha com estas válvulas totalmente abertas, a curva do sistema é representada pela curva vermelha  $\alpha_1$ , e quando estas válvulas forem fechadas, a curva tende a ser mais acentuada e passará a ser, por exemplo, representada por  $\alpha_2$ . Ou seja, a curva do sistema dependerá da geometria e configuração da tubulação, de seus elementos hidráulicos (cotovelos, válvulas, ...) e dos estados atuais de cada elemento hidráulico (fechados, parcialmente abertos ou totalmente abertos).

Desta forma, se a bomba for acionada para trabalhar com uma rotação  $n_2$ , imposta pelo motor elétrico, e sendo  $\alpha_1$  a curva de funcionamento típica do sistema, então o ponto de funcionamento do conjunto moto-bomba será dado pelo ponto de equilíbrio destas duas curvas, que matematicamente pode ser representado pela interseção das mesmas no diagrama colina.

A descrição resumida deste diagrama foi realizada com o objetivo maior de tornar clara e compreensível a metodologia de controle por rotação variável, a ser apresentada a seguir para um sistema moto-bomba, e, com isto, introduzir um algoritmo computacional que permitirá realizar a simulação dos comportamentos hidráulico e energético do sistema.

Assim sendo, ainda com base na Figura 2.7, suponha que a bomba esteja funcionando com uma vazão  $Q_{b1}$  e uma altura total  $H_{b1}$ . Alterando-se a rotação da bomba de  $n_1$  para  $n_2$ , mantendo-se a vazão constante, observa-se que há um aumento do rendimento do conjunto moto-bomba, porém há também um aumento da altura total requerida pela bomba de  $H_{b1}$  para  $H_{b2}$ .

Como as equações abaixo mostram, com um aumento simultâneo de  $H_b$  e  $\eta_t$ , não é possível afirmar se há um aumento ou uma diminuição da potência elétrica requerida pelo sistema hidráulico.

$$P_h = \rho \cdot g \cdot Q_b \cdot H_b \quad (2.19.a)$$

$$P_{el.} = \frac{P_h}{\eta_t} \quad (2.19.b)$$

Onde:

$\eta_t$  - Rendimento total do sistema moto-bomba;

$P_{el.}$  - Potência elétrica do sistema moto-bomba.

Outro detalhe, a ser analisado neste sistema, é o aumento de  $H_b$ . Devido ao aumento da rotação do sistema, este não mantém a vazão da bomba absolutamente constante, ocorrendo sim, um aumento da mesma. Isto pode ser facilmente explicado, pois um aumento na pressão total da bomba é imediatamente repassado ao sistema e portanto aumentando ligeiramente a sua vazão de trabalho. Desta forma, o equilíbrio final do sistema será atingido somente em  $Q_{b2}$  e  $H_{b2}$ , como está mostrando a Figura 2.7.

Realizada a descrição detalhada do funcionamento dinâmico do sistema moto-bomba, funcionando à rotação variável, apresenta-se a seguir um algoritmo que permite avaliar as potências hidráulica e elétrica médias demandadas pelo sistema para o presente caso.

### 2.2.2.3) Algoritmo Para a Conservação de Energia em Sistema de Bombeamento Com Controle à Rotação Variável

1) Sorteiam-se as vazões ( $Q_{11}$  ,  $Q_{21}$  , . . . ,  $Q_{n1}$  ) dos  $n$  consumidores da rede através do Método de Monte Carlo, como explicado na seção 2.1, armazenando-os. O segundo índice dos elementos do vetor vazão indica os valores iniciais do mesmo que, como já foi visto, deverão ser corrigidos caso o sistema altere sua rotação. A soma de todas estas vazões fornecerá a vazão inicial da bomba, ou seja:

$$Q_{b1} = \sum_{i=1}^n Q_{i1} \quad (2.20)$$

2) Calcula-se a pressão de saída dos  $n$  consumidores através da equação (2.21), que é a mesma equação empregada para o caso do sistema funcionando à rotação constante, ou seja :

$$H_{ci1} = H_{b1} - \sum_{j \in J} p_j - Z_i \quad (2.21)$$

Desta forma, para o vetor inicial de vazões dos  $n$  consumidores do sistema ( $Q_{11}$  ,  $Q_{21}$  , . . . ,  $Q_{n1}$  ) e para uma rotação inicial ( $n_1$  ) da bomba, tem-se o vetor correspondente de pressão de fornecimento inicial , também com  $n$  elementos, representado por ( $H_{c11}$  ,  $H_{c21}$  , . . . ,  $H_{cn1}$  ). É importante observar que o conhecimento do diagrama da bomba (ver capítulo 3) é de fundamental importância, nesta parte do algoritmo, para a obtenção de  $H_{b1}$  a partir de  $n_1$  e  $Q_{b1}$ . O cálculo da perda de carga pode ser determinado como explicado no apêndice A.

3) Para incorporar o efeito de alteração da rotação da bomba, por exemplo de  $n_1$  para  $n_2$ , realiza-se a seguinte correção das pressões de fornecimento para cada um dos  $n$  consumidores:

$$H_{ci2} = H_{ci1} + (H_{b2} - H_{b1}) \quad (2.22)$$

Isto fornecerá um segundo vetor de pressões ( $H_{c12}$ ,  $H_{c22}$ , . . . ,  $H_{cn2}$ ) para este sistema hidráulico. Observe que  $H_{b2}$  pode ser obtido do diagrama colina, simplesmente, a partir de  $n_2$  e  $Q_{b1}$ .

4) Gera-se o segundo vetor de vazões referentes aos  $n$  consumidores da rede. Isto é realizado com base nos vetores obtidos em 1, 2 e 3 e na relação matemática expressa abaixo:

$$\left( \frac{Q_{i2}}{Q_{i1}} \right)^2 = \frac{H_{ci2}}{H_{ci1}} \quad (2.23)$$

Esta expressão avalia o comportamento do sistema do consumidor, cuja válvula associada a bóia é o principal elemento. Desta forma, o expoente 2 é uma boa aproximação, mas não é um valor definitivo, exigindo maiores estudos.

A soma de todos os elementos do novo vetor representativo das vazões dos consumidores ( $Q_{12} + Q_{22} + \dots + Q_{n2}$ ) será igual a nova vazão  $Q_{b2}$  da bomba. Como já foi mencionado, a vazão da bomba deve-se alterar com a variação da rotação da bomba.

5) O vetor ( $H_{c12}$ ,  $H_{c22}$ , . . . ,  $H_{cn2}$ ) representa as pressões de saída dos  $n$  consumidores ainda com a vazão da bomba em  $Q_{b1}$ . Desta forma, deve-se encontrar um novo vetor de pressões de saída ( $H_{c12'}$ ,  $H_{c22'}$ , . . . ,  $H_{cn2'}$ ) que considere a nova vazão  $Q_{b2}$ . Isto poderá ser realizado de forma relativamente fácil.

Com base na nova vazão  $Q_{b2}$  e na nova rotação  $n_2$  determina-se  $H_{b2'}$  através do diagrama colina. Desta forma, ter-se-á duas situações distintas:

Se  $(H_{b2'} - H_{b2}) > \text{Erro admitido}$ , então volta-se ao item 3 do algoritmo e com a nova pressão, recalcula-se as pressões dos consumidores e, daí, a vazão de cada um. Calcula-se, então a nova vazão da bomba e, com a mesma rotação  $n_2$ , obtêm-se o novo  $H_b$ . Isto deverá ser realizado até que esta condição seja satisfeita, caso em que a condição abaixo será finalmente incrementada.

Se  $(H_{b2'} - H_{b2}) < \text{Erro admitido}$ , então de posse de  $H_{b2'}$  e do vetor de vazões  $(Q_{12}, Q_{22}, \dots, Q_{n2})$  recalculam-se as novas pressões de saída dos consumidores pela seguinte expressão:

$$H_{ci2'} = H_{b2'} - \sum_{j \in J} p_j - Z_i \quad (2.24)$$

Neste ponto do algoritmo já são conhecidos os vetores vazão dos consumidores  $(Q_{12}, Q_{22}, \dots, Q_{n2})$  e pressão de fornecimento dos consumidores  $(H_{c12'}, H_{c22'}, \dots, H_{cn2'})$  para a nova rotação do sistema. Os valores de  $Q_{b2}$  e  $H_{b2'}$  também são conhecidos e, desta forma, a análise energética do sistema poderá ser iniciada. Porém, antes disto, será apresentado um resumo das tarefas realizadas por este algoritmo.

a) Avalia-se o comportamento inicial dos consumidores através do método de Monte Carlo, gerando os vetores de vazão dos consumidores  $Q_{i1}$  e de pressão de fornecimentos dos consumidores  $H_{ci1}$ . Nesta situação pode-se afirmar que o sistema está funcionando com a bomba a uma rotação  $(n_1)$ , a uma vazão  $(Q_{b1})$  e a uma altura total de energia  $(H_{b1})$ .

b) Varia-se a rotação do sistema de  $n_1$  para  $n_2$ . Desta forma, para os mesmos consumidores de **a**, ele gera o novo comportamento do sistema expresso pelos novos vetores de vazão dos consumidores  $Q_{i2}$  e pressão de fornecimentos dos consumidores  $H_{ci2'}$ . Neste novo estado de funcionamento o sistema tem sua bomba operando a uma rotação  $(n_2)$ , a uma vazão  $(Q_{b2})$  e a uma altura total de energia  $(H_{b2'})$ .

Com base em **a** e **b** observa-se que existem todos os dados necessários para realizar uma análise energética do sistema, tanto antes como depois da variação da rotação da bomba. Isto, antes de mais nada, permitirá avaliar e comparar os dois estados do sistema.

Após a realização da simulação anterior as potências elétricas, antes e depois da variação da rotação da bomba poderão ser calculadas respectivamente da seguinte forma:

$$P_{el1} = \rho \cdot g \cdot Q_{b1} \cdot H_{b1} / \eta_{tl} \quad (2.25.a)$$

$$P_{el2} = \rho \cdot g \cdot Q_{b2} \cdot H_{b2} / \eta_{t2} \quad (2.25.b)$$

Observe que os rendimentos ( $\eta_t$ ) são tirados do diagrama colina, correspondendo ao respectivo ponto de operação. Como já mencionado, o método de Monte Carlo, exige que o sistema seja simulado um elevado número de vezes. Desta forma, isto permitirá avaliar a potência ótima do sistema.

Realiza-se, então, nova simulação a partir do algoritmo apresentado anteriormente, repetindo-se os seus 5 passos, e obtêm-se as novas potências, para esta segunda simulação, a partir das eq. (2.25.a) e (2.25.b). Repetindo-se este procedimento  $k$  vezes ter-se-ão  $k$  potências hidráulicas antes da variação de rotação da bomba do sistema e  $k$  potências hidráulicas depois da variação desta rotação. As potências médias do sistema antes e depois da variação da rotação da bomba serão respectivamente dadas por:

$$\bar{P}_{h1} = \frac{1}{k} \cdot \sum_{i=1}^k P_{h1k} \quad (2.26.a)$$

$$\bar{P}_{h2} = \frac{1}{k} \cdot \sum_{i=1}^k P_{h2k} \quad (2.26.b)$$

Entretanto, como o volume de água total consumido é o mesmo, tanto para a situação inicial do sistema como para o caso onde ocorreu a variação de rotação da bomba, então a potência média dada pela equação (2.26.b) deverá possuir um termo de correção uma vez que o tempo de funcionamento da bomba é diferente para os dois casos. Assim, como o volume consumido é constante, tem-se:

$$t_2 \cdot Q_{b2} = t_1 \cdot Q_{b1} = \text{Volume total consumido} \quad (2.27)$$

Logo,

$$\frac{t_2}{t_1} = \frac{Q_{b1}}{Q_{b2}} \quad (2.28)$$

Por outro lado, a energia total do sistema é representada, respectivamente, antes e depois da variação da rotação da bomba, por:

$$E_1 = P_{h1} \cdot t_1 \quad (2.29.a)$$

e

$$E_2 = P_{h2} \cdot t_2 \quad (2.29.b)$$

Representando as energias totais  $E_1$  e  $E_2$ , para o mesmo intervalo de tempo, tem-se :

$$E_2 = \bar{P}_{h2} \cdot \frac{Q_{b1}}{Q_{b2}} \cdot t_1 \quad (2.30)$$

Desta forma, observando a equação (2.30) pode-se concluir que a potência média  $\bar{P}_{h2}$  deverá ser multiplicada pelo fator  $\frac{Q_{b1}}{Q_{b2}}$ , para ser válida ao mesmo intervalo  $t_1$  da situação inicial. Assim,

$$\bar{P}_{h2} = \frac{1}{k} \cdot \sum_{i=1}^k P_{h2k} \cdot \frac{Q_{b1k}}{Q_{b2k}} \quad (2.31)$$

Deve-se observar que, para realizar a comparação entre as potências médias antes e depois da variação da rotação da bomba, elas devem ser representadas no mesmo intervalo de tempo, neste caso,  $t_1$ .

### 2.3) Transposição dos Resultados Para Outras Instalações

Realizada uma primeira coleta de dados, para um sistema hidráulico específico de abastecimento de água potável, então a partir destes resultados e do emprego da estatística é possível prever uma função densidade de probabilidade (fdp) que melhor caracteriza o sistema. Esta (fdp) poderá ser utilizada para generalizar o comportamento de sistemas hidráulicos, até certo ponto, semelhantes ao primeiro. Desta forma, a previsão do comportamento dos consumidores de outras instalações poderá ser obtida sem a necessidade de novas coletas de dados.

Uma observação inicial e de bastante importância é com respeito à eficiência da primeira coleta de dados. Deve-se ter em mente que, quanto maior e mais diversificada forem as amostras, então mais precisa será a (fdp) obtida e, portanto, resultados mais confiáveis poderão ser obtidos para as outras instalações.

Considerando-se agora a metodologia de transposição de resultados, propriamente dita, então o conhecimento prévio do vetor média  $\mu_Q$  e da matriz variância-covariância  $\Sigma_{\mu_Q}$  da instalação inicial já estudada, representado pelas equações (2.32.a) e (2.32.b), são de fundamental importância.

$$\mu_Q = \begin{bmatrix} \bar{Q}_1 \\ \bar{Q}_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \bar{Q}_n \end{bmatrix} \quad (2.32.a)$$

$$\Sigma_{\mu_Q} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \cdot & \cdot & \cdot & \sigma_{1n} \\ \cdot & \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & \cdot & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot & \cdot \\ \sigma_{n1} & \cdot & \cdot & \cdot & \sigma_{nn} \end{bmatrix} \quad (2.32.b)$$

Em seguida, com base nestes valores, calcula-se a matriz unitária do sistema como ilustrado a seguir:

$$\dot{\Sigma}_{\mu_Q} = \begin{bmatrix} \frac{\sigma_{11}}{\bar{Q}_1 \cdot \bar{Q}_1} & \cdot & \cdot & \cdot & \frac{\sigma_{1n}}{\bar{Q}_1 \cdot \bar{Q}_n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \frac{\sigma_{n1}}{\bar{Q}_n \cdot \bar{Q}_1} & \cdot & \cdot & \cdot & \frac{\sigma_{nn}}{\bar{Q}_n \cdot \bar{Q}_n} \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

Onde

$\dot{\Sigma}_{\mu_Q}$  - Matriz variância-covariância unitária do sistema.

Desta forma, pode-se dividir os elementos da matriz em duas categorias de elementos: a primeira sendo o conjunto dos elementos da diagonal principal e a segunda o conjunto dos elementos ou abaixo ou acima da diagonal principal. Assim, obtêm-se os seguintes vetores auxiliares.

$$\dot{\sigma}^2 = \left\{ \dot{\sigma}_{11}, \dot{\sigma}_{22}, \dots, \dot{\sigma}_{nn} \right\}, \text{ Para } \dot{\sigma}_{ii} = \frac{\sigma_{ii}}{\bar{Q}_i \cdot \bar{Q}_i} \quad (2.34)$$

e

$$\dot{\sigma}_{ij} = \left\{ \dot{\sigma}_{21}, \dot{\sigma}_{31}, \dots, \dot{\sigma}_{1n}, \dots, \dot{\sigma}_{n \ n-1} \right\}, \text{ Para } \dot{\sigma}_{ij} = \frac{\sigma_{ij}}{\bar{Q}_i \cdot \bar{Q}_j} \quad (2.35)$$

Os vetores (2.34) e (2.35) devem possuir, respectivamente, uma distribuição de probabilidade  $\hat{\sigma}_{ii}$  e  $\hat{\sigma}_{ij}$ . Um exemplo de probabilidade, para efeito ilustrativo do modelo, é apresentado abaixo:



**Figura 2.8 - Exemplo Gráfico de Um Tipo Particular de Distribuições de Probabilidade.**

Para obtenção das distribuições de probabilidade  $\hat{\sigma}_{ii}$  e  $\hat{\sigma}_{ij}$  deve-se primeiro levantar o histograma dos vetores (2.34) e (2.35) e depois, com a ajuda de softwares específicos para interpolação de funções como o MATLAB V4.0, obter as melhores distribuições de probabilidade para representar ambos os vetores.

Já que os vetores apresentados em (2.34) e (2.35) representam as melhores distribuições de probabilidade do sistema, então, eles poderão ser utilizados para gerar as vazões típicas dos  $n$  consumidores de uma instalação hidráulica qualquer. Entretanto, estes vetores não são de forma alguma auto-suficientes; devendo-se ainda conhecer algumas informações mínimas e necessárias do novo sistema.

Para este caso particular, o conhecimento do vetor de vazões médias mensais dos consumidores ( $\mu_{Q2}$ ) e a configuração física e geométrica (isométrico) da nova instalação hidráulica deverão ser de fundamental importância.

Com estas informações, então, é possível sortear uma nova matriz variância-covariância unitária e determinar a matriz variância-covariância do novo sistema (veja matriz abaixo).

$$\Sigma_{\mu_{Q_2}} = \begin{bmatrix} \dot{\sigma}_{11} \cdot \bar{Q}_1 \cdot \bar{Q}_1 & \cdot & \cdot & \cdot & \dot{\sigma}_{1m} \cdot \bar{Q}_1 \cdot \bar{Q}_m \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \dot{\sigma}_{m1} \cdot \bar{Q}_m \cdot \bar{Q}_1 & \cdot & \cdot & \cdot & \dot{\sigma}_{mm} \cdot \bar{Q}_m \cdot \bar{Q}_m \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

Onde:

$\Sigma_{\mu_{Q_2}}$  - Matriz variância-covariância da nova instalação hidráulica;

$\bar{Q}_i$  - Elementos do vetor média ( $\mu_{Q_2}$ ) das vazões mensais dos m consumidor da nova rede hidráulica;

$\dot{\sigma}_{ij}$  - Elementos gerados aleatoriamente a partir da distribuição unitária encontrada para o sistema original. Deve-se observar que não são os valores unitários encontrados para o primeiro modelo, mas sim valores aleatórios sorteados a partir destes.

De posse do vetor ( $\mu_{Q_2}$ ), da matriz variância-covariância ( $\Sigma_{\mu_{Q_2}}$ ) e da configuração física e geométrica do novo sistema hidráulico, então, já será possível aplicar o método de Monte Carlo, como explicado na seção 2.2.1 deste trabalho, e simular o comportamento do sistema tanto para rotação constante como para rotação variável, assim como foi feito para o sistema original.

Neste ponto do trabalho, deve-se salientar que a obtenção de um modelo genérico para simular qualquer rede hidráulica já foi idealizada. Desta forma, um algoritmo com respeito a este modelo, enfocando os passos principais para implementação em software, poderá ser implementado a partir do exposto nesta seção.

## 2.4) Simplificação do Modelo de Simulação

Um modelo matemático para simplificar a simulação do comportamento do sistema e portanto, tornando opcional a utilização do computador será apresentado nesta seção. Entretanto, para que isto seja possível uma hipótese inicial, com respeito ao comportamento do sistema, deverá ser respeitada, ou seja:

- A correlação entre os consumidores deverá ser desprezada, assim,  $\sigma_{ij} = 0$  se  $i \neq j$ . Desta forma, a matriz variância-covariância tomará a seguinte forma:

$$\Sigma_{\mu_x} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ 0 & \sigma_{22} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & \sigma_{nn} \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

Com isto, considerando-se agora o sistema de abastecimento de água com bombeamento para  $m$  consumidores e sendo o consumo médio de água e o desvio padrão do consumo do  $k$ -ésimo consumidor dados respectivamente por  $(\mu_{Q_k})$  e  $(\sigma_{Q_k})$ , então com a hipótese das correlações nulas entre os vários consumidores pode-se afirmar, a partir do Teorema Central do Limite, que:

$$\mu_{Q_b} = \sum_{k=1}^m \mu_{Q_k} \quad (2.38.a)$$

$$\sigma_{Q_b}^2 = \sum_{k=1}^m \sigma_{Q_k}^2 \quad (2.38.b)$$

Onde,

$\mu_{Q_b}$  - Vazão média da bomba;

$\mu_{Q_k}$  - Vazão média do consumidor k;

$\sigma_{Q_b}^2$  - Variância da vazão da bomba;

$\sigma_{Q_k}^2$  - Variância da vazão do k-ésimo consumidor.

Ainda para este caso, se m for muito grande, então a fdp de  $Q_b$  tenderá a uma normal. Entretanto, para aplicar a equação (2.38.b) deve-se conhecer os valores de  $\sigma_{Q_k}^2$  para  $k=1, 2, \dots, m$ .

Para calcular  $\sigma_{Q_k}^2$  parte-se do fato de que a (fdp) da matriz unitária  $\dot{\sigma}^2$ , a mesma encontrada na realização da transposição de resultados como vista na seção 2.3, seja conhecida. Desta forma, ter-se-á:

$$\hat{\sigma}_{Q_k}^2 = \mu_{Q_k}^2 \cdot \hat{\dot{\sigma}}_{kk} \quad (2.39)$$

Onde,

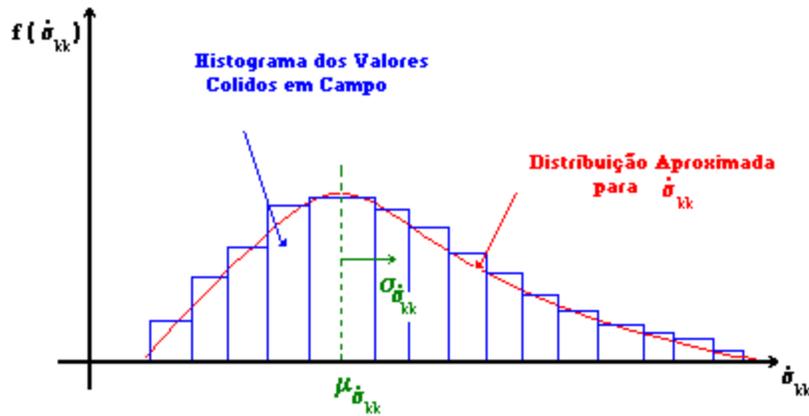
$\hat{\dot{\sigma}}_{kk}$  - Variância da vazão do consumidor k;

$\mu_{Q_k}^2$  - Média da vazão do consumidor k;

$\hat{\dot{\sigma}}_{Q_k}^2$  - Variância unitária do consumidor k sorteada a partir da (fdp) de  $\dot{\sigma}^2$ .

Um detalhe bastante importante com respeito a equação anterior deve ser frisado. O valor de  $\hat{\dot{\sigma}}_{kk}$  não pertence ao vetor  $\dot{\sigma}^2$  ( $\dot{\sigma}_{11}$ ,  $\dot{\sigma}_{22}$ , ...,  $\dot{\sigma}_{mm}$ ) resultante dos resultados colhidos em campo, mas sim a um valor sorteado a partir da (fdp) gerada a partir deste vetor.

Seja ainda a (fdp) de  $\dot{\sigma}^2$  cuja média é expressa por  $\mu_{\dot{\sigma}_{kk}}$  e variância  $\sigma_{\dot{\sigma}_{kk}}^2$ , como ilustra a Figura abaixo.



**Figura 2.9 - Representação Gráfica da Média e do Desvio Padrão da Distribuição dos Valores Unitários do Vetor Variância.**

Assim substituindo a equação (2.39) em (2.38.b) e expandindo-se o somatório, resulta

$$\sigma_{Q_b}^2 = \sum_{k=1}^m \sigma_{Q_k}^2 = \mu_{Q_1}^2 \cdot \hat{\sigma}_{11} + \mu_{Q_2}^2 \cdot \hat{\sigma}_{22} + \dots + \mu_{Q_m}^2 \cdot \hat{\sigma}_{mm} \quad (2.40)$$

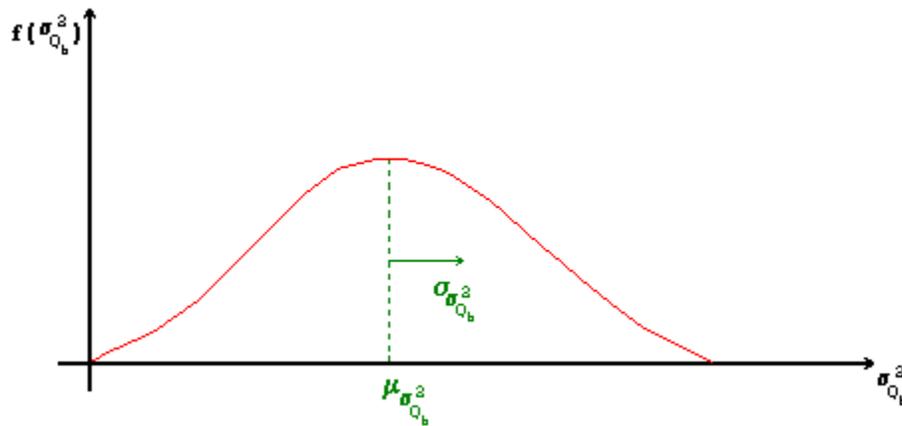
Os valores de  $\hat{\sigma}_{11}$ ,  $\hat{\sigma}_{22}$ , ...,  $\hat{\sigma}_{mm}$  pertencem à (fdp) gerada a partir do vetor  $\hat{\sigma}$ . Desta forma, a eq. (2.40) representa o somatório de vários elementos de uma mesma distribuição não necessariamente normal. Porém, com base no Teorema Central do Limite, a aplicação sucessiva da equação (2.40) implicará na geração de vários valores para  $\hat{\sigma}_{Q_b}^2$  que pertencerão necessariamente a uma distribuição normal. Ainda com base neste teorema, a distribuição normal resultante terá respectivamente os seguintes valores para a média ( $\mu_{\hat{\sigma}_{Q_b}^2}$ ) e a variância ( $\sigma_{\hat{\sigma}_{Q_b}^2}^2$ ):

$$\mu_{\hat{\sigma}_{Q_b}^2} = \mu_{\hat{\sigma}_{kk}} \cdot \sum_{i=1}^m \mu_{Q_i}^2 \quad (2.41.a)$$

$$\sigma_{\sigma_{Q_b}^2}^2 = \sigma_{\sigma_{kk}}^2 \cdot \sum_{i=1}^m \mu_{Q_i}^4 \quad (2.41.b)$$

Em resumo, o Teorema Central do Limite, afirma que a variância da vazão da bomba ( $\sigma_{Q_b}^2$ ) assume, para os seus valores, uma distribuição normal com média ( $\mu_{\sigma_{Q_b}^2}$ ) e variância ( $\sigma_{\sigma_{Q_b}^2}^2$ ) dadas respectivamente pelas equações (2.41.a) e (2.41.b). A

Figura 2.10 ilustra a (fdp) para a variância da vazão da bomba.



**Figura 2.10 - Função Densidade de Probabilidade (Incerteza) da Variância da Vazão da Bomba.**

O conhecimento destes fatos será de fundamental importância na modelagem matemática para a simulação do sistema de interesse. Desta forma, o embasamento teórico apresentado até aqui, já é suficiente para descrever o algoritmo de simulação simplificado. Os passos detalhados deste algoritmo são descritos a seguir:

1) Catalogar as médias das vazões dos  $m$  consumidores ( $\mu_{Q_1}, \mu_{Q_2}, \dots, \mu_{Q_m}$ ).

2) Obter os valores da média ( $\mu_{\sigma_{kk}}$ ) e da variância ( $\sigma_{\sigma_{kk}}^2$ ) da (fdp) da matriz

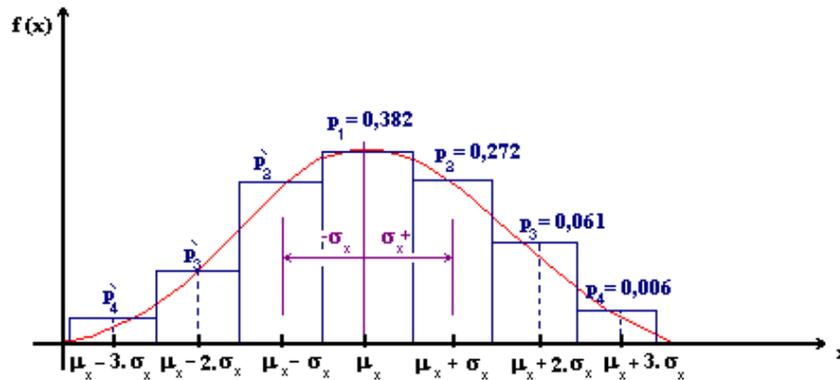
unitária resultante do levantamento de dados em campo. Observe que esta distribuição é a

mesma daquela encontrada na seção 2.3, no qual foi abordada a transposição de resultados.

3) Estudar o comportamento do sistema por um dos seguintes métodos: Discretização ou Método de Monte Carlo. Neste trabalho, optou-se pelo método da discretização que será desenvolvido a seguir.

Por exemplo, avaliar a Potência elétrica ( $P_{el.}$ ) requerida pelo sistema de abastecimento de água por bombeamento. O método de discretização se constituirá, em transformar a (fdp) da normal, que caracteriza a variância da vazão da bomba  $\sigma_{Qb}$ , em seu histograma equivalente.

A Figura 2.11 apresenta o histograma (dividido em sete partes) de uma normal qualquer com média ( $\mu_x$ ) e desvio padrão ( $\sigma_x$ ).



**Figura 2.11- Histograma, Dividido em 7 Partes, Representativo de Uma Normal Qualquer de Média ( $\mu_x$ ) e Desvio Padrão ( $\sigma_x$ ).**

Ainda com relação a Figura 2.11 pode-se demonstrar matematicamente que uma normal qualquer possui as seguintes propriedades enunciadas a seguir.

( i ) Há uma simetria da distribuição normal em relação ao eixo vertical que passa por  $\mu_x$ . A conseqüência mais importante dessa propriedade é que as igualdades  $p_2' = p_2$ ,  $p_3' = p_3$  e  $p_4' = p_4$  são sempre verificadas.

( ii ) Os valores de probabilidade  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$  e  $p_4$  são constantes e independentes de  $\mu_x$  e  $\sigma_x$ . Estes valores estão representados na Figura 2.11.

( iii ) A soma de todas as 7 probabilidades do histograma é igual a 1 ( $p_4' + p_3' + p_2' + p_1 + p_2 + p_3 + p_4 = 1$ ).

Assim, para aplicar o método da discretização para o caso particular de um histograma dividido em 7 partes, como representado na Figura 2.11, no cálculo da potência elétrica ótima do sistema de abastecimento de água por bombeamento, realizam-se os seguintes procedimentos:

3.1) Com base nos valores de  $(\mu_{Q_1}, \mu_{Q_2}, \dots, \mu_{Q_m})$ ,  $(\mu_{\sigma_{kk}})$  e  $(\sigma_{\sigma_{kk}}^2)$ , como obtidos nos passos 1 e 2, calculam-se os valores de  $\mu_{\sigma_{Q_b}^2}$  e de  $\sigma_{\sigma_{Q_b}^2}^2$  respectivamente através das equações (2.41.a) e (2.41.b). Para melhor compreensão deste procedimento, estas duas equações são rescritas a seguir:

$$\mu_{\sigma_{Q_b}^2} = \mu_{\sigma_{kk}} \cdot \sum_{i=1}^m \mu_{Q_i}^2 \quad (2.42.a)$$

$$\sigma_{\sigma_{Q_b}^2}^2 = \sigma_{\sigma_{kk}}^2 \cdot \sum_{i=1}^m \mu_{Q_i}^4 \quad (2.42.b)$$

3.2) Divide-se a curva normal representativa dos valores de  $\sigma_{Q_b}^2$  em sete partes iguais, como ilustrado na Figura 2.11. Entretanto, deve-se observar que  $\mu_x$  e  $\sigma_x^2$ , desta Figura, representam, respectivamente,  $\mu_{\sigma_{Q_b}^2}$  e  $\sigma_{\sigma_{Q_b}^2}^2$  do modelo físico a ser estudado.

Desta forma, os pontos dos vértices dos sete retângulos do histograma que estão contidos no eixo das abscissas compõem o vetor  $\mathbf{R} = (\mu_{\sigma_{Q_b}^2} - 3,5 \cdot \sigma_{\sigma_{Q_b}^2}, \mu_{\sigma_{Q_b}^2} - 2,5 \cdot \sigma_{\sigma_{Q_b}^2}, \dots, \mu_{\sigma_{Q_b}^2} + 3,5 \cdot \sigma_{\sigma_{Q_b}^2})$  dos elementos limites do histograma.

Este vetor deve ser utilizado para gerar os sete subintervalos do histograma, ou seja,  $[\mu_{\sigma_{Q_b}^2} - 3,5 \cdot \sigma_{\sigma_{Q_b}^2}, \mu_{\sigma_{Q_b}^2} - 2,5 \cdot \sigma_{\sigma_{Q_b}^2}]$ ,  $[\mu_{\sigma_{Q_b}^2} - 2,5 \cdot \sigma_{\sigma_{Q_b}^2}, \mu_{\sigma_{Q_b}^2} - 1,5 \cdot \sigma_{\sigma_{Q_b}^2}]$ ,  $[\mu_{\sigma_{Q_b}^2} - 1,5 \cdot \sigma_{\sigma_{Q_b}^2}, \mu_{\sigma_{Q_b}^2} - 0,5 \cdot \sigma_{\sigma_{Q_b}^2}]$ ,  $[\mu_{\sigma_{Q_b}^2} - 0,5 \cdot \sigma_{\sigma_{Q_b}^2}, \mu_{\sigma_{Q_b}^2}]$ ,  $[\mu_{\sigma_{Q_b}^2}, \mu_{\sigma_{Q_b}^2} + 0,5 \cdot \sigma_{\sigma_{Q_b}^2}]$ ,  $[\mu_{\sigma_{Q_b}^2} + 0,5 \cdot \sigma_{\sigma_{Q_b}^2}, \mu_{\sigma_{Q_b}^2} + 1,5 \cdot \sigma_{\sigma_{Q_b}^2}]$ ,  $[\mu_{\sigma_{Q_b}^2} + 1,5 \cdot \sigma_{\sigma_{Q_b}^2}, \mu_{\sigma_{Q_b}^2} + 2,5 \cdot \sigma_{\sigma_{Q_b}^2}]$ ,  $[\mu_{\sigma_{Q_b}^2} + 2,5 \cdot \sigma_{\sigma_{Q_b}^2}, \mu_{\sigma_{Q_b}^2} + 3,5 \cdot \sigma_{\sigma_{Q_b}^2}]$ .

$\sigma_{\sigma_{Q_b}^2} ] , \dots , [ \mu_{\sigma_{Q_b}^2} + 2,5 \cdot \sigma_{\sigma_{Q_b}^2} , \mu_{\sigma_{Q_b}^2} + 3,5 \cdot \sigma_{\sigma_{Q_b}^2} ]$ . Assim, sabe-se que as probabilidades de ocorrer um evento dentro destes intervalos são dadas, respectivamente, por: 0,006, 0,061, 0,272, 0,382, 0,272, 0,061 e 0,006 (propriedade ii).

Para cada um destes sete intervalos, como representado acima, toma-se o ponto médio de cada um deles para formar o vetor  $S$  ( $\mu_{\sigma_{Q_b}^2} - 3,0 \cdot \sigma_{\sigma_{Q_b}^2} , \mu_{\sigma_{Q_b}^2} - 2,0 \cdot \sigma_{\sigma_{Q_b}^2} , \dots , \mu_{\sigma_{Q_b}^2} + 3,0 \cdot \sigma_{\sigma_{Q_b}^2}$ ) dos elementos mais representativos para a variância da vazão da bomba.

Por outro lado, associando-se o valor médio da vazão da bomba ( $\mu_{Q_b}$ ) com cada um dos sete valores da variância pertencentes ao vetor  $S$  obtêm-se mais sete distribuições normais cujas as médias e o desvios padrões são dados por:

$$[ \mu_{Q_b} , \sigma_{Q_b} = \sqrt{\mu_{\sigma_{Q_b}^2} - 3,0 \cdot \sigma_{\sigma_{Q_b}^2}} ], [ \mu_{Q_b} , \sigma_{Q_b} = \sqrt{\mu_{\sigma_{Q_b}^2} - 2,0 \cdot \sigma_{\sigma_{Q_b}^2}} ], \dots$$

$$[ \mu_{Q_b} , \sigma_{Q_b} = \sqrt{\mu_{\sigma_{Q_b}^2} + 3,0 \cdot \sigma_{\sigma_{Q_b}^2}} ].$$

A probabilidade de ocorrência de cada uma destas sete distribuições são dadas respectivamente pelos valores 0,006, 0,061, 0,272, 0,382, 0,272, 0,061 e 0,006, que são os próprios valores probabilísticos de ocorrência dos desvios padrões pertencentes as mesmas.

Para cada uma destas sete distribuições normais realiza-se uma nova discretização também em sete partes. Assim, por exemplo, para a primeira distribuição, do parágrafo anterior, com média ( $\mu_{Q_b}$ ) e desvio padrão ( $\sigma_{Q_b} =$

$$\sqrt{\mu_{\sigma_{Q_b}^2} - 3,0 \cdot \sigma_{\sigma_{Q_b}^2}} )$$

obtêm-se sete pontos possíveis para a vazão da bomba. Estes

$$\text{pontos estão representados a seguir: } (\mu_{Q_b} - 3,0 \cdot \sqrt{\mu_{\sigma_{Q_b}^2} - 3,0 \cdot \sigma_{\sigma_{Q_b}^2}} , \mu_{Q_b} - 2,0 \cdot$$

$$\sqrt{\mu_{\sigma_{Q_b}^2} - 3,0 \cdot \sigma_{\sigma_{Q_b}^2}} , \dots , \mu_{Q_b} + 3,0 \cdot \sqrt{\mu_{\sigma_{Q_b}^2} - 3,0 \cdot \sigma_{\sigma_{Q_b}^2}} ).$$

Como esta distribuição também é normal, a probabilidade de ocorrência para os sete valores possíveis para a vazão da bomba são respectivamente iguais a 0,006 , 0,061 , 0,272 , 0,382 , 0,272 , 0,061 e 0,006. Por outro lado, como a probabilidade de ocorrência desta distribuição, em relação as outras seis distribuições, é de 0,006, então a probabilidade global de ocorrência destes sete valores para a vazão da bomba são, respectiva e definitivamente, dados por:  $0,006 \cdot 0,006$  ,  $0,006 \cdot 0,061$  ,  $0,006 \cdot 0,272$  ,  $0,006 \cdot 0,382$  ,  $0,006 \cdot 0,272$  ,  $0,006 \cdot 0,061$  e  $0,006 \cdot 0,006$ .

Para a segunda distribuição o cálculo das probabilidades para as sete vazões escolhidas são calculados da mesma forma, porém deve-se observar que a probabilidade de ocorrência desta distribuição em relação as demais é de 0,061 e não 0,006. Desta forma, este procedimento deve ser seguido para as sete distribuições referidas anteriormente.

Como existem sete distribuições possíveis para a ocorrência da vazão da bomba e para cada distribuição foram escolhidos sete pontos, então serão analisados 49 pontos para a vazão da bomba. Assim, para avaliar a potência hidráulica do sistema deve-se multiplicar cada uma destas 49 vazões pelos seus respectivos peso de ocorrência , altura total de energia, densidade do fluido e aceleração da gravidade. Desta forma, ter-se-ão 49 valores ponderados para a potência hidráulica, cuja a soma total destes fornecerá a potência hidráulica ótima para o sistema.

Para facilitar o cálculo da potência hidráulica ótima do sistema, a seguir é apresentado um modelo de planilha que permitirá executar esta simulação.

|  |  |
|--|--|
| $\mu_{Qb}$ [m <sup>3</sup> /s]               |  |
| $\mu_{\sigma_{Qb}^2}$ [m <sup>3</sup> /s]    |  |
| $\sigma_{\sigma_{Qb}^2}$ [m <sup>3</sup> /s] |  |

**Nota :**  $P_h = a \cdot Q_b \cdot H_b$

$a = P_i \cdot P_j \cdot \rho \cdot g$

| <b>Primeira Distribuição</b>                |                                    |  |                           |  |  |  | $\sigma_{Qb} = \sqrt{\mu_{\sigma_{Qb}^2} - 3 \cdot \sigma_{\sigma_{Qb}^2}} =$ [m <sup>3</sup> /s] |
|---|------------------------------------|--|---------------------------|--|--|--|---|
| Vazão da Bomba<br>$Q_b$ [m <sup>3</sup> /s] | Probabilidade da Distribuição (Pi) | Probabilidade dos Valores da Distribuição (Pj) | Altura Total<br>$H_b$ [m] | Densidade do Fluido<br>$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ] | Aceleração da gravidade<br>$g$ [m/s <sup>2</sup> ] | Potência Hidráulica<br>$P_h$ [w]<br><b>a   P<sub>h</sub></b> |   |
| $\mu_{Qb} - 3 \cdot \sigma_{Qb}$            | 0,006                              | 0,006  |                           | 1000   | 9,785  | 0,35226  |   |
| $\mu_{Qb} - 2 \cdot \sigma_{Qb}$            | 0,006                              | 0,061  |                           | 1000   | 9,785  | 3,58131  |   |
| $\mu_{Qb} - \sigma_{Qb}$                    | 0,006                              | 0,272  |                           | 1000   | 9,785  | 15,9691  |   |
| $\mu_{Qb}$                                  | 0,006                              | 0,382  |                           | 1000   | 9,785  | 22,4272  |   |
| $\mu_{Qb} + 1 \cdot \sigma_{Qb}$            | 0,006                              | 0,272  |                           | 1000   | 9,785  | 15,9691  |   |
| $\mu_{Qb} + 2 \cdot \sigma_{Qb}$            | 0,006                              | 0,061  |                           | 1000   | 9,785  | 3,58131  |   |
| $\mu_{Qb} + 3 \cdot \sigma_{Qb}$            | 0,006                              | 0,006  |                           | 1000   | 9,785  | 0,35226  |   |
| <b>Segunda Distribuição</b>                 |                                    |  |                           |  |  |  | $\sigma_{Qb} = \sqrt{\mu_{\sigma_{Qb}^2} - 2 \cdot \sigma_{\sigma_{Qb}^2}} =$ m <sup>3</sup> /s]  |
| Vazão da Bomba<br>$Q_b$ [m <sup>3</sup> /s] | Probabilidade da Distribuição (Pi) | Probabilidade dos Valores da Distribuição (Pj) | Altura Total<br>$H_b$ [m] | Densidade do Fluido<br>$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ] | Aceleração da gravidade<br>$g$ [m/s <sup>2</sup> ] | Potência Hidráulica<br>$P_h$ [w]<br><b>a   P<sub>h</sub></b> |   |
| $\mu_{Qb} - 3 \cdot \sigma_{Qb}$            | 0,061                              | 0,006  |                           | 1000   | 9,785  | 3,58131  |   |
| $\mu_{Qb} - 2 \cdot \sigma_{Qb}$            | 0,061                              | 0,061  |                           | 1000   | 9,785  | 36,4010  |   |
| $\mu_{Qb} - \sigma_{Qb}$                    | 0,061                              | 0,272  |                           | 1000   | 9,785  | 162,353  |   |
| $\mu_{Qb}$                                  | 0,061                              | 0,382  |                           | 1000   | 9,785  | 228,010  |   |
| $\mu_{Qb} + 1 \cdot \sigma_{Qb}$            | 0,061                              | 0,272  |                           | 1000   | 9,785  | 162,353  |   |
| $\mu_{Qb} + 2 \cdot \sigma_{Qb}$            | 0,061                              | 0,061  |                           | 1000   | 9,785  | 36,4099  |   |
| $\mu_{Qb} + 3 \cdot \sigma_{Qb}$            | 0,061                              | 0,006  |                           | 1000   | 9,785  | 3,58131  |   |

| <b>Terceira Distribuição</b> $\sigma_{Qb} = \sqrt{\mu \sigma_{Qb}^2 - \sigma \sigma_{Qb}^2} = \quad [m^3/s]$       |                                       |   |                           |  |  |                                  |                          |
|--|---------------------------------------|---|---------------------------|--|--|----------------------------------|--------------------------|
| Vazão da Bomba<br>$Q_b [m^3/s]$  | Probabilidade da Distribuição<br>(Pi) | Probabilidade dos Valores da Distribuição<br>(Pj) | Altura Total<br>$H_b [m]$ | Densidade do Fluido<br>$\rho [kg/m^3]$ | Aceleração da gravidade<br>$g [m/s^2]$ | Potência Hidráulica<br>$P_h [w]$ | <b>a   P<sub>h</sub></b> |
| $\mu_{Qb} - 3 \cdot \sigma_{Qb}$   | 0,272                                 | 0,006   |                           | 1000                                   | 9,785                                  | 15,969                           | 1                        |
| $\mu_{Qb} - 2 \cdot \sigma_{Qb}$   | 0,272                                 | 0,061   |                           | 1000                                   | 9,785                                  | 162,35                           | 1                        |
| $\mu_{Qb} - \sigma_{Qb}$   | 0,272                                 | 0,272   |                           | 1000                                   | 9,785                                  | 723,93                           | 1                        |
| $\mu_{Qb}$   | 0,272                                 | 0,382   |                           | 1000                                   | 9,785                                  | 1016,7                           | 1                        |
| $\mu_{Qb} + 1 \cdot \sigma_{Qb}$   | 0,272                                 | 0,272   |                           | 1000                                   | 9,785                                  | 723,93                           | 1                        |
| $\mu_{Qb} + 2 \cdot \sigma_{Qb}$   | 0,272                                 | 0,061   |                           | 1000                                   | 9,785                                  | 162,35                           | 1                        |
| $\mu_{Qb} + 3 \cdot \sigma_{Qb}$   | 0,272                                 | 0,006   |                           | 1000                                   | 9,785                                  | 15,969                           | 1                        |
| <b>Quarta Distribuição</b> $\sigma_{Qb} = \sqrt{\mu \sigma_{Qb}^2 - 0 \cdot \sigma \sigma_{Qb}^2} = \quad [m^3/s]$ |                                       |   |                           |  |  |                                  |                          |
| Vazão da Bomba<br>$Q_b [m^3/s]$  | Probabilidade da Distribuição<br>(Pi) | Probabilidade dos Valores da Distribuição<br>(Pj) | Altura Total<br>$H_b [m]$ | Densidade do Fluido<br>$\rho [kg/m^3]$ | Aceleração da gravidade<br>$g [m/s^2]$ | Potência Hidráulica<br>$P_h [w]$ | <b>a   P<sub>h</sub></b> |
| $\mu_{Qb} - 3 \cdot \sigma_{Qb}$   | 0,382                                 | 0,006   |                           | 1000                                   | 9,785                                  | 22,427                           | 1                        |
| $\mu_{Qb} - 2 \cdot \sigma_{Qb}$   | 0,382                                 | 0,061   |                           | 1000                                   | 9,785                                  | 228,01                           | 1                        |
| $\mu_{Qb} - \sigma_{Qb}$   | 0,382                                 | 0,272   |                           | 1000                                   | 9,785                                  | 1016,7                           | 1                        |
| $\mu_{Qb}$   | 0,382                                 | 0,382   |                           | 1000                                   | 9,785                                  | 1427,9                           | 1                        |
| $\mu_{Qb} + 1 \cdot \sigma_{Qb}$   | 0,382                                 | 0,272   |                           | 1000                                   | 9,785                                  | 1016,7                           | 1                        |
| $\mu_{Qb} + 2 \cdot \sigma_{Qb}$   | 0,382                                 | 0,061   |                           | 1000                                   | 9,785                                  | 228,01                           | 1                        |
| $\mu_{Qb} + 3 \cdot \sigma_{Qb}$   | 0,382                                 | 0,006   |                           | 1000                                   | 9,785                                  | 22,427                           | 1                        |

| <p style="text-align: center;"><b>Quinta Distribuição</b> <span style="float: right;"><math>\sigma_{Qb} = \sqrt{\mu \sigma_{Qb}^2 + \sigma \sigma_{Qb}^2} =</math> [m<sup>3</sup>/s]</span></p>        |                                    |  |                           |  |  |                                   |                           |
|--|------------------------------------|--|---------------------------|--|--|-----------------------------------|---------------------------|
| Vazão da Bomba<br>$Q_b$ [m <sup>3</sup> /s]  | Probabilidade da Distribuição (Pi) | Probabilidade dos Valores da Distribuição (Pj) | Altura Total<br>$H_b$ [m] | Densidade do Fluido<br>$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ] | Aceleração da gravidade<br>$g$ [m/s <sup>2</sup> ] | Potência Hidráulica<br>$P_h$ [kw] | $2.a \cdot 10^{-3}   P_h$ |
| $\mu_{Qb} - 3 \cdot \sigma_{Qb}$   | 0,272                              | 0,006  |                           | 1000   | 9,785  | 15,969                            |                           |
| $\mu_{Qb} - 2 \cdot \sigma_{Qb}$   | 0,272                              | 0,061  |                           | 1000   | 9,785  | 162,35                            |                           |
| $\mu_{Qb} - \sigma_{Qb}$   | 0,272                              | 0,272  |                           | 1000   | 9,785  | 723,93                            |                           |
| $\mu_{Qb}$   | 0,272                              | 0,382  |                           | 1000   | 9,785  | 1016,7                            |                           |
| $\mu_{Qb} + 1 \cdot \sigma_{Qb}$   | 0,272                              | 0,272  |                           | 1000   | 9,785  | 723,93                            |                           |
| $\mu_{Qb} + 2 \cdot \sigma_{Qb}$   | 0,272                              | 0,061  |                           | 1000   | 9,785  | 162,35                            |                           |
| $\mu_{Qb} + 3 \cdot \sigma_{Qb}$   | 0,272                              | 0,006  |                           | 1000   | 9,785  | 15,969                            |                           |
| <p style="text-align: center;"><b>Sexta Distribuição</b> <span style="float: right;"><math>\sigma_{Qb} = \sqrt{\mu \sigma_{Qb}^2 + 2 \cdot \sigma \sigma_{Qb}^2} =</math> [m<sup>3</sup>/s]</span></p> |                                    |  |                           |  |  |                                   |                           |
| Vazão da Bomba<br>$Q_b$ [m <sup>3</sup> /s]  | Probabilidade da Distribuição (Pi) | Probabilidade dos Valores da Distribuição (Pj) | Altura Total<br>$H_b$ [m] | Densidade do Fluido<br>$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ] | Aceleração da gravidade<br>$g$ [m/s <sup>2</sup> ] | Potência Hidráulica<br>$P_h$ [kw] | $a \cdot 10^{-3}   P_h$   |
| $\mu_{Qb} - 3 \cdot \sigma_{Qb}$   | 0,061                              | 0,006  |                           | 1000   | 9,785  | 3,58131                           |                           |
| $\mu_{Qb} - 2 \cdot \sigma_{Qb}$   | 0,061                              | 0,061  |                           | 1000   | 9,785  | 36,4010                           |                           |
| $\mu_{Qb} - \sigma_{Qb}$   | 0,061                              | 0,272  |                           | 1000   | 9,785  | 162,353                           |                           |
| $\mu_{Qb}$   | 0,061                              | 0,382  |                           | 1000   | 9,785  | 228,010                           |                           |
| $\mu_{Qb} + 1 \cdot \sigma_{Qb}$   | 0,061                              | 0,272  |                           | 1000   | 9,785  | 162,353                           |                           |
| $\mu_{Qb} + 2 \cdot \sigma_{Qb}$   | 0,061                              | 0,061  |                           | 1000   | 9,785  | 36,4099                           |                           |
| $\mu_{Qb} + 3 \cdot \sigma_{Qb}$   | 0,061                              | 0,006  |                           | 1000   | 9,785  | 3,58131                           |                           |

| <b>Sétima Distribuição</b>                                     |  |  |                           |  |  |  | $\sigma_{Qb} = \sqrt{\mu_{\sigma_{Qb}}^2 + 3 \cdot \sigma_{\sigma_{Qb}}^2} =$ [m <sup>3</sup> /s] |
|--|--|--|---------------------------|--|--|--|---|
| Vazão da Bomba<br>$Q_b$ [m <sup>3</sup> /s]                    | Probabilidade da Distribuição<br>( $P_i$ ) | Probabilidade dos Valores da Distribuição<br>( $P_j$ ) | Altura Total<br>$H_b$ [m] | Densidade do Fluido<br>$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ] | Aceleração da gravidade<br>$g$ [m/s <sup>2</sup> ] | Potência Hidráulica<br>$P_h$ [kw]            |   |
|  |  |  |                           |  |  | <b>a .10<sup>-3</sup>   <math>P_h</math></b> |   |
| $\mu_{Qb} - 3 \cdot \sigma_{Qb}$                               | 0,006                                      | 0,006  |                           | 1000   | 9,785  | 0,35226                                      |   |
| $\mu_{Qb} - 2 \cdot \sigma_{Qb}$                               | 0,006                                      | 0,061  |                           | 1000   | 9,785  | 3,58131                                      |   |
| $\mu_{Qb} - \sigma_{Qb}$                                       | 0,006                                      | 0,272  |                           | 1000   | 9,785  | 15,9691                                      |   |
| $\mu_{Qb}$   | 0,006                                      | 0,382  |                           | 1000   | 9,785  | 22,4272                                      |   |
| $\mu_{Qb} + \sigma_{Qb}$                                       | 0,006                                      | 0,272  |                           | 1000   | 9,785  | 15,9691                                      |   |
| $\mu_{Qb} + 2 \cdot \sigma_{Qb}$                               | 0,006                                      | 0,061  |                           | 1000   | 9,785  | 3,58131                                      |   |
| $\mu_{Qb} + 3 \cdot \sigma_{Qb}$                               | 0,006                                      | 0,006  |                           | 1000   | 9,785  | 0,35226                                      |   |
| <b>Potência Hidráulica = Ótima <math>\Sigma P_h</math> [w]</b> |  |  |                           |  |  |  |   |

A planilha acima representa de forma organizada a expressão geral para o cálculo da potência hidráulica ótima do sistema, que matematicamente pode ser expressa por:

$$\mu_{Ph} = \sum_{i=1}^7 \sum_{j=1}^7 P_i \cdot P_j \cdot P_{hij} \quad (2.43)$$

Onde,

$\mu_{Ph}$  - Potência hidráulica ótima do sistema;

$P_i$  - Probabilidade de ocorrência da distribuição;

$P_j$  - Probabilidade de ocorrência dos valores da distribuição;

$P_{hij}$  - Potência hidráulica associada à distribuição i e ao elemento j da distribuição.

A equação (2.43) representa de forma bastante resumida todo o raciocínio desenvolvido nesta seção para obter a simulação do sistema. Esta expressão é, em essência, o modelo simplificado para o estudo do comportamento típico do sistema.

Como pôde ser observado, este trabalho apresentou, três metodologias para a análise de sistema de abastecimento de água potável por bombeamento: o método de Monte Carlo para ser aplicado a uma instalação em particular, o método de transposição dos resultados para a análise de outras instalações e o método simplificado da discretização.

Desta forma, estas metodologias poderão ser utilizadas separadamente com o intuito de avaliar o sistema de vários pontos de vistas diferentes e com isto verificar a própria consistência dos modelos apresentados até aqui.

Deve ser mencionado que o modelo simplificado não foi implementado em computador durante a realização deste trabalho. Isto pode ser justificado da seguinte forma:

- a) a aplicação direta do Método de Monte Carlo e a realização da Transposição dos Resultados foram mais que suficientes para os propósitos desta Dissertação;
- b) o modelo de Monte Carlo por si só já exigiu muito trabalho computacional de tal forma que não houve tempo hábil para o desenvolvimento computacional do modelo simplificado.

Desta forma, o modelo da discretização fica como recomendação para trabalhos futuros.

## Capítulo 3

### Redes Neurais Artificiais

#### 3.1) Introdução

A elaboração e criação de máquinas inteligentes começou a florescer a partir do momento em que os pesquisadores de Inteligência Artificial começaram a se interessar pelo estudo e funcionamento do cérebro humano, pois este é o único modelo que ocorre naturalmente. Desde então, pesquisadores da área vêm tentando simular parcialmente o funcionamento do cérebro diretamente em um computador. Dentro deste contexto, deu-se origem aos vários modelos de Redes Neurais Artificiais conhecidos atualmente.

A idéia de se criar uma máquina inteligente com neurônios artificiais, segundo Rich (1993) teve seus primeiros resultados obtidos por McCulloch e Pitts (1943), Block (1962) e Rosenblatt (1962). Entretanto as pesquisas nesta área só foram acentuadas a partir da década de 80 devido a dois motivos principais: o aparecimento de computadores mais velozes e a descoberta de novas estruturas de redes com algoritmos de aprendizagem mais poderosos.

Em redes neurais artificiais interessa basicamente a exibição de um comportamento inteligente. Para que esta característica seja atingida, existem atualmente dois paradigmas em Inteligência Artificial que tentam justificar como tal comportamento é possível de implementações artificiais em computadores.

- a) Concepção Simbolista \_ Essa abordagem vê o problema como um processo de resolução puramente algorítmico. Este paradigma foi fortemente influenciado pela Psicologia.
- b) Abordagem Conexionista \_ Esta idéia aborda o fato de que é impossível reduzir a algoritmos as diversas tarefas que a mente humana realiza com extrema facilidade e rapidez. Nesta visão, é a capacidade do cérebro de se auto-organizar diante de situações distintas que deve ser reproduzida pelo processo

computacional. Dentro deste contexto pode-se citar as Redes Neurais Artificiais.

Rede Neural Artificial foi utilizada neste trabalho para as interpolações do diagrama colina das bombas centrífugas (descreve o campo básico de funcionamento destas máquinas) e do diagrama de Moody (determina o fator de atrito de tubulações no cálculo da perda de carga). Essas interpolações tiveram por objetivo auxiliar na simulação computacional do modelo matemático descrito no Capítulo 2 desta Dissertação.

Este capítulo abordará resumidamente a teoria de Redes Neurais utilizada na interpolação de funções e posteriormente os resultados gráficos obtidos para o caso particular dessa Dissertação.

### **3.2) Uma Visão Geral Sobre Redes Neurais**

Redes Neurais Artificiais são sistemas computacionais que conseguem imitar as habilidades do sistema nervoso biológico, através de um grande número de simples neurônios artificiais conectados entre si. Cada neurônio artificial realiza basicamente duas tarefas: agregação de suas entradas a partir de outros neurônios, ou do ambiente externo, e geração de uma saída a partir de entradas agregadas.

Os neurônios artificiais recebem informações de sensores ou de outros neurônios artificiais, realizando operações simples sobre estes dados, e transmitem estas novas informações para outros neurônios artificiais. Isto permite realizar um processamento conjunto de informações que permitirá ao computador obter rapidamente (após o treinamento da rede) interpretações desejadas na manipulação de grandes bancos de dados.

Através destas redes de estrutura neural simples tem sido mostrado ser possível aproximar muitas funções contínuas, para qualquer grau de exatidão, pela escolha de um número apropriado de neurônios.

Toda rede neural artificial possui três características básicas que contribuem para sua habilidade funcional: arquitetura (ou estrutura), dinâmica e aprendizado.

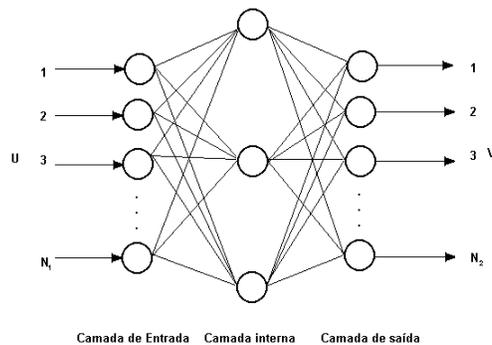
Redes Neurais podem ser classificadas em duas categorias principais (baseadas em suas estruturas de conexões): *feedforward* e *feedback*. Redes *feedforward* são mais

comumente utilizadas, principalmente pela dificuldade do treinamento das redes *feedback*, embora estas últimas sejam mais convenientes para a representação dinâmica de sistemas.

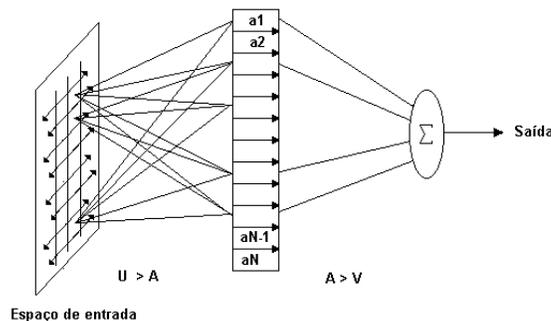
Há também segundo Linkens (1996) diferentes tipos de projetos de redes. Estas incluem: BPN (*Back-propagation networks*), CPN (*Counterpropagation networks*), CMA (*Cerebellar model articulation controller*) e RBF (*Radial basis function network*).

Além disso, os diferentes tipos de rede representam duas diferentes abordagens para o aprendizado: redes de aprendizado global e redes de aprendizado local. Em aprendizado global, tal como a BPN, cada peso das conexões afeta todas as saídas da rede, enquanto que para aprendizado local, tais como CPN, CMAC e RBF, uma dada conexão de peso é efetiva somente sobre uma parte do espaço de entrada e, portanto, afeta somente as saídas conectadas com aquela parte.

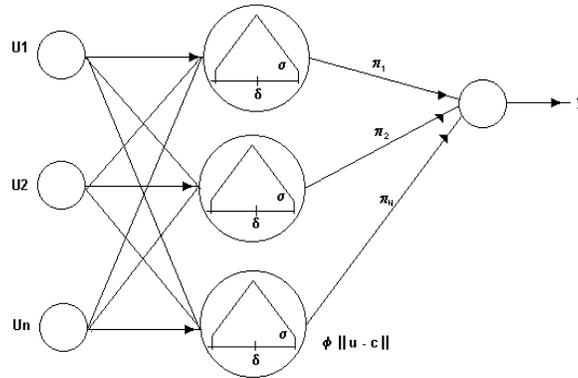
É reconhecido que o projeto de rede local possui maiores implicações para o aprendizado em controle de tempo real. A rede utilizada neste trabalho foi a do tipo BPN e, portanto, de aprendizado global. A seguir são apresentadas as arquiteturas de algumas das redes já citadas nesta seção.



**Figura 3.1 - Estrutura de Uma Rede tipo BPN**



**Figura 3.2 - Estrutura de Uma Rede Tipo CMAC**



**Figure 3.3 - Estrutura de uma Rede Tipo RBF**

Toda rede deve possuir uma regra de aprendizado de tal forma que, apresentados alguns padrões de entrada e saída, ela seja capaz de abstrair um determinado conhecimento. Quando aplicado um algoritmo de aprendizado a uma determinada rede neural diz-se, então, que ela está sendo treinada.

O interesse pelo mecanismo de aprendizado foi inicialmente proposto por Hebb, que apresentou uma regra de aprendizado conhecida atualmente como regra de aprendizagem Hebbiana. Hebb demonstrou que a “capacidade de aprendizagem em redes neurais pode ser atingida através da variação dos pesos das conexões entre os neurônios”, como será ilustrado mais adiante. A regra Hebbiana tem sido utilizada em vários algoritmos de aprendizagem em redes neurais.

Como a arquitetura de rede utilizada neste trabalho foi a do tipo BPN, a seguir será dada uma visão mais detalhada a respeito desta rede segundo Nascimento (1995) e Loesch (1996).

### 3.3) A Rede Back-Propagation

Estrutura (ou arquitetura), Dinâmica e aprendizagem são os elementos mais relevantes para o correto entendimento das redes neurais artificiais (em particular a do tipo BPN). Em função disto, cada um destes elementos será abordado separadamente, porém deve-se lembrar que eles são combinados de tal forma a permitirem o aprendizado dos sistemas computacionais.

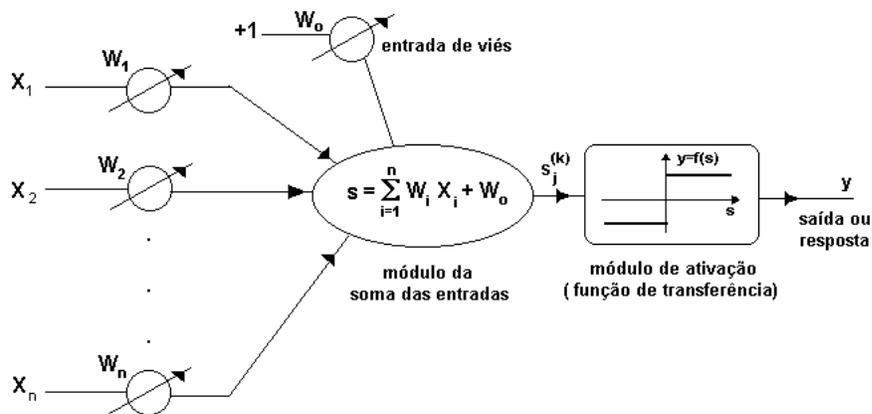
### 3.3.1) A Estrutura da Rede Back-Propagation

A estrutura de uma rede pode ser definida como o seu “esqueleto” ou aparência física típica. Para melhor compreensão deste fato, pode-se dividi-la em três níveis:

- Micro-Estrutura - Representa as características individuais de cada neurônio na rede.
- Meso-Estrutura - É o nível no qual a organização e arranjos físicos dos neurônios é considerado na rede.
- Macro-Estrutura - É a forma como redes diferentes são colocadas juntas para efetuarem uma tarefa de grande escala.

#### 3.3.1.1) Micro-Estrutura Neural

Um neurônio artificial, conhecido também por elemento de processamento (EP), é inspirado no próprio modelo biológico e pode ser observado na Figura abaixo:

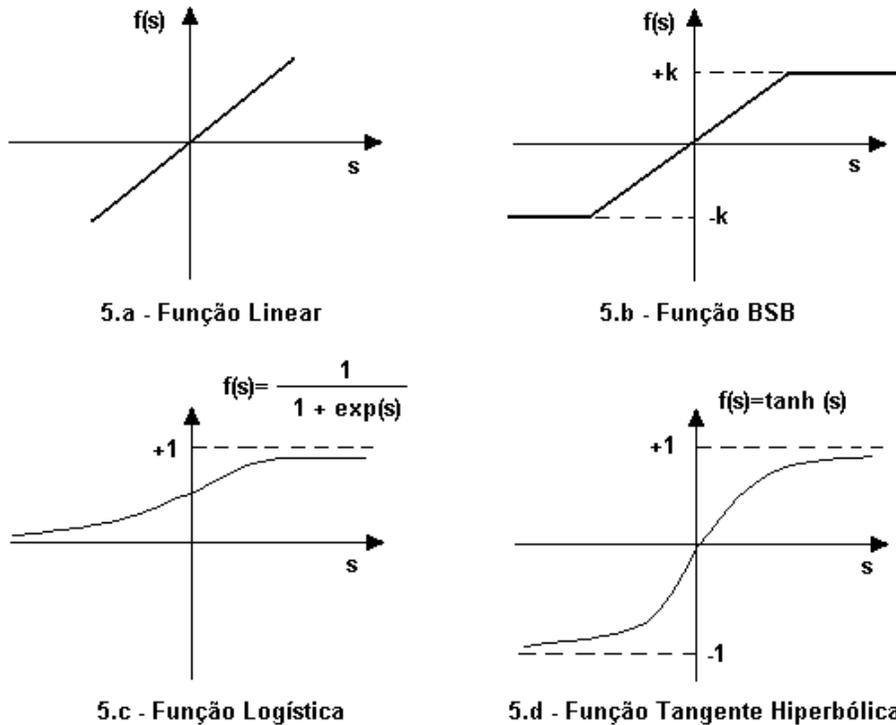


**Figura 3.4 - Modelo de Neurônio Artificial Com Entrada de Viés.**

Como pode ser observado na Figura 3.4, o neurônio recebe os dados de entrada do vetor  $\mathbf{X}=(x_1, x_2, \dots, x_n)$  provenientes de outros neurônios e realiza a média ponderada destas entradas em relação ao vetor de pesos das conexões  $\mathbf{W}=\{ w_1 , w_2 , \dots , w_n \}$ . O

resultado  $s$  desta operação é aplicado à função de ativação, também conhecida como função de transferência.

O resultado final  $y$  na saída do neurônio é chamado de ativação do neurônio. As funções de transferência mais utilizadas em redes neurais artificiais são apresentadas na Figura 3.5.



**Figura 3.5 - Exemplos Mais Comuns de Funções de Transferências Utilizadas Em Sistemas Computacionais de Redes Neurais.**

Todas as funções de transferência contínuas em forma de S e limitadas por duas assíntotas horizontais, por exemplo (5.c) e (5.d), são denominadas funções sigmoidais.

### 3.3.1.2) Meso-Estrutura Neural

O modo como os arranjos dos vários EPs ou neurônios artificiais são interligados para a elaboração física da rede é denominado nível meso-estrutural. Neste nível de classificação é importante considerar questões como: número de camadas da rede, número de neurônios por camada e tipo de conexões entre camadas.

Estas são as características básicas para modificação e escolha de uma rede neural tipo BPN. As considerações levantadas a nível meso-estruturais são importantes para distinguir os vários tipos de redes existentes.

A estrutura de uma rede BPN pode ser vista na Figura 3.1. É importante observar que, após o treinamento desta rede, os sinais de processamento interno caminham em uma única direção, neste caso, da esquerda para a direita.

### **3.3.1.3) Macroestrutura Neural**

Macroestrutura neural é a forma de se colocar juntas diferentes redes na execução de diferentes tarefas para atingir bons desempenhos. Existem dois tipos de macroestrutura: redes fortemente acopladas e suavemente acopladas. O primeiro tipo leva ao surgimento de uma nova rede híbrida. As estruturas suavemente acopladas conectam redes que guardam suas distintas estruturas.

### **3.3.2) Dinâmica da Rede Back-Propagation**

A forma matemática com que a rede computa valores é especificada pela dinâmica da rede. Dinâmica e estrutura combinadas especificam a habilidade funcional da rede e portanto, sua potencialidade.

Neste sentido pode-se dizer que a dinâmica está intimamente relacionada com sua estrutura. Por exemplo, em uma rede BPN todo fluxo de informações é passado para frente. Não existe uma comunicação lateral entre os neurônios da mesma camada e não existe fluxo de informações para trás como nas redes *feedback*.

É importante observar que em uma rede *feedforward* multi-camadas (BPN) o fluxo de informações é bastante simples e, portanto, não existe uma medida de estabilidade. Caso uma rede seja conectada lateralmente a sua estabilidade deverá ser considerada.

### 3.3.3) Treinamento da Rede Back-Propagation

O aprendizado de uma rede neural baseia-se na mudança de comportamento (neste caso os pesos das conexões do vetor  $\mathbf{W}$ ) em procedimentos de treinamento. Assim, a performance da rede é medida antes e depois da mudança e esta diferença indicará quanto a rede aprendeu.

Na rede BPN, que possui processamento *feedforward* (após o seu treinamento), é treinada, em geral, por algoritmos *feedback* (processamento para trás). Assim, a diferença entre o estado atual e o anterior é de alguma forma medida na saída da rede e repassada para trás e o algoritmo de treinamento tenta reajustar de alguma forma os pesos das conexões no sentido de minimizar esta diferença. Neste momento é interessante mencionar que uma forma bastante utilizada para medir a saída dos valores da rede é a soma dos erros quadráticos entre os valores obtidos pela rede e os padrões considerados.

Desta forma, os ajustes dos pesos são feitos de trás para frente durante o treinamento da rede e é importante observar que este procedimento, na maioria das vezes, deve ser repetido muitas e muitas vezes até a obtenção de valores satisfatórios.

Este tipo de treinamento é iterativo. Entretanto, deve-se observar que o treinamento excessivo de uma rede, muitas vezes, leva a bons resultados em relação aos padrões utilizados, mas não na representação do conjunto de testes após o seu treinamento.

Outra consideração importante sobre o treinamento das redes neurais é que sempre deve-se guardar um conjunto de valores para o teste final da rede. Este conjunto de dados não deve ser utilizado durante o treinamento da rede. Espera-se que a rede seja capaz de verificar estes últimos valores também.

Finalmente, existem vários algoritmos de treinamento para uma mesma arquitetura de rede. A seguir são citados os principais algoritmos para o treinamento de uma rede BPN.

- a) Algoritmo de treinamento *Backpropagation*.
- b) Algoritmo de treinamento *Backpropagation* com *Momentum*.
- c) Algoritmo de treinamento *Fast Backpropagation*.
- d) Algoritmo de treinamento de *Levenberg-Marquardt*.

Estes algoritmos de treinamento são distintos entre si e todos eles podem ser utilizados no treinamento da rede BPN. A formulação matemática na qual estes algoritmos são apoiados foge aos objetivos deste trabalho por dois motivos: primeiro que já estão disponíveis em softwares apropriados (por exemplo, no MATLAB V4.0) e segundo que a intenção desta Dissertação de Mestrado é a aplicação de redes neurais à engenharia e não desenvolver programas computacionais a respeito.

Entretanto, na próxima seção serão comentadas algumas características de desempenho computacional destes quatro algoritmos na interpolação de funções complexas.

### **3.4) Interpolação de Funções por Redes Neurais**

A interpolação de funções por Redes Neurais é bastante útil quando a função em questão for composta por mais de uma variável independente. É importante observar que funções a mais de uma variável *dependente* também podem ser interpoladas por esta técnica, porém, isto não será o caso do presente trabalho.

Como já dito anteriormente, o diagrama colina da bomba da instalação hidráulica da COPASA, como descrito no Capítulo 2, foi interpolado por esta técnica.

A rede empregada foi a *Backpropagation* e o algoritmo de treinamento mais eficiente para realizar o aprendizado da rede foi o *Levenberg-Marquardt*. A justificativa disto é a seguinte:

- a) Os algoritmos de treinamento *Backpropagation* e *Backpropagation com Momentum* só obtêm resultados satisfatórios quando a função empregada for a uma variável independente e uma variável dependente. Assim mesmo, o tempo de processamento exigido é bastante elevado e os resultados finais também poderão não ser satisfatórios, e portanto, outros treinamentos serão exigidos até a obtenção dos bons resultados. Por exemplo, uma amostra de quinze pontos de uma função ordinária poderá exigir 45 minutos de treinamento no algoritmo *Backpropagation* e 5 minutos de treinamento no *Bachpropagation com Momentum*.

- b) O algoritmo *Fast Backpropagation* apresentou um resultado satisfatório. Para funções de uma variável dependente e uma independente seu desempenho é bastante bom e o tempo de processamento bastante inferior aos dois anteriores. Por exemplo, para funções ordinárias com uma amostragem de quinze pontos o treinamento demonstrou ser praticamente instantâneo. Para funções de mais de uma variável dependente, a convergência demonstrou-se ou muito lenta (exigindo horas de treinamento) ou impossível (convergência para um mínimo local).
- c) O algoritmo *Levenberg-Marquardt* demonstrou ser o melhor deles pelas seguintes razões: A convergência de uma função ordinária é praticamente instantânea, durante o treinamento da rede, e é obtida praticamente na primeira tentativa. Para funções de duas ou três variáveis independentes (caso típico dos diagramas de campo básico de funcionamento das máquinas de fluxo em geral) a convergência também demonstrou ser bastante rápida e exigiu somente alguns segundos de treinamento. Entretanto, o resultado obtido no treinamento poderá não ser satisfatório. Quando isso ocorrer, um novo treinamento deverá ser realizado até a obtenção dos bons resultados.

Em alguns casos a repetição do treinamento deverá ser realizada 20 ou até mesmo 50 ou mais vezes até que sejam obtidos os pesos ideais para a conexão dos neurônios da rede. Por esta razão, este método de interpolação pode exigir muito tempo do programador e também muita paciência.

Treinar uma rede é ter muita esperança de que em algum momento e em alguns dos treinamentos o sucesso será alcançado. Nunca se sabe quando uma rede irá convergir, mas muito provavelmente, isto ocorrerá de alguma forma.

Os resultados obtidos, após o treinamento, poderão ter algum tipo de ruído indesejável, uma vez que a solução exata do problema poderá não ser alcançada. Entretanto, os resultados finais podem ser classificados como muito bons.

Assim sendo, é importante desenvolver um software que apresente graficamente os resultados obtidos. Isto tem por objetivo agilizar a interpretação

dos resultados alcançados pelo treinamento da rede, e caso estes sejam insatisfatórios, prosseguir imediatamente com os novos treinamentos.

Outro fator importante a ser observado é que caso a rede, depois de várias e várias tentativas e erros, não atinja os resultados desejados, então poder-se-á ainda optar por uma ou mais das seguintes alternativas:

- a) mudar o número de neurônios das camadas internas;
- b) alterar a função de transferência dos neurônios da rede;
- c) permutar a ordem do conjunto de dados utilizados durante o treinamento. Aqui é importante ressaltar que a ordenação aleatório do conjunto de dados é a mais promissora de todas.
- d) Aumentar a amostra de dados. Caso existam os diagramas originais, então bastará aumentar a leitura de pontos dos mesmos.
- e) persistir no treinamento. Empenhar uma semana ou mais de trabalho na interpolação destes resultados. Desta forma, é conveniente utilizar Redes Neurais somente para situações complexas onde a interpolação analítica não é possível. Por exemplo, interpolar varias funções (ao mesmo tempo) em uma única rede (caso que será visto adiante na interpolação de diagramas de turbinas e que foi desenvolvida nesta Dissertação).

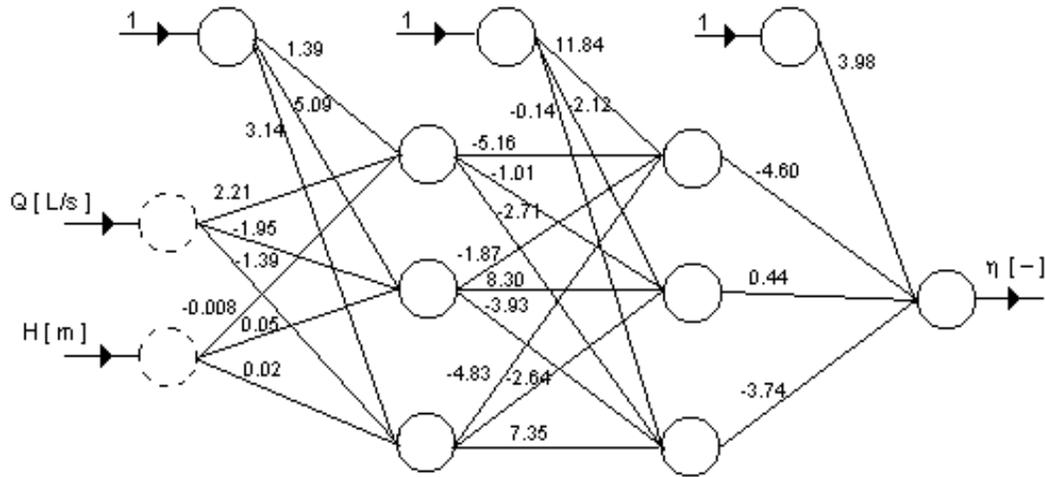
Apresentadas estas observações e conclusões, que foram descobertas após várias manipulações sobre o software de Redes Neurais contido no aplicativo MATLAB, então são apresentado, a seguir, os resultados de interesse obtidos para esta Dissertação.

A Figura 3.6 representa a rede obtida para interpolar o diagrama colina da bomba centrífuga utilizada no bairro Vista Verde. Como pode ser observado, esta é uma rede com duas camadas internas (três neurônios em cada camada), uma camada de entrada (dois neurônios) e uma camada de saída.

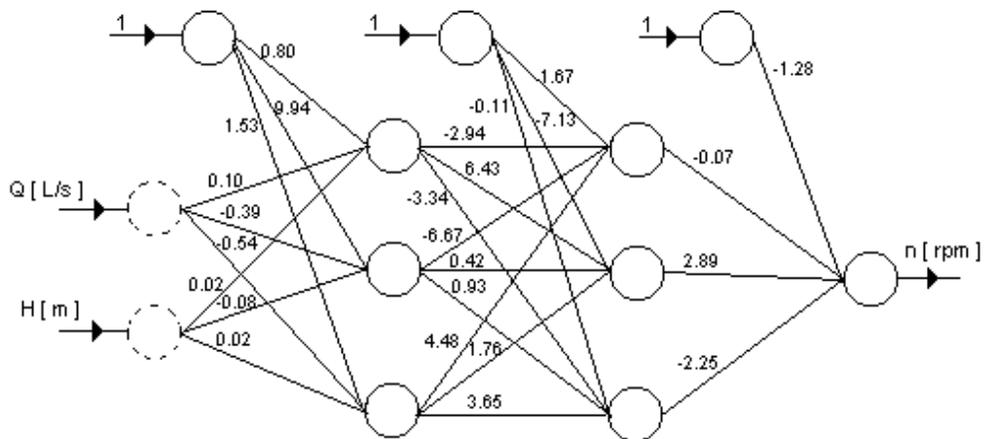
Na entrada da rede tem-se a vazão da bomba ( $Q$ ) dada em litros por segundo e a pressão total ( $H$ ) em metros. Após o fluxo de sinal caminhar, da esquerda para a direita na rede em questão, então ter-se-á o rendimento ou eficiência da bomba ( $\eta$ ) na saída da mesma.

A função de transferência de cada neurônio da rede está representada na Figura 3.8. Como pode ser observado, a função Sigmoidal Logística é aplicável a todos estes

neurônios. A Figura 3.7 representa também o diagrama colina da bomba instalada no bairro Vista Verde, entretanto observe que na saída da rede tem-se agora a rotação da bomba expressa em rotações por minuto [rpm].

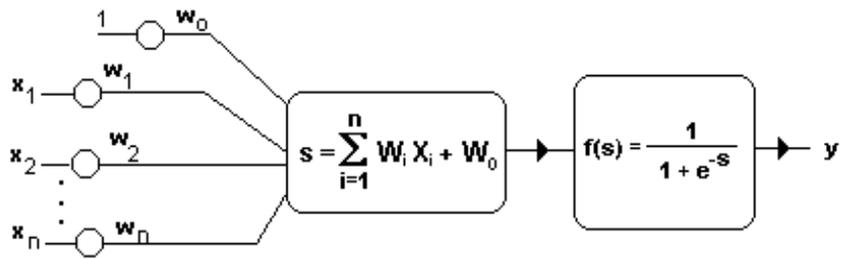


**Figura 3.6 - Rede Neural Com Duas Entradas ( Vazão da Bomba e Pressão Total) e Uma Saída (Rendimento) Para a Representação do Diagrama Colina da Bomba Empregada No Bairro Vista Verde.**



**Figura 3.7 - Rede Neural Com Duas Entradas (Vazão da Bomba e Pressão Total) e Uma Saída (Rotação) Para a Representação do Diagrama Colina da Bomba Empregada no Bairro Vista Verde.**

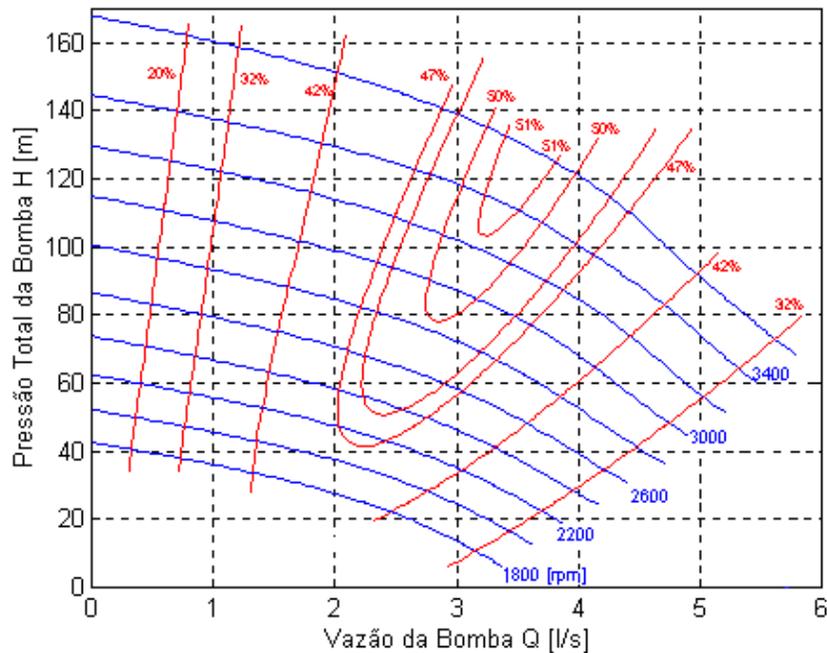
### Função de Transferência Sigmoidal Logística



**Figura 3.8 - Função de Transferência Aplicável a Cada Um dos Neurônios Representados nas Redes das Figuras 3.6 e 3.7.**

Os resultados obtidos pelas redes representadas nas Figuras 3.6 e 3.7 praticamente são os mesmos que aqueles obtidos pela leitura direta do gráfico original (ver apêndice B). Para fins de comparação com o diagrama original, a Figura abaixo apresenta o gráfico colina gerado pelas redes mencionadas neste parágrafo.

### Campo Básico de Funcionamento da Bomba Centrífuga

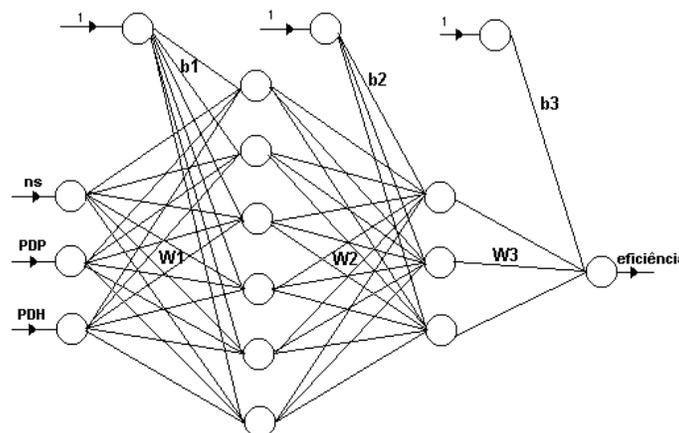


**Figura 3.9 - Diagrama Colina que Representa o Campo Básico de Funcionamento da Bomba Centrífuga Utilizada no Bairro Vista Verde (Itajubá/MG).**

Neste momento é interessante observar que as duas redes, apresentadas anteriormente, só conseguem interpolar o diagrama referente única e exclusivamente à bomba centrífuga instalada no bairro Vista Verde. Desta forma, como ficaria a interpolação de outros diagramas referentes às outras bombas encontradas no mercado? Esta pergunta é bastante importante, pois se for possível interpolar em uma única rede os diagramas de uma faixa distinta de bombas, então poder-se-á generalizar o modelo de simulação, apresentado no Capítulo 2 desta Dissertação, para outras instalações hidráulicas. Assim, a Figura 3.10 responde a esta pergunta de forma positiva. Entretanto, como não foi possível encontrar variações de diagramas para bombas foram então utilizados, como teste para verificação desta técnica, os diagramas referentes as turbinas hidráulicas.

Não é intenção deste trabalho explicar a teoria referente as turbinas, mas, em poucas palavras, é suficiente saber que cada turbina pode ser caracterizada por um coeficiente adimensional denominado  $n_s$ . Desta forma, uma única turbina não pode ter dois ou mais valores distintos para seu  $n_s$  característico.

Como pode ser observado na rede da Figura 3.10, ela possui três entradas e uma saída. As entradas da rede são dadas pelo  $n_s$  (coeficiente adimensional), PHP (*Percent Design Head*) e PDP (*Percent Design Power*) e a camada de saída é dada pela eficiência da máquina em questão.



**Figura 3.10- Rede Neural Com Três Entradas ( $n_s$ , PHP e PDH) e Uma Saída (Eficiência) Para Representação dos Diagramas Colina Referentes às Turbinas Hidráulicas.**

Esta rede possui duas camadas internas, sendo que a primeira possui seis neurônios e a segunda apenas três. Como são vários os pesos que representam esta rede, então, optou-se por representá-los na forma matricial, como pode ser visto abaixo:

$$W1 = \begin{bmatrix} 0.0285 & 0.2067 & -0.3356 \\ -0.0791 & -0.0087 & 0.0105 \\ 0.9813 & -2.5871 & 2.7895 \\ -0.0012 & 0.0204 & 0.0090 \\ 0.0415 & 0.0052 & -0.0277 \\ 0.0052 & 0.1690 & -0.2247 \end{bmatrix} \quad (3.1.a)$$

$$W2 = \begin{bmatrix} 3.9395 & 7.2071 & -0.3035 & 2.6581 & -8.8319 & -2.1809 \\ -0.5721 & 1.1225 & -6.5739 & -3.5339 & 4.9194 & 3.1611 \\ 2.8452 & 3.0690 & -4.5887 & 5.3904 & 5.1873 & -0.4097 \end{bmatrix} \quad (3.1.b)$$

$$W3 = [-4.8429 \quad -5.5855 \quad 5.7564] \quad (3.1.c)$$

$$b1 = \begin{bmatrix} 8.8948 \\ 3.2571 \\ -3.8836 \\ -0.0722 \\ 1.0532 \\ 6.0492 \end{bmatrix} \quad b2 = \begin{bmatrix} 6.2931 \\ 2.3843 \\ -4.9117 \end{bmatrix} \quad b3 = [4.7003] \quad (3.1.d)$$

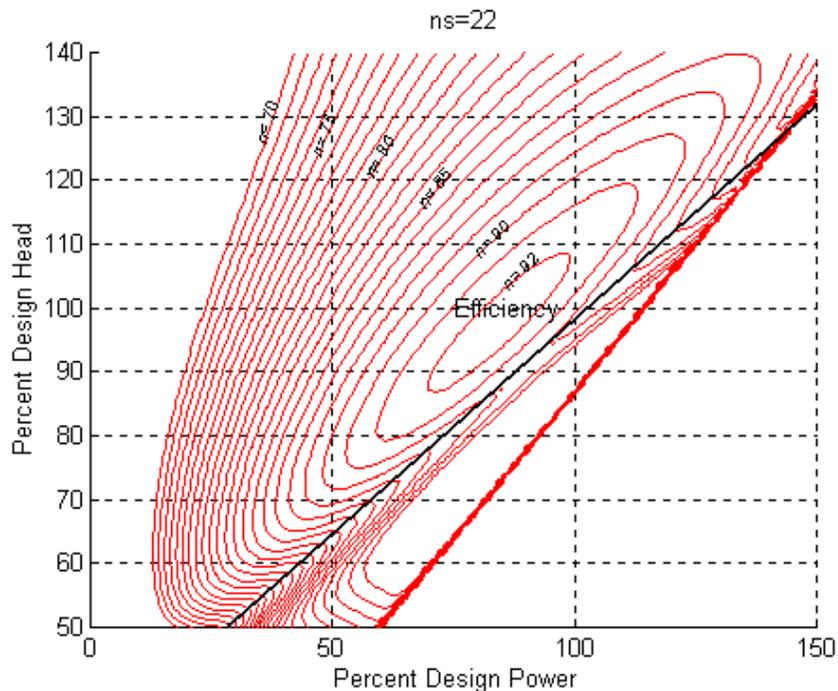
A localização destes pesos na rede está representada na própria Figura 3.10. Os resultados obtidos por ela são exibidos nas Figuras de 3.11.a à 3.11.h. Através destas Figuras pode-se observar que, dado o  $n_s$  da turbina, então é possível obter todo o diagrama da turbina em questão, apenas varrendo uma malha quadrada de pares ordenados com PDP e PDH sobre a rede da Figura 3.10.

Os gráficos vermelhos são aqueles utilizados durante o treinamento da rede, mas foram obtidos aqui somente depois do treinamento da rede. Os gráficos azuis foram conseguidos pela rede, mas não foram utilizados durante o treinamento da mesma. Isto demonstra o poder das Redes Neurais interpolar em uma única rede várias funções simultaneamente.

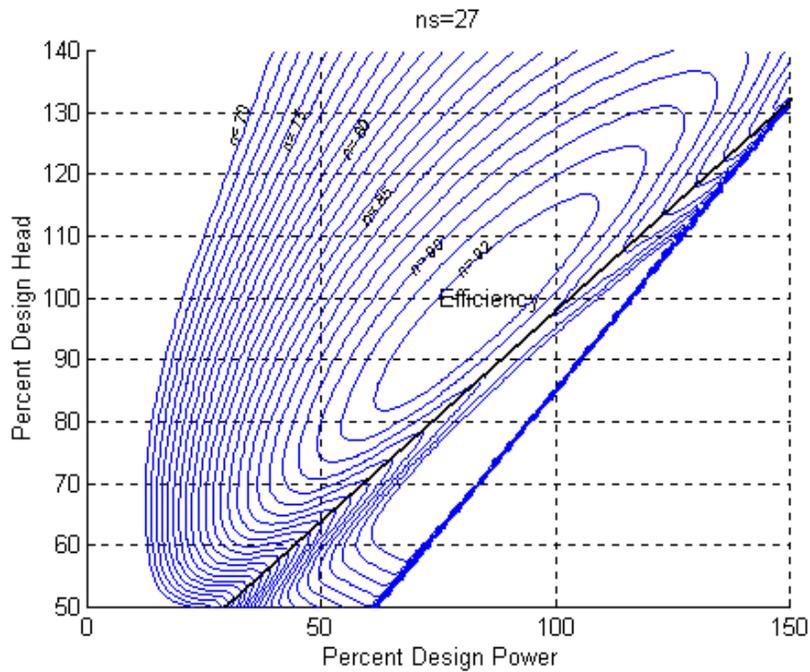
Analisando os gráficos das Figuras 3.11.a à 3.11.h observa-se que a região fronteira direita dos gráficos interpolados está ligeiramente diferente dos originais (as linhas pretas indicam a região onde esses gráficos deveriam terminar). Entretanto, esta diferença não ultrapassa o valor de dois por cento e, portanto, foram considerados resultados bastante satisfatórios. Pode ser observado também que novos treinamentos poderão ser realizados futuramente na tentativa de melhorar ainda mais estes valores.

O mais importante e relevante desta parte do trabalho é afirmar que, mesmo que os gráficos obtidos anteriormente não se refiram às bombas centrífugas, a técnica de interpolação simultânea de diagramas em uma única rede é possível de implementação computacional e, portanto, achou-se conveniente inseri-la nesta parte da Dissertação.

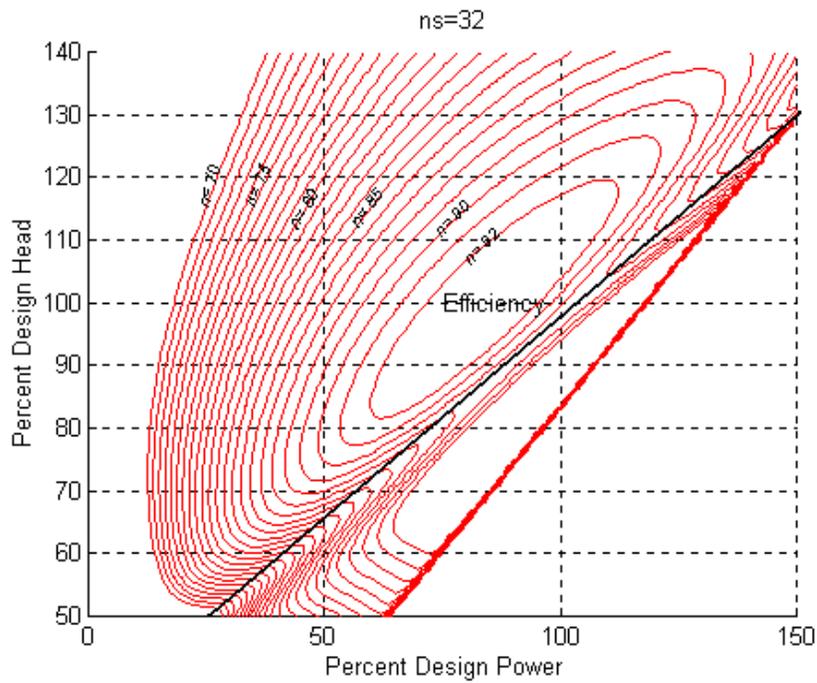
Uma vez que a rede é treinada, então a obtenção dos valores interpolados se reduz ao cálculo de multiplicação de matrizes com funções exponenciais. Desta forma, o diagrama inteiro pode ser obtido em frações de segundo pelos computadores existente atualmente.



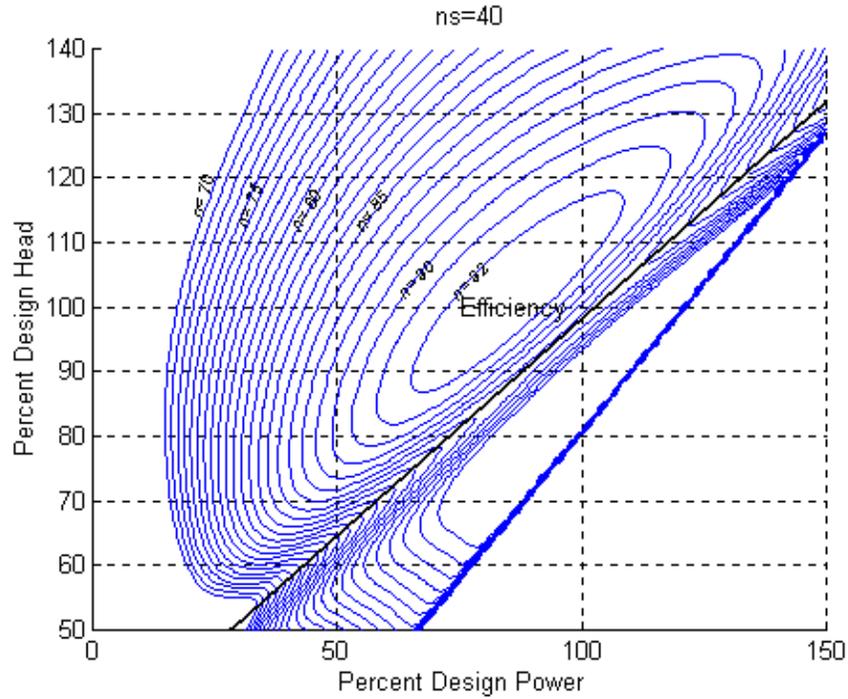
**Figura 3.11.a - Diagrama Colina Para Representação das Turbinas Francis  
Com ns=22.**



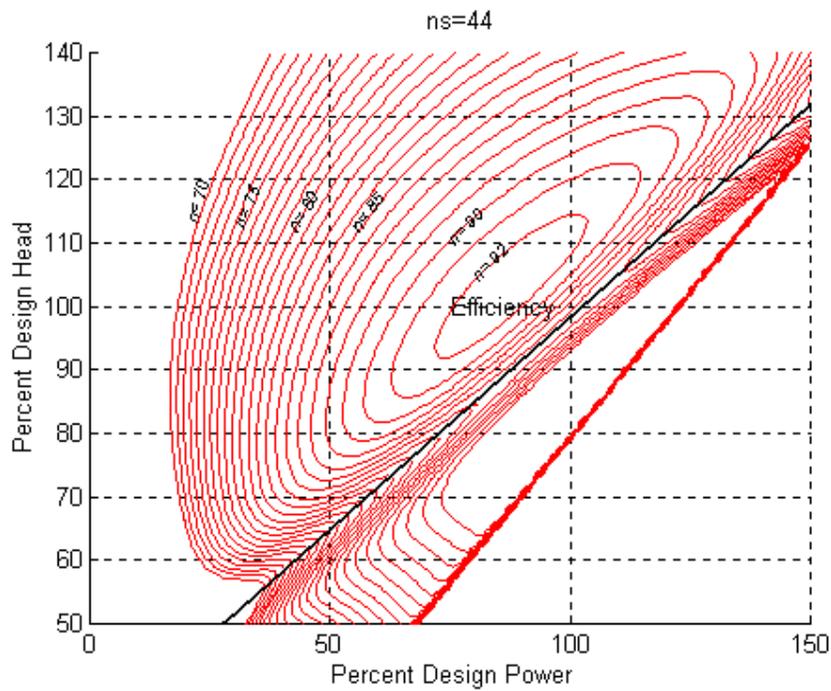
**Figura 3.11.b - Diagrama Colina Para Representação das Turbinas Francis  
Com  $ns=27$ .**



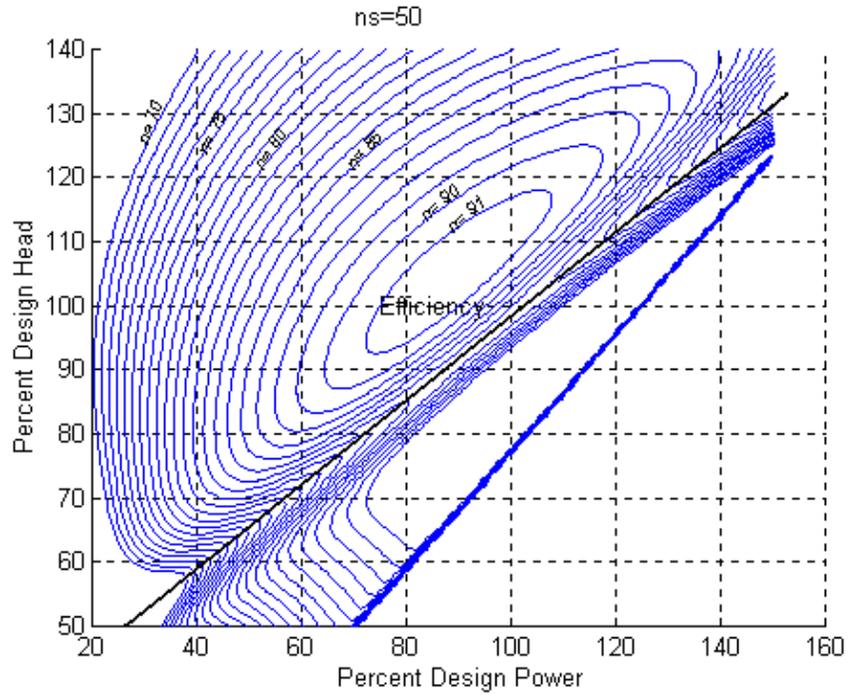
**Figura 3.11.c - Diagrama Colina Para Representação das Turbinas Francis  
Com  $ns=32$ .**



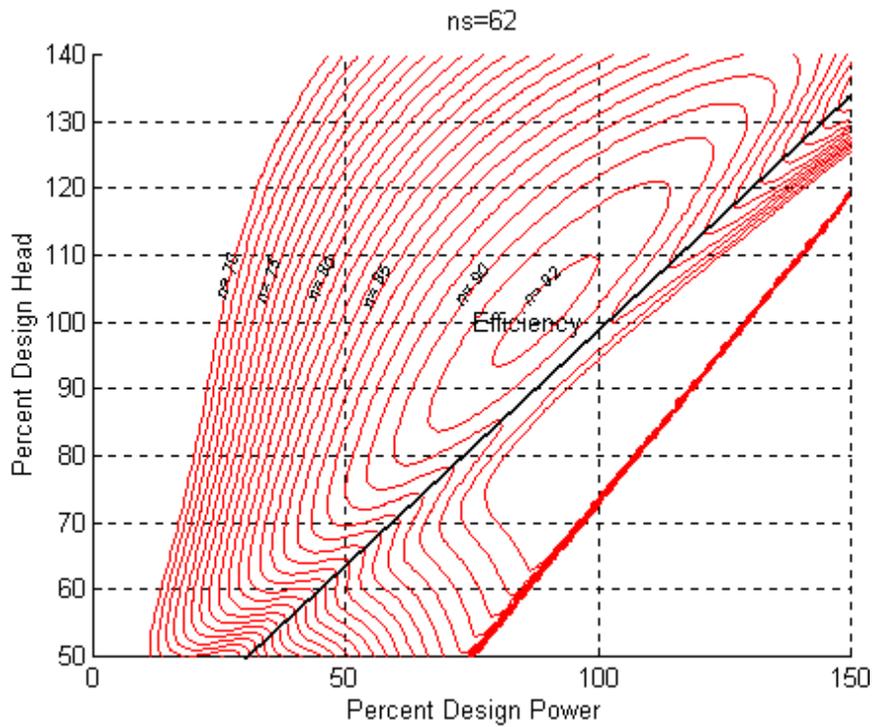
**Figura 3.11.d - Diagrama Colina Para Representação das Turbinas Francis  
Com ns=40.**



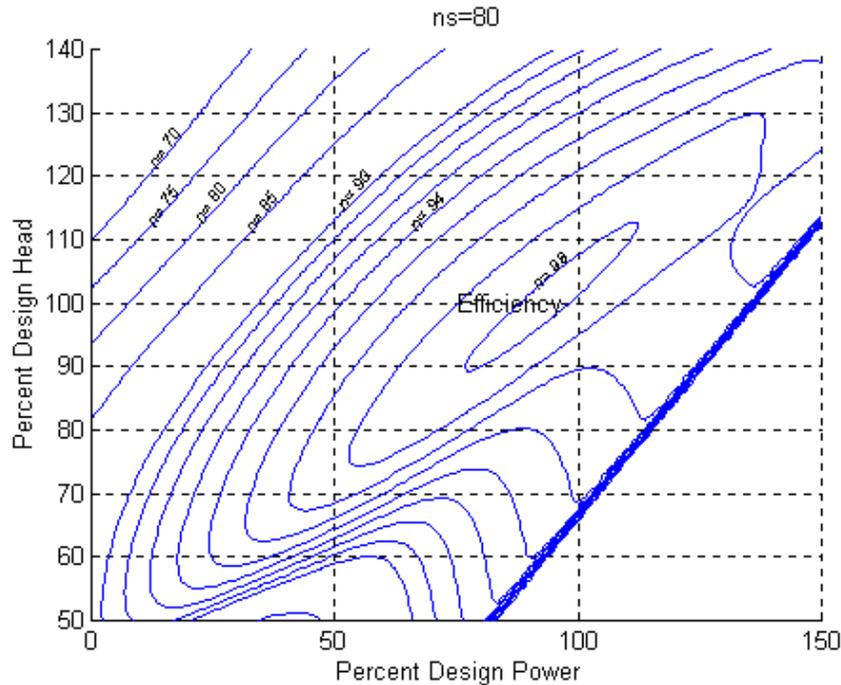
**Figura 3.11.e - Diagrama Colina Para Representação das Turbinas Francis  
Com ns=44.**



**Figura 3.11.f - Diagrama Colina Para Representação das Turbinas Francis  
Com ns=50.**



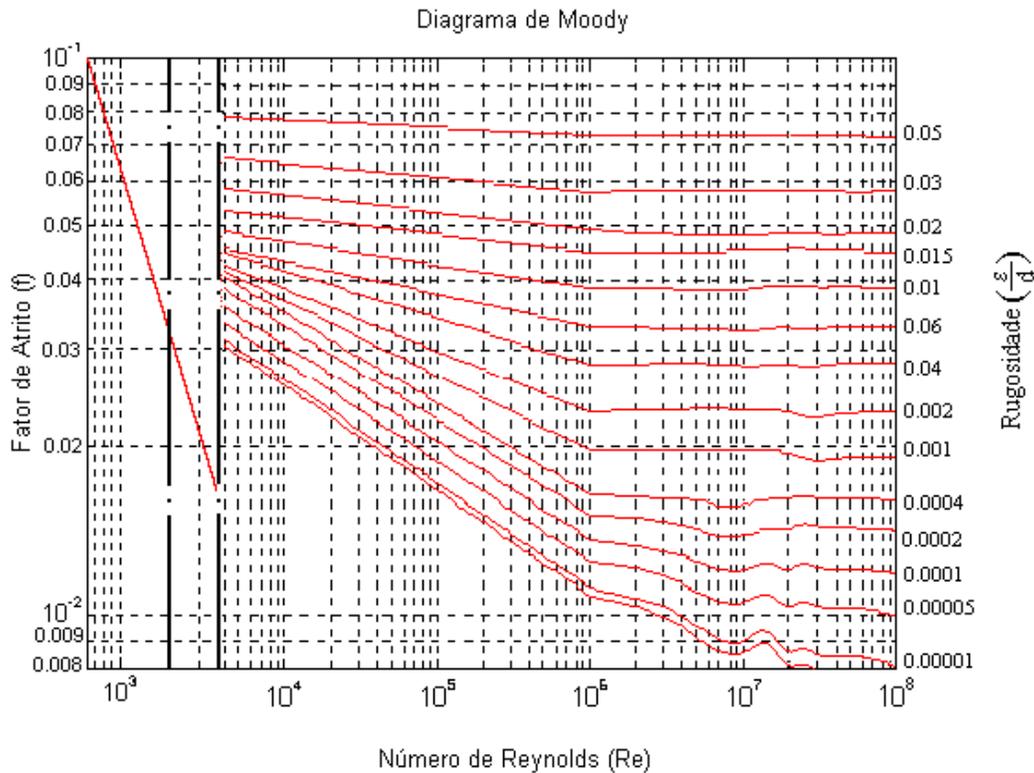
**Figura 3.11.g - Diagrama Colina Para Representação das Turbinas Francis  
Com ns=62.**



**Figura 3.11.h - Diagrama Colina Para Representação das Turbinas Francis  
Com  $n_s=80$ .**

Ainda com relação aos gráficos anteriores, pode-se observar que aqueles utilizados durante o treinamento (gráficos vermelhos) possuem  $n_s$  iguais a 22, 32, 44 e 62. Desta forma, todos os diagramas com  $n_s$  entre 22 e 62 podem ser representados com bastante confiança pela rede treinada. Entretanto, o gráfico da Figura 3.11.h com  $n_s = 80$  demonstra que para valores fora desta faixa (22 a 62) os valores calculados pela rede não poderão ser considerados satisfatórios.

Por outro lado, a Figura 3.12 mostra a interpolação do diagrama de Moody obtido também por Redes Neurais. A grande vantagem desta interpolação foi a obtenção de uma rede que possibilitou gerar o diagrama completo. É verdade que, observando este gráfico, há presença de alguns ruídos, mas que poderão ser solucionados posteriormente com novos treinamentos. Mesmo assim, os resultados obtidos pela rede são praticamente idênticos àqueles obtidos pela leitura visual direta do diagrama.



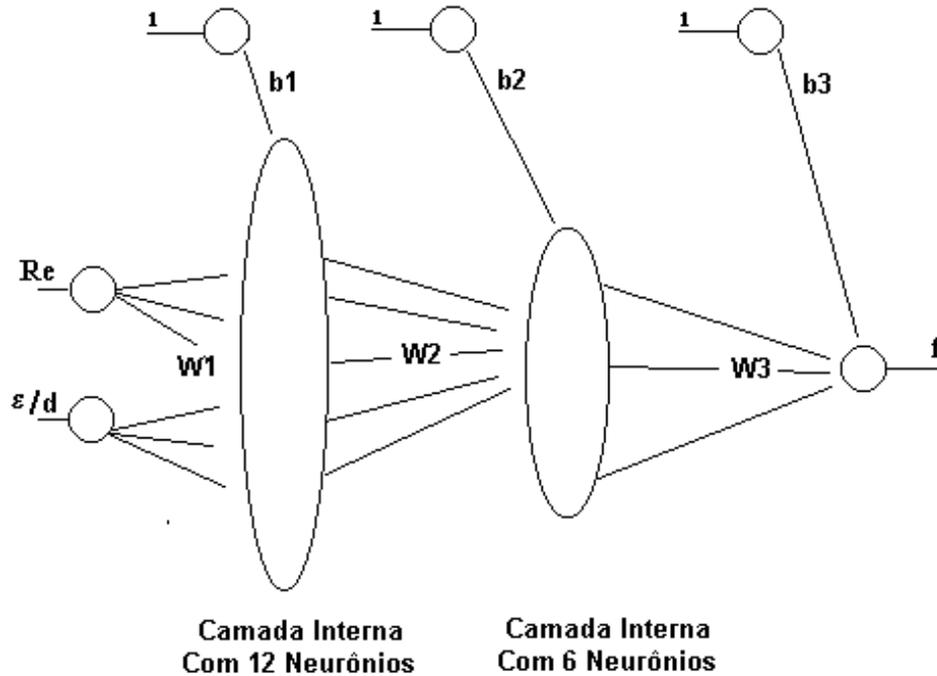
**Figura 3.12 - Interpolação do Diagrama de Moody Por Redes Neurais.**

É importante verificar que a interpolação do diagrama de Moody é de fundamental importância para o cálculo da perda de carga através do computador (ver apêndice A). Como pôde ser visto no Capítulo 2, o cálculo da perda de carga também é bastante relevante para a concretização do modelo matemático de simulação.

Esta rede possui duas camadas de entrada (número de Reynolds e a razão entre a rugosidade e o diâmetro do tubo), duas camadas internas (uma com doze neurônios e outra com seis) e uma camada de saída (fator de atrito). A Figura 3.13 ilustra a arquitetura final desta rede. Os pesos sinápticos desta rede neural treinada foram omitidos por falta de espaço.

A utilização de Redes Neurais na interpolação de funções é a aplicação mais elementar que se pode realizar com esse ferramenta computacional. Entretanto, deve-se observar que este é o primeiro passo para a manipulação desta técnica que ainda é

bastante recente. Futuramente poder-se-á pensar na implantação direta desta técnica na otimização de sistemas energéticos.



**Figura 3.13 - Ilustração Didática da Rede Neural Que Interpola o Diagrama de Moody.**

Assim sendo, um novo estudo poderá ser realizado para obtenção de um modelo computacional na simulação de um sistema de bombeamento à rotação variável utilizando-se única e exclusivamente a teoria de Redes Neurais. Isto vem demonstrar a ampla área em que essa ferramenta computacional poderá ser utilizada e implementada.

## Capítulo 4

### Manual de Utilização do Software EFEI/PROCEL V-1.0

#### 4.1) Introdução

O software EFEI/PROCEL V-1.0 é um aplicativo criado em ambiente Windows e foi originalmente desenvolvido na linguagem do MATLAB V-4.0. O MATLAB é um software que possui uma linguagem de programação *científica* que facilita em muito a utilização de ferramentas matemáticas complexas, tais como: interpolação de funções de uma ou várias variáveis independentes, álgebra matricial e complexa, Redes Neurais, lógica Fuzzy, processamento de sinais, ferramentas de otimização e etc.

Uma vez que o aplicativo EFEI/PROCEL V-1.0 utiliza-se de algumas das ferramentas matemáticas mencionadas anteriormente optou-se pelo ambiente do MATLAB para a elaboração do mesmo. É importante ter isso em mente, pois o MATLAB não é uma linguagem de programação compilável e por isso o aplicativo EFEI/PROCEL V-1.0 só funcionará em presença do primeiro.

O software EFEI/PROCEL V-1.0 realiza a simulação do conjunto moto-bomba à rotação variável e à rotação constante e com isto obtêm o balanço energético da instalação em questão. Isto permitirá avaliar a viabilidade técnica na utilização ou não dos inversores de frequência em tais circunstâncias.

A simulação aqui apresentada é específica para os sistemas de saneamento de água potável. Esta informação é bastante importante, pois este aplicativo leva em consideração não apenas as características físicas do conjunto moto-bomba, mas também do *sistema* (isométrico da instalação hidráulica em questão). Desta forma, os parâmetros de entrada do programa exigirão as seguintes informações básicas e detalhadas da instalação:

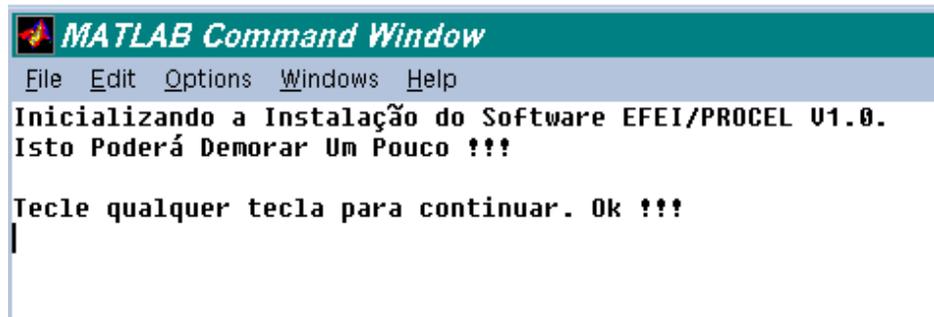
- Valores nominais do conjunto moto-bomba;
- Entrada gráfica do Isométrico da instalação hidráulica desejada;
- Consumo mensal de água dos n consumidores da rede.

## 4.2) Instalando o Software EFEI/PROCEL V-1.0

A instalação deste aplicativo é relativamente fácil. Para realizar esta tarefa basta seguir os passos abaixo:

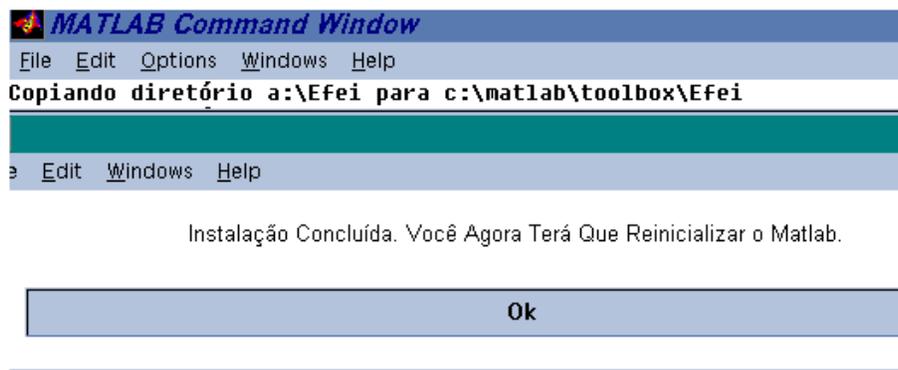
- a) inserir o disquete EFEI/PROCEL V1.0 no drive de 3.5'' do computador;
- b) entre no editor do Matlab V4.0;
- c) digite **cd a:\** e tecle enter;
- d) digite a palavra chave **Instalar** e tecle enter novamente.

A seguinte mensagem irá aparecer na tela do computador:



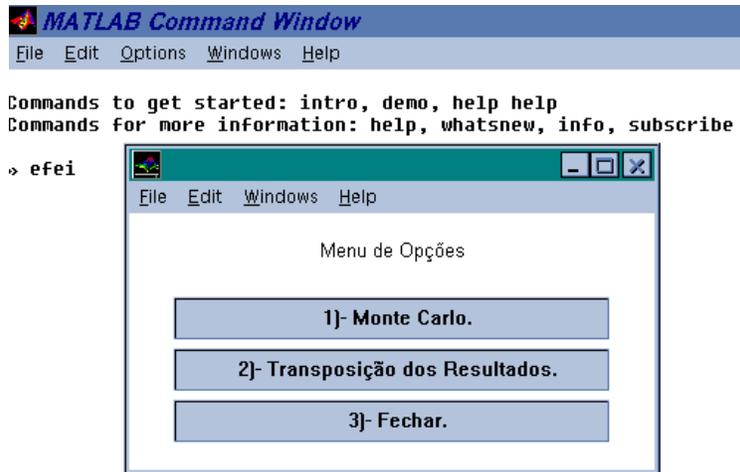
**Figura 4.1 - Tela Inicial Para Instalação do Software EFEI/PROCEL V1.0.**

Desta forma, ao aparecer a mensagem da Figura 4.1 basta pressionar qualquer tecla do computador para continuar com a instalação do mesmo. Aguarde por alguns segundos a instalação e reprodução automática dos arquivos do aplicativo até que apareça a seguinte mensagem:



**Figura 4.2 - Mensagem de Finalização da Instalação do Aplicativo.**

Ao pressionar a tecla **Ok** da Figura 4.2 o editor do Matlab será desligado automaticamente. A seguir, entre novamente no editor do Matlab e tecele as palavras chaves **efei** ou **procel** (sempre em letras minúsculas e seguidas pela tecla **enter**) para iniciar o aplicativo EFEI/PROCEL V1.0. A janela inicial do software, então aparecerá na tela do computador como ilustra a Figura 4.3.



**Figura 4.3 - Janela Inicial do Aplicativo EFEI/PROCEL V1.0.**

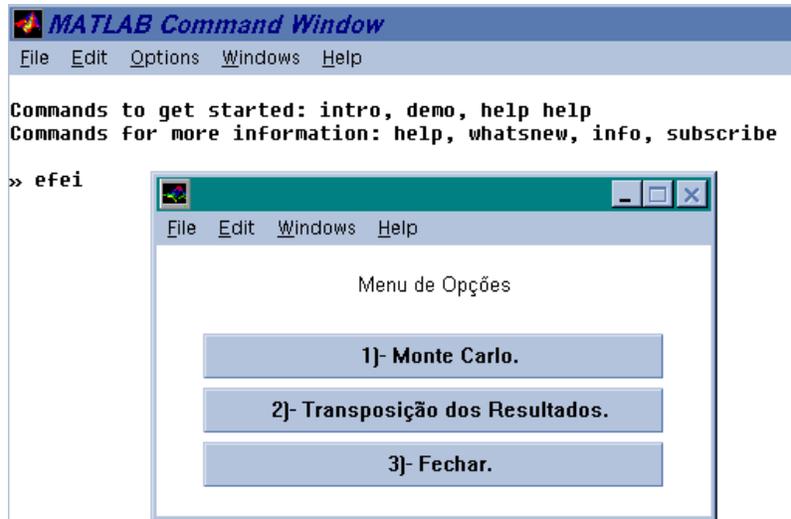
A partir deste ponto basta seguir a instruções contidas a partir do item 4.3 deste manual. Ali estão todos os passos necessários para a correta manipulação deste aplicativo.

#### **4.3) Aprendendo a Utilizar o Aplicativo EFEI/PROCEL V-1.0**

Para iniciar a utilização do aplicativo em questão é necessário inicialmente entrar no MATLAB V-4.0. Para isto clique em INICIAR/PROGRAMAS e em seguida procure pelo ícone referente a entrada do MATLAB (caso este esteja instalado em seu computador).

Nota: Caso você não possua o MATLAB em seu computador então, não será possível rodar este aplicativo.

A Figura 4.4 ilustra a tela de entrada do MATLAB e para executar o programa EFEI/PROCEL V-1.0 basta digitar **procel** (seguido de ENTER) ou **efei**.



**Figura 4.4 - Tela de Entrada do MATLAB e do Aplicativo EFEIPROCEL.**

Para compreender a janela de opções da Figura 4.4 é necessário conhecer a diferença entre Transposição dos Resultados e Monte Carlo, que é a seguinte:

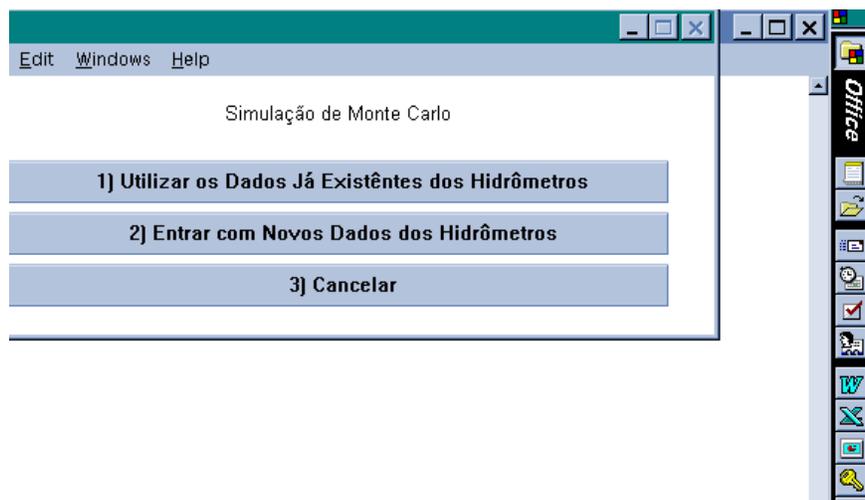
- a) Monte Carlo: caso você possua a leitura dos hidrômetros de todas as casas da instalação hidráulica em questão (de 15 em 15 minutos no período mínimo das 8:00 horas da manhã até as 17:00 horas da tarde), então, este é o seu caso. Por outro lado, se você possui apenas o consumo médio mensal de água dos  $n$  consumidores da rede vá para Transposição de Resultados (item b).
- b) Transposição dos Resultados: esta escolha permite a simulação da instalação em questão sem a necessidade de uma leitura exaustiva de todos os hidrômetros das casas presentes em sua planta hidráulica (ou isométrico). Neste caso, você só necessitará do consumo médio mensal de água dos consumidores (conta de água dos  $n$  consumidores).
- c) Fechar: interrompe a execução do aplicativo até que você digite novamente a função PROCEL.

Caso você tenha optado por MONTE CARLO leia somente o item 4.3.1, mas caso você tenha optado pela TRANSPOSIÇÃO DOS RESULTADOS vá diretamente para o item 4.3.2. É importante observar que estes itens são, até certo ponto, independentes entre si.

### 4.3.1) Monte Carlo

Como foi dito anteriormente, ao escolher a opção Monte Carlo (referente à janela anterior) você terá que possuir a leitura detalhada dos hidrômetros dos  $n$  consumidores da rede durante um período longo do dia (pelo menos). Assim, esta opção acarretará numa cadeia de janelas que deverão ser manipuladas corretamente. Esta seção explicará detalhadamente este procedimento.

A Figura 4.5 pede ao usuário que ele utilize ou a leitura dos hidrômetros de uma instalação hidráulica já armazenada em um arquivo do computador (opção 1) ou se ele pretende entrar com os dados dos hidrômetros pela primeira vez (opção 2).



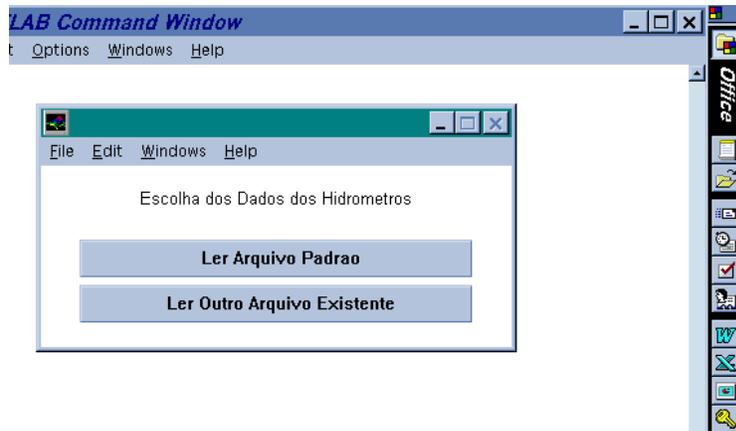
**Figura 4.5- Janela Inicial Caso a Opção do Usuário Tenha Sido 1) Monte Carlo na Figura 4.4.**

#### 4.3.1.1) Usar os Dados Já Existentes dos Hidrômetros (Opção 1 da Figura 4.5)

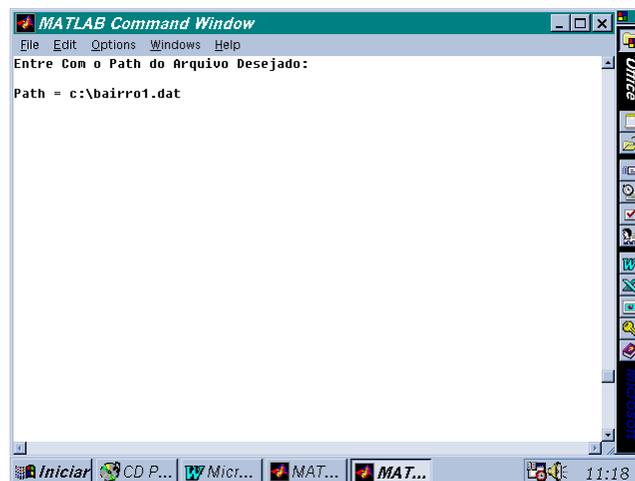
Ao optar pelo item (1) da janela referente à Figura 4.5, então, uma nova janela aparecerá no vídeo (ver Figura 4.6) com as seguintes mensagens:

**Ler Arquivo Padrão** significa que o usuário fará a simulação da instalação hidráulica existente no bairro Vista Verde (Cidade de Itajubá/MG). Esta opção só foi utilizada durante os testes iniciais do aplicativo realizados na EFEI. Desta forma, esta escolha não interessa ao usuário comum.

**Ler Outro Arquivo Existente** é a alternativa mais importante desta janela, pois ela permite que o usuário utilize suas próprias leituras (dos hidrômetros) da instalação desejada (caso elas existam e já estejam gravadas em um arquivo de nome conhecido). Caso você já possua estas leituras, e, no entanto, ainda não sabe como armazená-las no computador, então, leia o item 4.3.1.2.



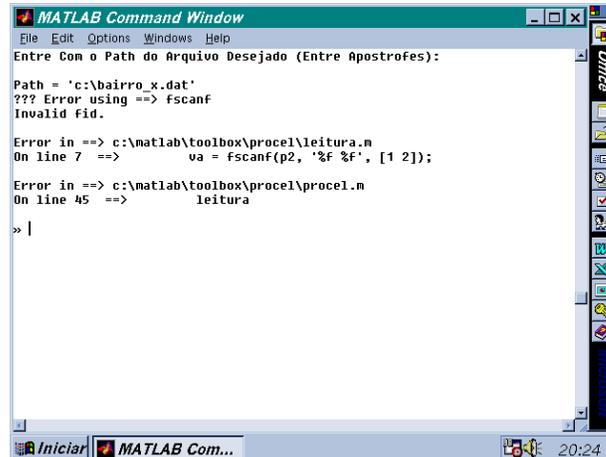
**Figura 4.6 - Permite Escolher Entre Ler os Dados Padrões dos Hidrômetros (Que Já Acompanham o Aplicativo) ou Outro Arquivo Equivalente Elaborado Por Terceiros.**



**Figura 4.7 - Entrada do Nome do Arquivo Que Contêm os Dados dos Hidrômetros Obtidos por Terceiros.**

Desta forma, ao escolher **Ler Outro Arquivo Existente** a janela referente a Figura 4.7 aparecerá na tela do computador. Como pode ser observado, ela permite que o

usuário entre com o path (caminho completo) do arquivo desejado. Deve ser observado que o nome do arquivo em questão deve ser escrito corretamente. Caso você se esqueça do nome completo do path ou se o arquivo digitado não existe, então ocorrerá um erro de leitura como demonstrado na Figura abaixo. Assim, se isto ocorrer, a única saída será reiniciar o programa EFEI/PROCEL V-1.0.



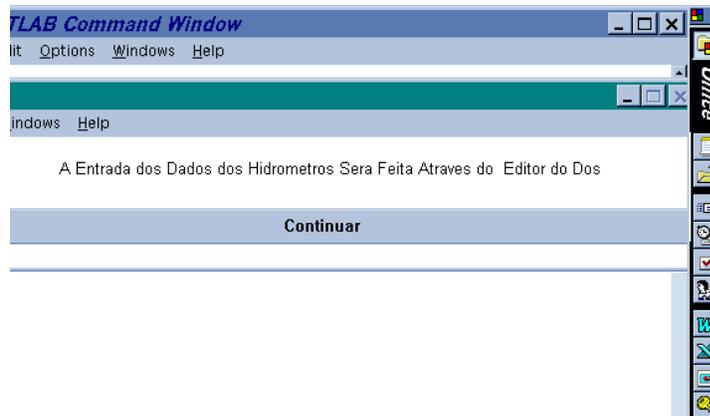
**Figura 4.8 - Mensagem de Erro Caso o Arquivo a Ser Lido Não Exista na Memória do Computador.**

Este problema às vezes é bastante inconveniente, no entanto, espera-se eliminá-lo na próxima versão deste aplicativo.

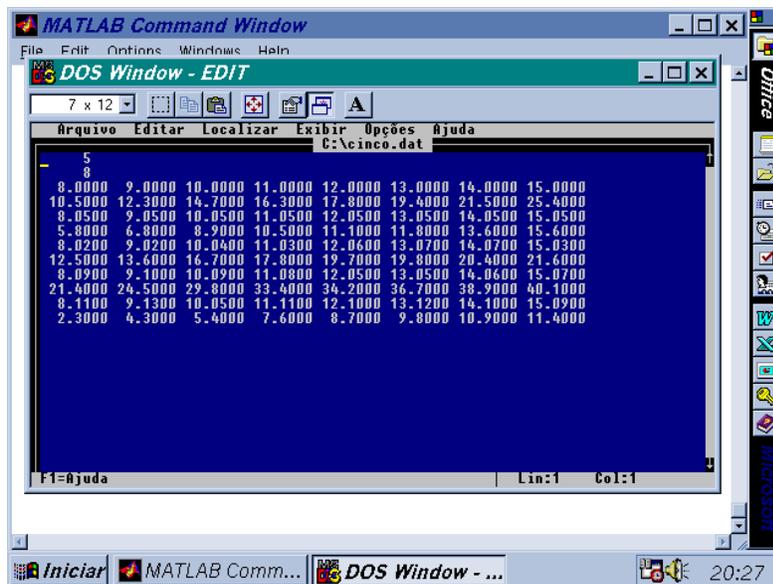
#### **4.3.1.2) Entrar Com os Novos Dados dos Hidrômetros (Opção 2 da Fig. 4.5)**

Caso o usuário tenha optado pela entrada de novos dados dos hidrômetros, pois ele possui em mãos uma tabela com os valores lidos em campo, então estes dados deverão ser inseridos nesta parte do programa. A entrada de dados será feita pela aparição automática do editor DOS como está mostrando a Figura 4.10. A Figura 4.9 simplesmente está afirmando as considerações levantadas neste parágrafo. Como pode ser observado na Figura 4.10, a entrada dos valores dos hidrômetros segue a configuração apresentada abaixo.

O primeiro número da primeira linha do editor exige que o usuário entre com o número total de hidrômetros da tabela. O segundo número da tabela (localizado na segunda linha do editor DOS) exige que o usuário entre com o número total de medições temporais dos consumidores (observe que o número de medições temporais de todos os consumidores deve ser iguais).



**Figura 4.9- Janela Que Confirma a Entrada do Editor DOS.**



**Figura 4.10 - Entrada dos Valores das Medições Temporais dos Hidrômetros dos n Consumidores da Rede Hidráulica Obtidos de Leituras Efetuadas em Campo.**

As demais linhas do editor são destinadas à entrada de dados propriamente dita. A formatação da tabela deve ser então, obedecida da seguinte forma (por favor, não faça diferente do que será dito adiante):

As linhas ímpares ( da terceira em diante) representam os valores dos horários de leitura dos n consumidores da instalação hidráulica (a linha 3 está associada aos horários de medições efetuada no primeiro consumidor, a linha 5 aos horários do segundo consumidor, e assim por diante).

As linhas pares (da quarta em diante) representam os valores dos hidrômetros medidos durante um período do dia ( a linha 4 está associada as medições do primeiro consumidor, a linha 6 está associada ao segundo consumidor e assim por diante). Assim, as linhas 3 e 4 estão associadas ao primeiro consumidor, as linhas 5 e 6 estão associadas ao segundo consumidor, e assim em diante.

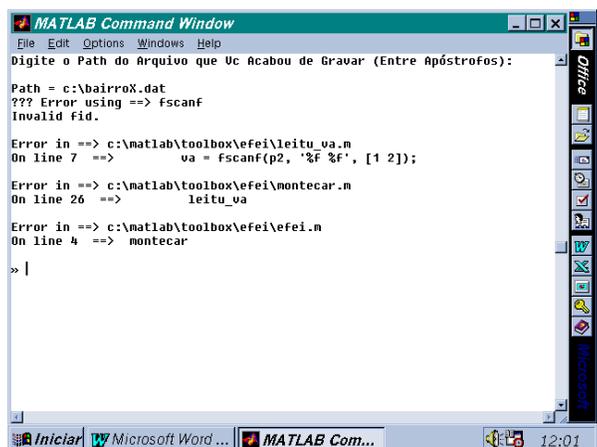
Uma observação importante com relação a entrada de dados é a seguinte: as horas devem ser separadas por um ponto dos minutos (e não dois pontos) durante a entrada de dados. O problema básico aqui é que o aplicativo não compreende a notação de dois pontos. Os Volumes acumulados dos hidrômetros devem ser representados no Sistema Internacional de medidas (SI), ou seja, em metros cúbicos [m<sup>3</sup>].

Ao terminar a entrada de dados você terá que gravar este arquivo com um determinado nome (path) e sair do editor DOS. Em seguida aparecerá uma nova mensagem pedindo para você confirmar o nome deste arquivo na tela do editor do Matlab. A Figura 4.11 ilustra esta situação.

Observe que o path digitado no editor do DOS deve ser igual aquele digitado no editor do Matlab 4.0 confirmando o arquivo gravado. Caso estes nomes sejam diferentes, então, ocorrerá um erro no aplicativo como ilustra a Figura 4.12. Caso isto ocorra, então, a única saída para este problema será reiniciar o aplicativo.



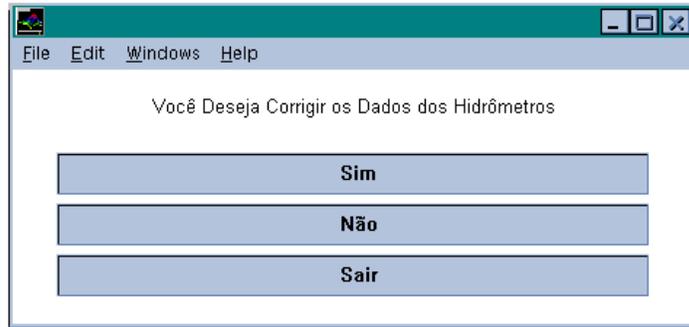
**Figura 4.11 - Janela Que Confirma o Nome do Arquivo Onde Foi Gravada a Leitura dos Hidrômetros dos n Consumidores da Rede.**



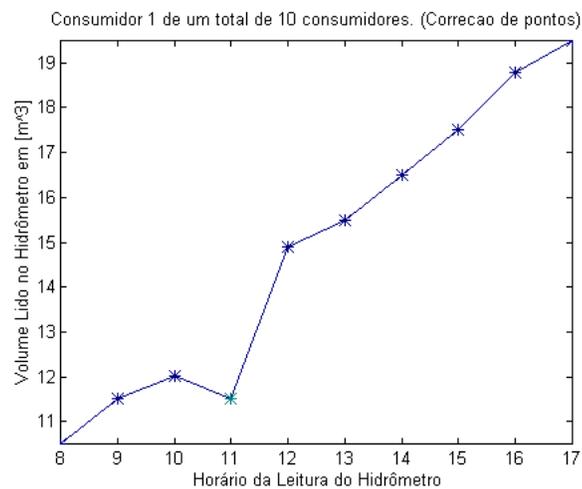
**Figura 4.12 - Caso a *Confirmação* do Nome do Arquivo Onde Foi Gravada a Leitura dos Hidrômetros Seja Diferente do *Nome Original* Então, Aparecerá Esta Mensagem de Erro.**

Confirmado o arquivo de dados referente à leitura dos volumes acumulados dos hidrômetros, então, a janela da Figura 4.13 aparecerá na tela. Ela pede ao usuário que este deseja corrigir graficamente os valores lidos nos hidrômetros das residências.

Se o usuário confirmar a correção destes dados, então, a Figura 4.14 aparecerá no vídeo do computador. Ela representa graficamente os valores dos volumes acumulados dos hidrômetros (eixo das ordenadas) pelo horário da realização das medições. Os consumidores são apresentados individualmente e de forma sequencial.



**Figura 4.13 - Janela Que Pede a Confirmação ou Não da Correção Gráfica dos Valores Lidos nos Hidrômetros.**



**Figura 4.14- Representação Gráfica dos Valores Medidos em Campo dos Volumes Acumulados dos Hidrômetros.**

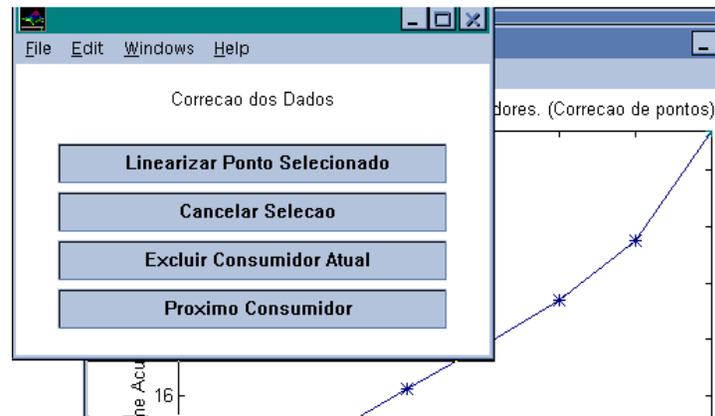
Por exemplo, na Figura 4.14 o quarto ponto de leitura está errado, pois, se tratando da grandeza física *volume acumulado*, esta sempre terá que ser crescente no tempo. Desta forma, por um erro qualquer na leitura dos dados este volume acumulado apareceu menor que o seu antecessor. Para eliminá-lo, então, bastará pressionar sobre ele o botão esquerdo do mouse. Assim procedendo-se, este ponto ficará vermelho e aparecerá uma janela semelhante àquela apresentada na Figura 4.15.

Na janela da Figura 4.15 observa-se um *menu* de escolhas com as seguintes alternativas: **Linearizar Ponto Selecionado, Cancelar Seleção, Excluir Consumidor Atual e Próximo Consumidor.**

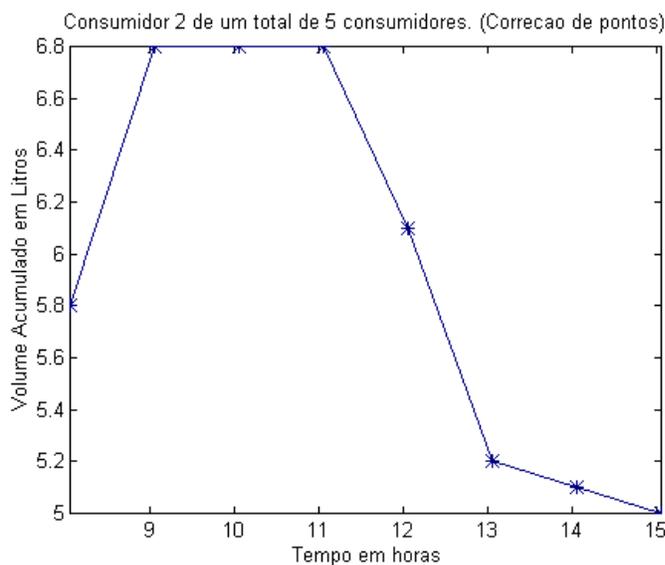
Linearizar Ponto Selecionado: significa que o ponto de leitura selecionado será linearizado com relação aos seus dois vizinhos da esquerda e da direita.

Cancelar Seleção: às vezes o usuário poderá cometer um erro e selecionar o ponto errado. Esta opção permitirá cancelar esta seleção.

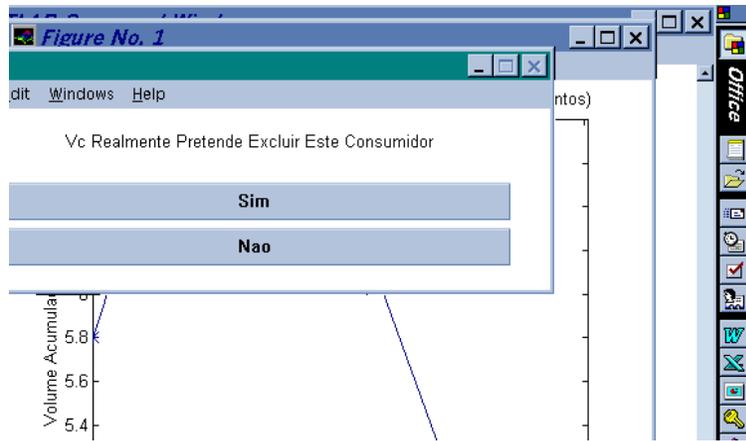
Excluir Consumidor: pode ocorrer que as leituras do hidrômetro de um determinado consumidor venham adulteradas pelo fato do medidor estar danificado. Neste caso, esta opção permitirá excluí-lo completamente (ver Figuras 4.16 e 4.17).



**Figura 4.15 - Janela de Opções que Permite Corrigir os Valores Lidos nos Hidrômetros, Caso Estas Medições Venham Acompanhadas de Algum Erro.**

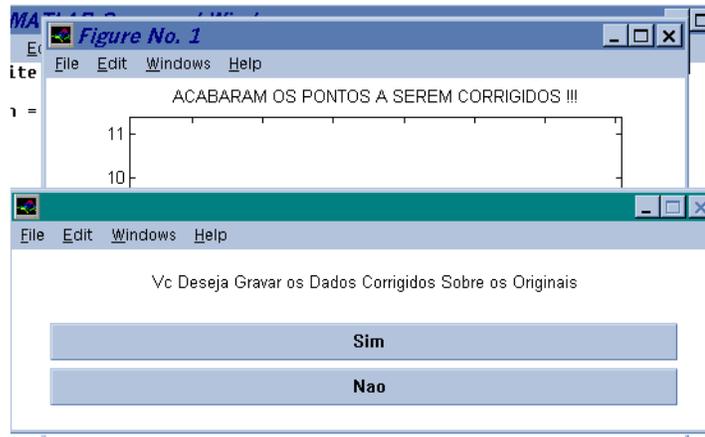


**Figura 4.16 - Consumidor Com Hidrômetro Danificado.**



**Figura 4.17 - Janela Que Pede a Confirmação de Exclusão do Consumidor Selecionado.**

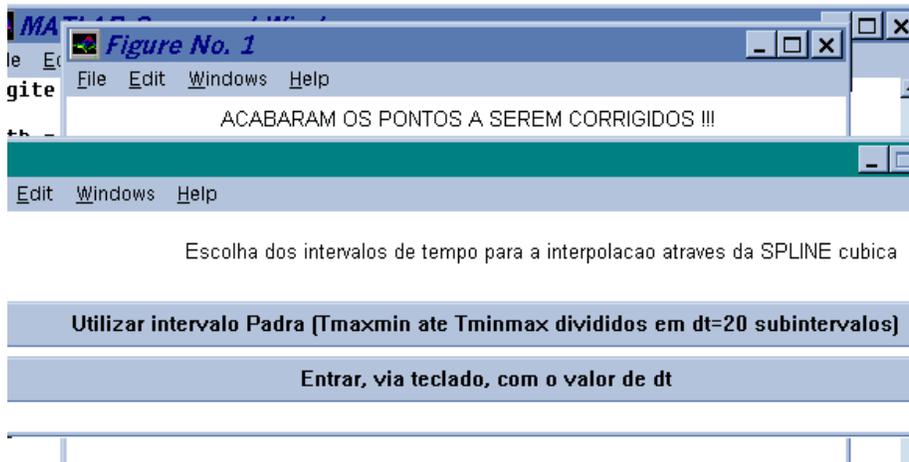
Próximo Consumidor: esta opção permite visualizar as leituras do próximo consumidor. Desta forma, todos os consumidores da rede poderão ser observados e corrigidos graficamente. Quando forem observadas todas as leituras de todos os hidrômetros, então a Figura 4.18 aparecerá no editor do Matlab.



**Figura 4.18 - Janela Que Possibilita a Finalização da Correção das Leituras De Todos os Hidrômetros da Instalação Hidráulica.**

Observando-se mais atentamente a janela da Figura 4.18, percebe-se que o computador permite ou não a atualização definitiva dos dados. Se o usuário pedir a atualização dos dados, então, os valores originais serão perdidos definitivamente.

Feito isso, o computador fará uma interpolação temporal dos volumes acumulados dos hidrômetros pelo método da Spline Cúbica. A janela representada na Figura 4.19 pede ao usuário o número de interpolações temporais. A primeira opção é a padrão (20 valores) que é mais que suficiente para a maioria das simulações. Porém, se o usuário quiser um número maior ou menor que este, então ele deverá pressionar a segunda opção. A Figura 4.20 ilustra a entrada deste novo valor.



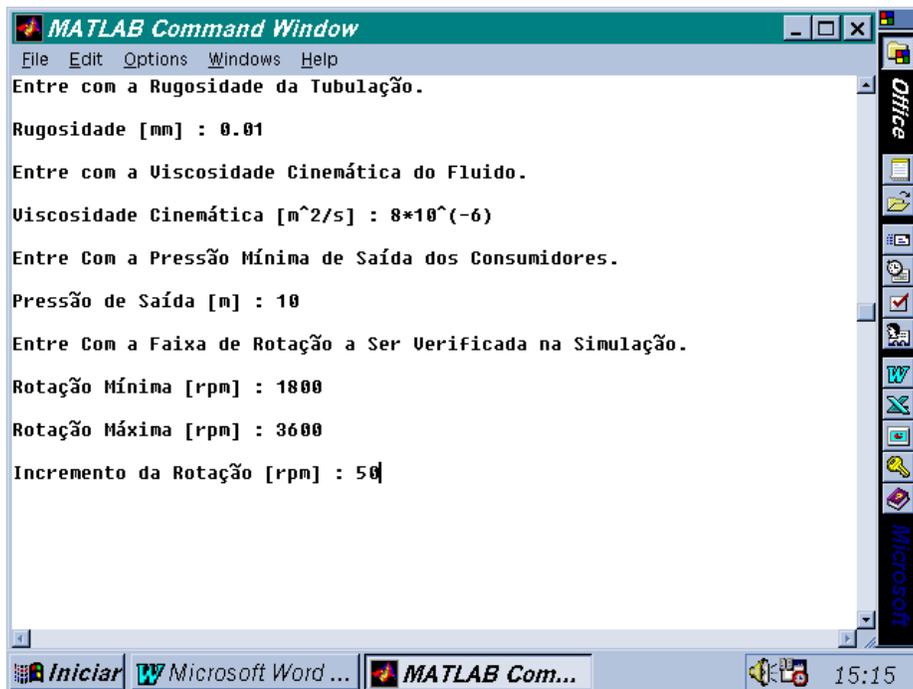
**Figura 4.19 - Ajuste das Leituras dos Hidrômetros Para os Mesmos Instantes de Tempo (Número Total de Interpolações).**



**Figura 4.20 - Alteração Manual do Número Total de Interpolações dos Valores Medidos nos Hidrômetros pelo Método da Spline Cúbica.**

A entrada de dados ainda não terminou. Várias outras informações sobre a instalação hidráulica são ainda necessárias, tais como: isométrico ou planta da instalação hidráulica onde foram feitas as leituras dos hidrômetros (com todas os elementos e dimensões especificados), a rugosidade dos tubos, a viscosidade cinemática do fluido, a faixa de variação da rotação da bomba centrífuga a ser simulada e o número de simulações desejado. Assim sendo, isto poderá ser realizado da forma descrita abaixo.

Após a execução da janela representada na Figura 4.20, então uma série de informações serão pedidas pelo computador ao usuário. Estas informações estão representadas na Figura 4.21.



**Figura 4.21 - Entrada dos Parâmetros Finais da Instalação Hidráulica Para a Realização da Simulação da Bomba Centrífuga Funcionando à Rotação Variável.**

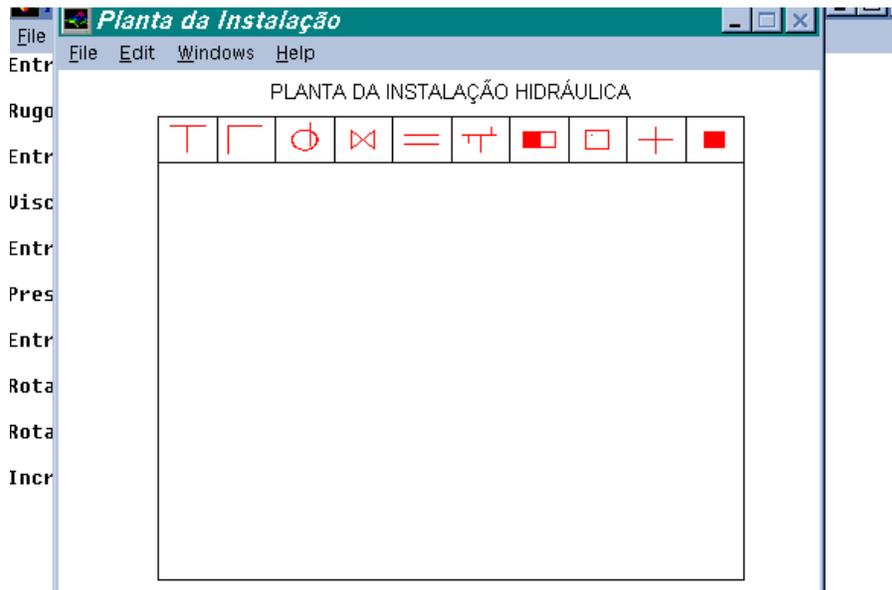
Como pode ser observado, esta janela de entrada de dados pede:

- a) A Rugosidade dos tubos da instalação hidráulica em *milímetros* [mm]. Aqui fica determinado se o tubo é de plástico, ferro fundido, aço, aço pintado com vinil e etc.

- b) A Viscosidade Cinemática do fluido em  $[m^2/s]$ . Aqui fica determinado qual fluido a ser bombeado. Por exemplo: água.
- c) Pressão mínima de saída dos consumidores em metros de coluna d'água  $[m]$ . Aqui é importante observar que somente as simulações onde todos os consumidores satisfaçam a esta pressão mínima de saída serão computadas.
- d) A faixa de rotação de funcionamento da bomba centrífuga em  $[rpm]$  durante a realização da simulação. Aqui deve ser observado a ordem de entrada destes valores: primeiro a menor rotação, depois a maior rotação e, por fim, o incremento da rotação (sempre nesta ordem).

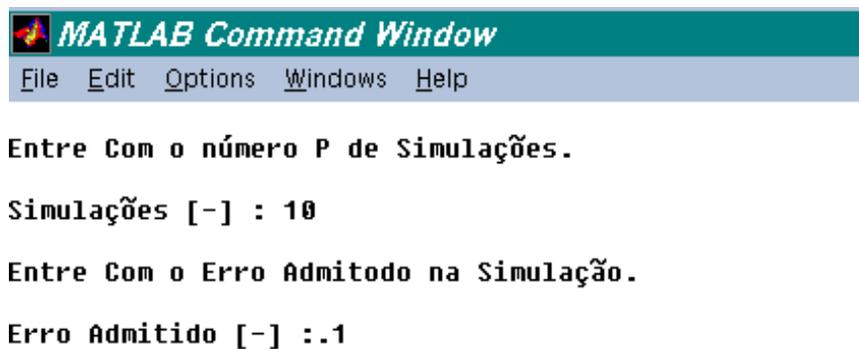
Finalizada esta entrada de valores, então automaticamente aparecerá o editor gráfico do Matlab. Este editor permitirá a entrada do desenho e dos parâmetros físicos da instalação hidráulica onde deseja-se simular o funcionamento da bomba centrífuga à rotação variável.

A Figura 4.22 mostra o editor gráfico mencionado no parágrafo anterior. Para entender o funcionamento deste editor, veja item 4.3.3 deste capítulo. Ali é explicado minuciosamente como deve ser realizado o desenho da planta hidráulica.



**Figura 4.22 - Editor Gráfico do Matlab Onde Será Possível Entrar Com o Desenho da Planta e os Parâmetros Físicos da Instalação.**

Ainda com relação ao editor da Figura 4.22 deve ser observado que a instalação hidráulica deve ser a mesma onde foram efetuadas as medições dos hidrômetros (veja isso em maiores detalhes na seção 4.3.3). Por fim, a Figura 4.23 pedirá os dois últimos parâmetros para a realização da simulação: o *número de simulações* (aconselhável no máximo 50 simulações) e o *erro admitido* em metros [m] (parâmetro auxiliar que pode ser igual a 0.1 [m] para a maioria dos casos). Deve ser observado que, optando-se por mais de 50 simulações, o tempo de processamento será bastante elevado (30 minutos ou mais). No entanto, nada impede o usuário de escolher um número maior que este.



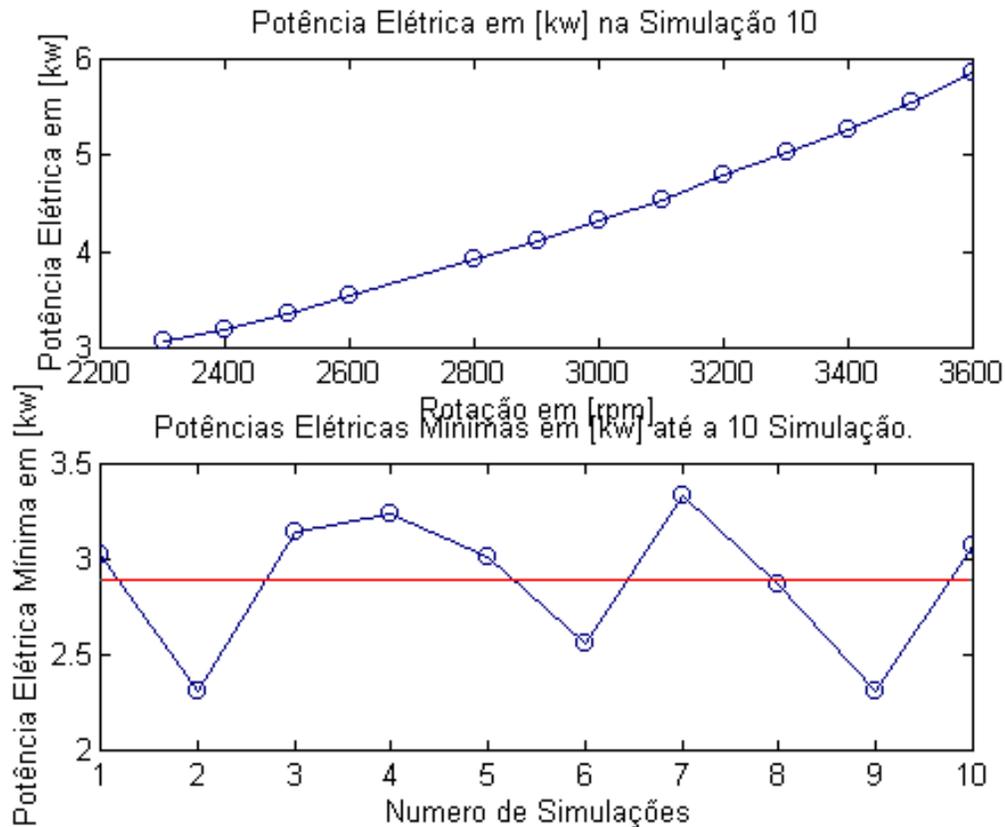
**Figura 4.23 - Parâmetros Finais de Entrada de Dados Para a Realização da Simulação.**

Terminada a entrada de dados, então bastará esperar o computador realizar os cálculos matemáticos essenciais e apresentá-los na tela gráfica do Matlab. É bom observar que, dependendo da complexidade da instalação hidráulica, isto poderá demorar alguns minutos. A Figura 4.24 apresenta um exemplo gráfico dos resultados a serem esperados. Como pode ser observado, a tela gráfica possui dois gráficos:

O primeiro representa a Potência Elétrica [ kw] x Rotação [rpm] de uma determinada simulação. Deve ser observado que algumas das rotações esperadas na simulação poderão não aparecer neste gráfico. Isto pode ser facilmente justificado.

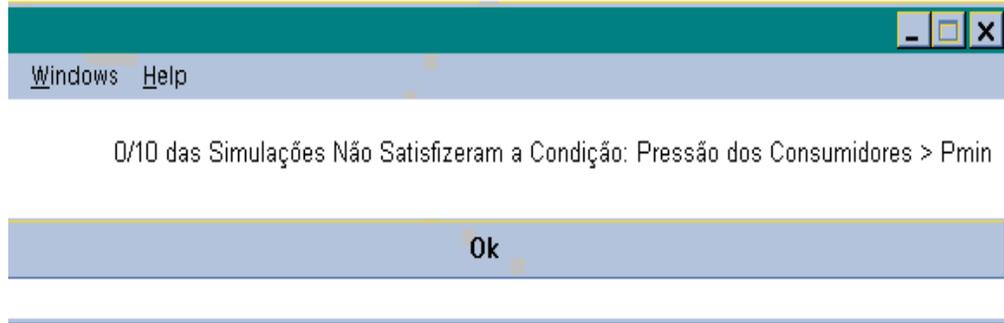
As rotações da bomba centrífuga que não satisfizerem a condição **Pressão de Saída dos Consumidores > Pmin** não serão apresentadas no gráfico, uma vez que não possuem interesse prático.

O segundo gráfico apresenta a Potência Elétrica [kw] mínima de cada simulação e a média destes valores (linha vermelha). O valor médio desta potência pode ser interpretado como sendo a potência média consumida pelo conjunto moto-bomba quando este estiver funcionando à rotação variável, ou seja, na presença do inversor de frequência.



**Figura 4.24 - Apresentação Gráfica dos Resultados Obtidos na Simulação de Monte Carlo.**

A Figura 4.25 apresenta o número de simulações que não caíram no campo básico de funcionamento da bomba centrífuga. Isto significa que em alguma simulação a rede hidráulica poderá assumir um estado de funcionamento que a bomba centrífuga não conseguirá suprir.



**Figura 4.25 - Janela Informando Quantas Simulações Não Caíram no Campo Básico de Funcionamento da Bomba Centrífuga.**

Obtidos os valores da simulação mencionados na Figura 4.24, então, poder-se-á realizar a viabilidade econômica da implantação ou não do inversor de frequência no conjunto moto-bomba que estará funcionando numa rede hidráulica em particular.

#### **4.3.2) Transposição dos Resultados**

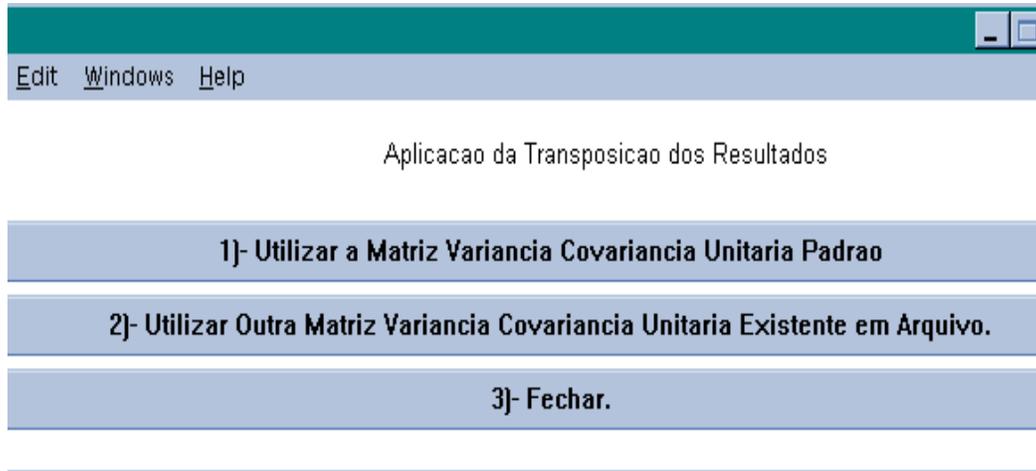
Como foi dito no início deste capítulo, na transposição dos resultados é necessário apenas o consumo mensal de água das residências. A leitura minuciosa dos hidrômetros já não é mais necessária. No entanto, a entrada da planta da instalação hidráulica ainda é necessária para a realização desta simulação.

Após o usuário ter optado por *Transposição dos Resultados* na janela inicial do aplicativo, então, uma nova janela aparecerá no vídeo (ver Figura 4.26). Esta janela pede ao usuário a escolha de uma das seguintes alternativas: **1) Utilizar a Matriz Variância-Covariância Padrão** ou **2) Utilizar Outra Matriz Variância-Covariância Unitária Existente em Arquivo.**

A primeira alternativa significa que o aplicativo aplicará a Transposição dos Resultados para a instalação atual a partir dos dados colhidos nos hidrômetros da instalação do Bairro Vista Verde (Itajubá\MG). Estes dados já vêm embutidos no programa original.

A segunda alternativa, implica que o computador aplicará a Transposição dos Resultados na instalação atual a partir da leitura de hidrômetros realizada por terceiros.

Estas medições, entretanto, já devem estar armazenadas em um arquivo no computador. Deve ser observado, que na transposição dos resultados os valores lidos nos hidrômetros não necessariamente devem ser da instalação onde deseja-se realizar a simulação, pois, neste caso, o computador gera valores para a instalação atual a partir das leituras de outra instalação.



**Figura 4.26 - Janela Inicial Para Realizar a Transposição dos Resultados.**

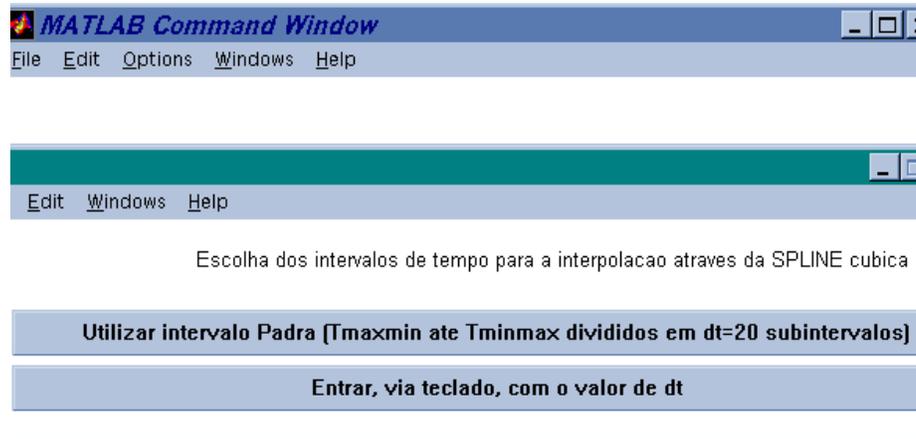
Caso o usuário opte pela segunda alternativa na janela da Figura 4.26, então ele terá que especificar o nome do arquivo onde os novos dados dos hidrômetros estão armazenados (ver Figura 4.27).



**Figura 4.27 - Especificação do Nome do Arquivo das Novas Medições dos Hidrômetros Para a Realização da Transposição dos Resultados.**

Neste momento devem ser observadas duas coisas:

- a) se o usuário especificar um arquivo inexistente ou errar o nome do mesmo, então, ocorrerá uma mensagem de erro e o programa deverá ser reiniciado;
- b) se o usuário deseja realizar a transposição a partir da leitura de dados de hidrômetros que ainda não foram armazenados no computador, então, deve ler a seção 4.3.1.2 para saber como inseri-los neste programa.



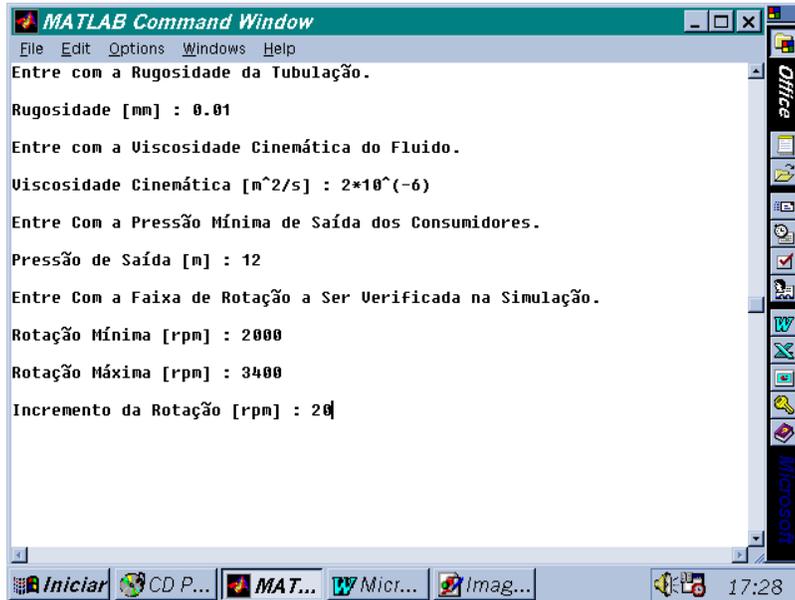
**Figura 4.28 - Interpolação Temporal dos Dados dos Hidrômetros a Partir da Spline Cúbica.**

Escolhido o arquivo, que contém a leitura no tempo dos valores dos hidrômetros, para a realização da transposição dos resultados, então, o usuário deverá especificar o número de interpolações no tempo que estas medidas devem sofrer. O padrão são vinte interpolações (ver Figura 4.28). Entretanto, se o usuário decidir por mais ou menos isto poderá ser modificado ( ver Figura 4.29).



**Figura 4.29 -Total de Interpolações no Tempo na Leitura dos Hidrômetros.**

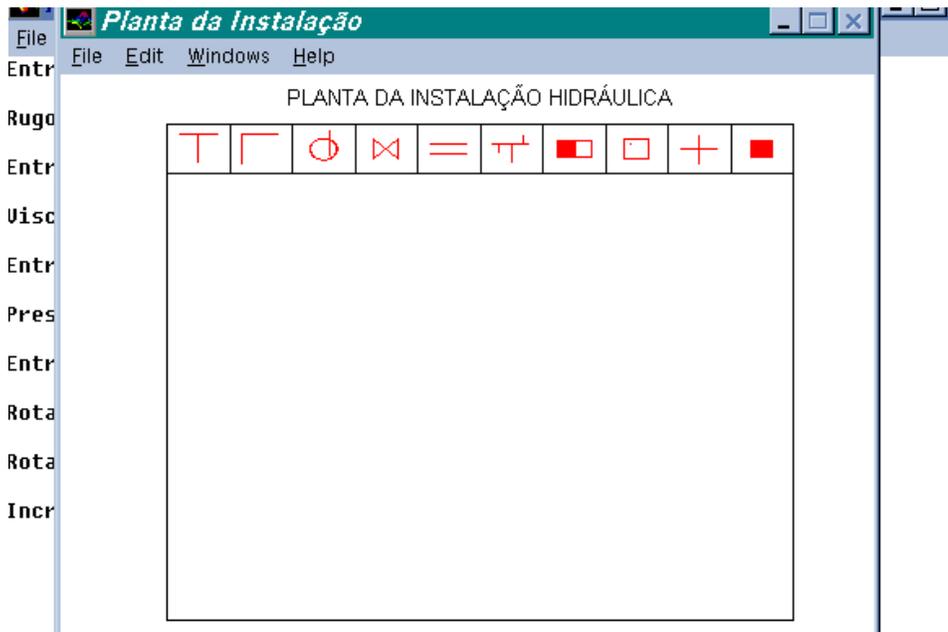
Em seguida, a tabela principal de entrada de dados aparecerá no vídeo para que o usuário faça o preenchimento da mesma. Os dados a serem preenchidos nela são os seguintes (ver Figura 4.30):



**Figura 4.30 - Tabela de Entrada de Dados Principal.**

- a) Rugosidade da Tubulação: este valor deve ser dado em milímetros [mm] e especifica o tipo de tubos que compõem a instalação hidráulica em que será feita a simulação da bomba centrífuga à rotação variável. Por exemplo, tubos de ferro fundido, aço enferrujado, plástico, etc. .
- b) Viscosidade Cinemática: este valor deverá ser inserido na unidade [m<sup>2</sup>/s]. Esta grandeza física especifica o fluido que será bombeado; por exemplo, água.
- c) Pressão de Saída: é a pressão mínima de saída dos consumidores em metros de coluna d'água [m]. Aqui é importante observar que somente as simulações onde todos os consumidores satisfaçam a esta pressão mínima de saída serão computadas.
- d) Faixa da rotação no funcionamento da bomba centrífuga: esta grandeza deve ser inserida em [rpm]. Aqui deve ser observado a ordem na entrada destes valores: primeiro a menor rotação, depois a maior rotação e, por fim, o incremento da rotação (sempre nesta ordem).

Terminado o preenchimento desta janela principal, então, o editor gráfico do Matlab aparecerá na tela (ver Figura 4.31). É neste editor que deverá ser desenhada a instalação hidráulica onde deseja-se simular o funcionamento da bomba centrífuga à rotação variável.



**Figura 4.31 - Editor Gráfico Para Entrada da Instalação Hidráulica.**

Para compreender em detalhes o funcionamento deste editor gráfico leia a seção 4.3.3 deste capítulo. Ali você encontrará todas as informações necessárias para a manipulação correta deste editor. Finalizando a entrada de dados, logo que concluído o desenho da instalação hidráulica, então, as duas últimas informações que o programa necessita para rodar aparecerão na tela (ver Figura 4.32). São elas:

- a) Número de simulações: é o número de estados diferentes que o usuário deseja que a instalação assuma durante a simulação. Deve ser observado que um número maior que 50 simulações tornará o programa extremamente lento.
- b) Erro admitido: é o erro no cálculo da pressão total da bomba em cada simulação. Este valor deve ser dado em metros [m]. Um valor típico para este erro é 0.1 [m].

```

MATLAB Command Window
File Edit Options Windows Help

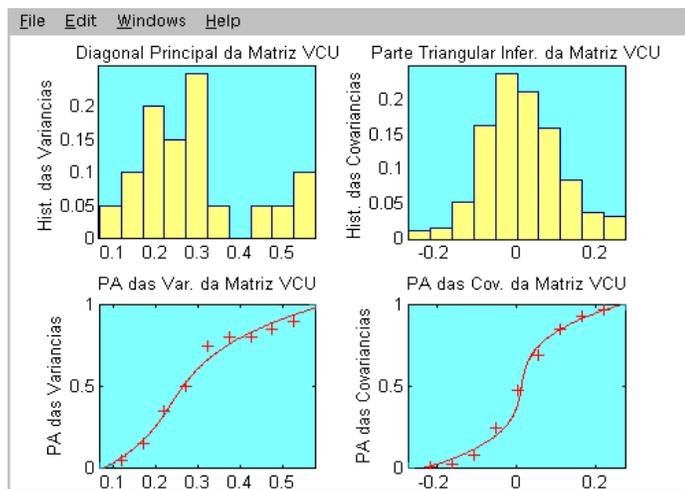
Entre Com o número P de Simulações.
Simulações [-] : 10

Entre Com o Erro Admitido na Simulação.
Erro Admitido [-] :.1|

```

**Figura 4.32 - Últimos Valores a Serem Inseridos no Computador Para a Realização da Simulação.**

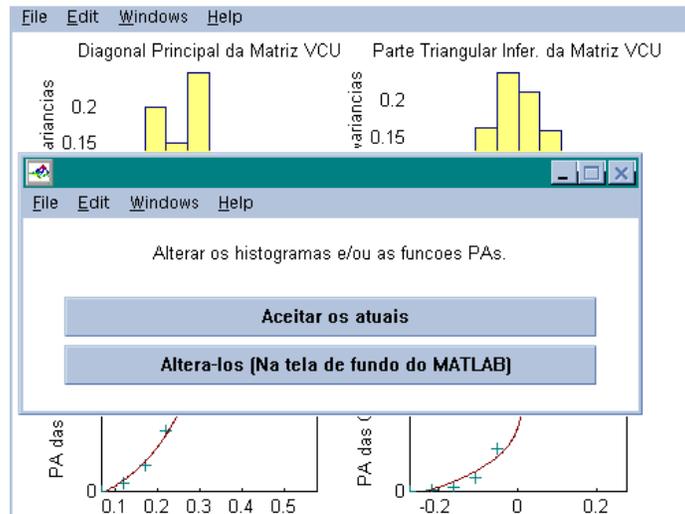
Entretanto, antes de ser iniciada a simulação do conjunto moto-bomba da instalação hidráulica especificada no editor gráfico, é pedido ao usuário que verifique os histogramas e as probabilidades acumuladas gerados a partir dos valores lidos nos hidrômetros dos consumidores e do qual serão utilizados para realizar a transposição dos resultados (ver Figura 4.33).



**Figura 4.33 - Histogramas e Probabilidades Acumuladas dos Valores Medidos nos Hidrômetros de Uma Determinada Instalação Hidráulica e Que Serão Utilizados Para a Transposição dos Resultados.**

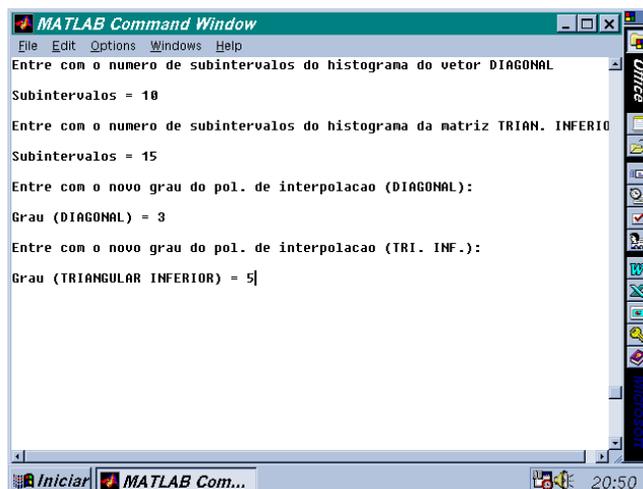
Desta forma, uma janela aparecerá na tela do computador pedindo ao usuário que modifique, ou não, o aspecto gráfico destes histogramas e probabilidades acumuladas.

A janela que permite esta escolha é apresentada na Figura 4.34. Caso o usuário não deseje alterá-los, a primeira opção deverá ser escolhida e a simulação da instalação hidráulica será iniciada automaticamente.



**Figura 4.34 - Janela Auxiliar que Permite a Escolha do Aspecto Gráfico dos Histogramas e Probabilidades Acumuladas Gerados a Partir da Leitura Detalhada dos Hidrômetros.**

Caso o usuário opte pela alteração gráfica deste parâmetros, uma nova janela aparecerá no vídeo (ver Figura 4.35).

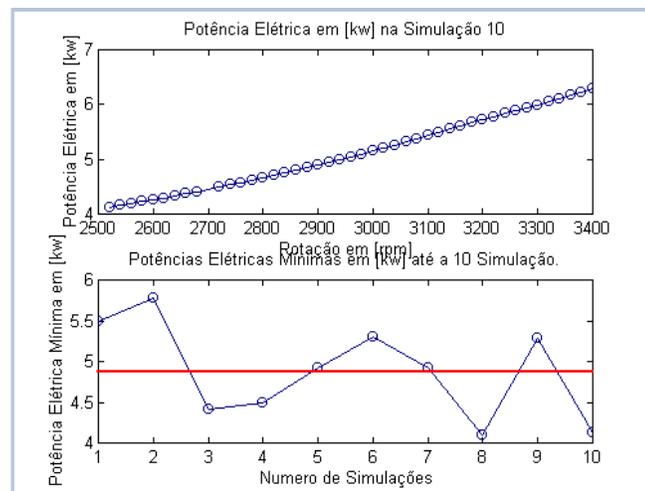


**Figura 4.35 - Entrada de Dados Que Permite Alterar o Aspecto Gráfico dos Histogramas e Probabilidades Acumuladas.**

Nesta janela existem quatro perguntas que deverão ser respondidas:

- número de subintervalos do Histograma da esquerda;
- número de subintervalos do Histograma da direita;
- grau do polinômio interpolador da probabilidade acumulada do histograma da esquerda;
- grau do polinômio interpolador da probabilidade acumulada do histograma da direita.

Deve ser observado que o método de interpolação empregado aqui é dos mínimos quadrados e o grau 3 para os polinômios empregados é o mais indicado. Terminado o preenchimento destas quatro linhas, então, a simulação do sistema será iniciada automaticamente. Após alguns minutos de simulação, o computador apresentará um gráfico semelhante ao apresentado na Figura 4.36.



**Figura 4.36 - Gráficos Obtidos Após a Simulação da Instalação Hidráulica Com o Conjunto Moto-Bomba Funcionando à Rotação Variável.**

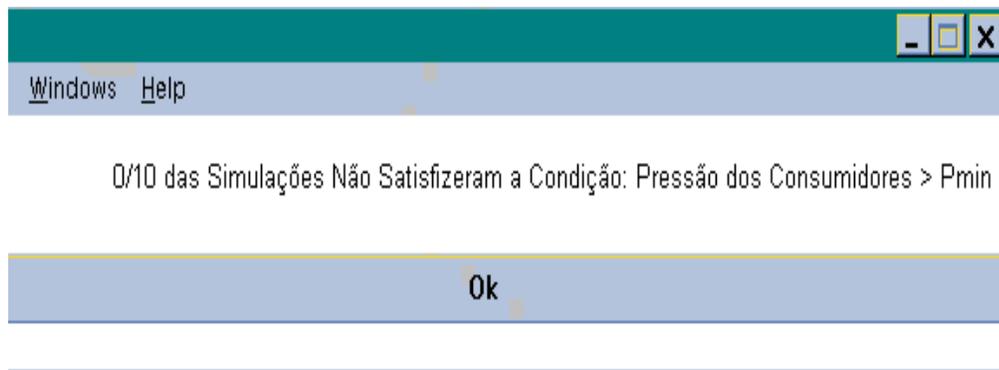
Esta Figura apresenta um exemplo gráfico dos resultados a serem esperados. Como pode ser observado, a tela gráfica apresenta dois gráficos:

O primeiro representa a Potência Elétrica [ kw] x Rotação [rpm] de uma determinada simulação. Deve ser observado que algumas das rotações esperadas na simulação poderão não aparecer neste gráfico. Isto pode ser facilmente justificado.

As rotações da bomba centrífuga que não satisfizerem a condição **Pressão de Saída dos Consumidores > Pmin** não serão apresentadas no gráfico, uma vez que não possuem interesse prático.

O segundo gráfico apresenta a Potência Elétrica [kw] mínima de cada simulação e a média destes valores (linha vermelha). O valor médio desta potência pode ser interpretado como sendo a potência média consumida pelo conjunto moto-bomba quando este estiver funcionando à rotação variável, ou seja, na presença do inversor de frequência.

A Figura 4.37 apresenta o número de simulações que não caíram no campo básico de funcionamento da bomba centrífuga. Isto significa que em alguma simulação a rede hidráulica poderá assumir um estado de funcionamento que a bomba centrífuga não conseguirá suprir.



**Figura 4.37 - Janela Informando Quantas Simulações Não Caíram no Campo Básico de Funcionamento da Bomba Centrífuga.**

Obtidos os valores da simulação mencionados na Figura 4.36, então, poder-se-á realizar a viabilidade econômica da implantação ou não do inversor de frequência no conjunto moto-bomba que estará funcionando numa rede hidráulica em particular.

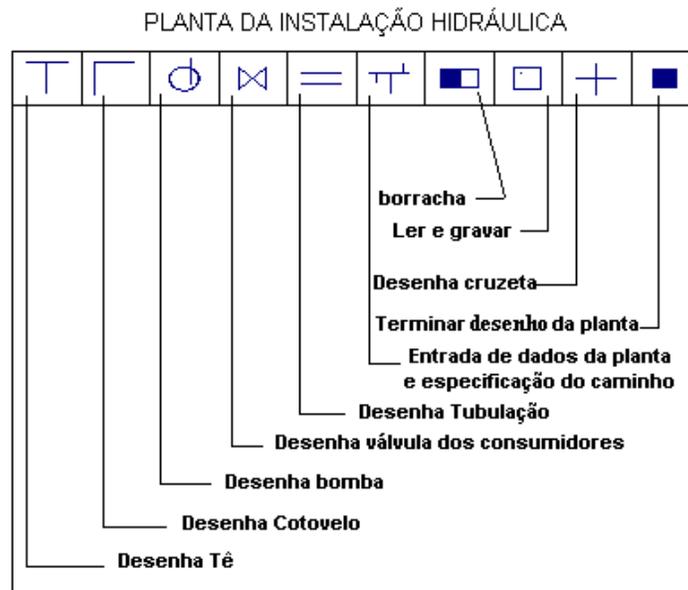
### 4.3.3) Usando o Editor Gráfico do Matlab Para Desenhar a Instalação Hidráulica

Nesta seção final será explicado como utilizar o editor gráfico do Matlab para a construção da instalação hidráulica, do qual, o conjunto moto-bomba fará parte durante a simulação. Devem ser observados inicialmente quatro pontos básicos:

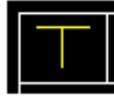
- a) a instalação hidráulica deverá ser desenhada no editor gráfico;
- b) as dimensões de seus elementos físicos (tubos, cotovelos, tês, ...) deverão também ser especificadas após o desenho da instalação hidráulica ser concluído;
- c) os caminhos existentes entre a bomba e todos os consumidores de água potável deverão também ser especificados;
- d) existe uma pequena diferença na entrada de dados quando opta-se pelo método direto de Monte Carlo ao invés da transposição dos resultados.

Tendo em mente estes quatro tópicos fundamentais para a utilização do editor, então, a seguir, uma explicação detalhada destes procedimentos será feita.

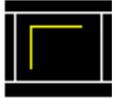
A Figura 4.38 apresenta os ícones básicas deste editor gráfico. Elas são num total de 10 ícones e da esquerda para a direita significam, respectivamente, o seguinte:



**Figura 4.38 - Ícones Básicas Para a Manipulação do Editor Gráfico do Matlab na Construção da Instalação Hidráulica.**



Desenha os tês sobre a tubulação.



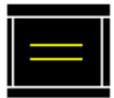
Desenha os cotovelos sobre a tubulação.



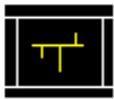
Desenha a bomba sobre a tubulação.



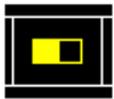
Desenha a válvula dos consumidores (bóia) na instalação hidráulica.



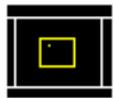
Desenha os tubos da instalação.



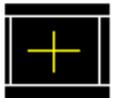
Permite a entrada das dimensões dos elementos já desenhados na instalação, assim como, a especificação dos caminhos existentes entre os consumidores e a bomba centrífuga.



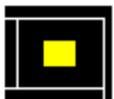
Apaga os elementos desenhados na tela que são indesejáveis.



Lê um arquivo ou grava um arquivo de uma instalação hidráulica já desenhada no editor.

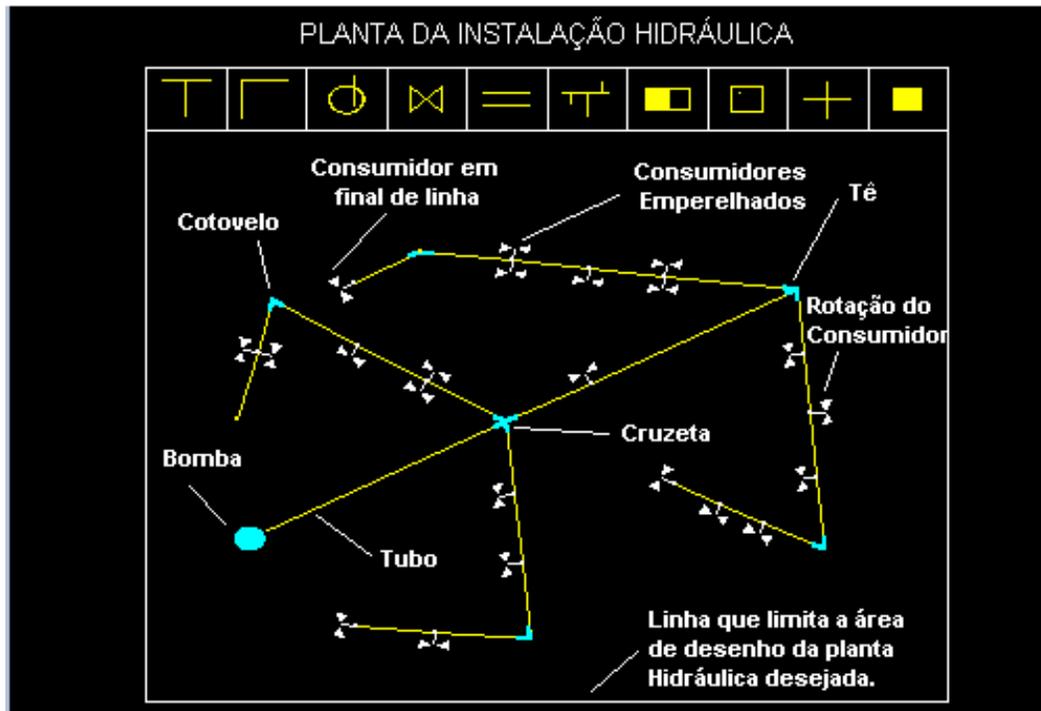


Desenha a cruzeta da Instalação hidráulica.



Finaliza o editor gráfico.

A Figura 4.39 mostra em detalhes uma instalação hidráulica construída inteiramente no editor gráfico do Matlab. Assim sendo, a seguir é explicado como operar cada uma dos ícones apresentadas acima.

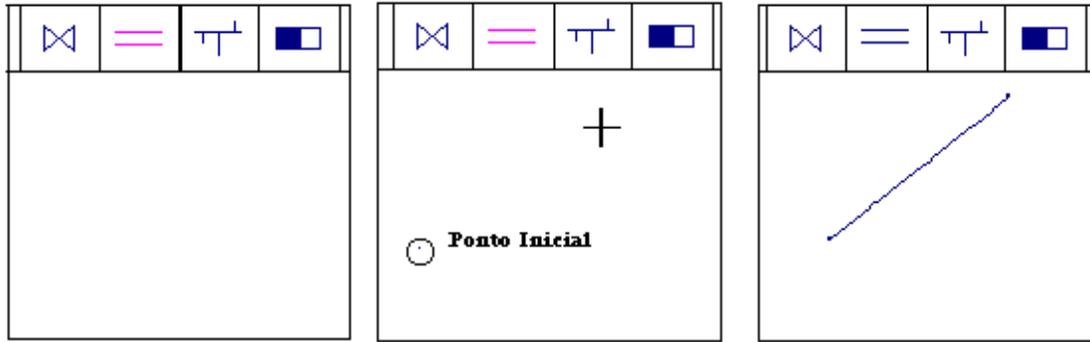


**Figura 4.39 - Exemplo de Uma Instalação Hidráulica Construída Inteiramente no Editor Gráfico do Matlab.**

#### 4.3.3.1) Desenhando as Tubulações

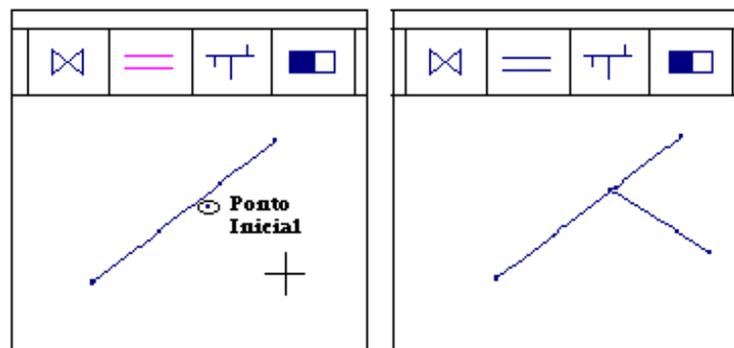
Para desenhar um tubo no editor gráfico deve-se inicialmente pressionar com o botão esquerdo do mouse o ícone em lilás da Figura 4.40. Em seguida, deve-se fazer o seguinte:

- posicionar o cursor do mouse no ponto inicial onde se deseja desenhar o tubo e pressionar o botão esquerdo do mouse;
- soltar o botão esquerdo do mouse e posicionar o cursor no ponto final onde deseja-se desenhar o tubo;
- pressionar novamente o botão esquerdo do mouse e o tubo será desenhado automaticamente (veja Figura 4.40).



**Figura 4.40 - Etapas Necessárias Para Desenhar um Tubo na Tela do Editor Gráfico do Matlab.**

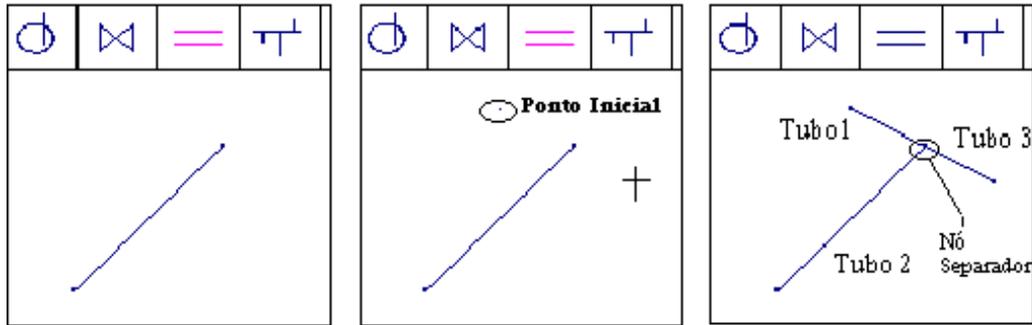
É importante observar que o editor faz a união automática de dois tubos próximos como mostrado nas Figura 4.41.



**Figura 4.41 - O Editor Gráfico do Matlab Faz a União de Dois Tubos Próximos Automaticamente.**

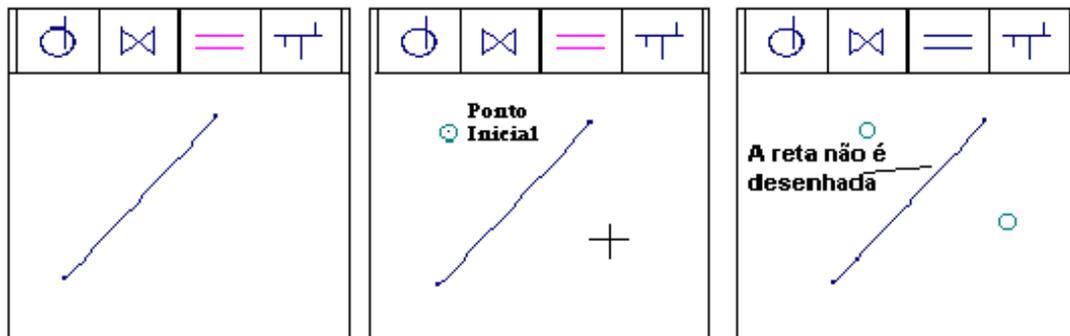
Deve-se ter em mente que a união de dois tubos forma um nó que identificará um tubo do outro. Isto é bastante importante, pois, o aplicativo exigirá mais adiante, como parâmetros de entrada, o comprimento e o diâmetro de cada um dos tubos formadores da instalação hidráulica. Deste forma, os nós são bastante importantes para separar corretamente os tubos formadores da instalação hidráulica desenhada no computador.

A Figura 4.42 mostra um outro tipo de concordância automática dos tubos que o editor é capaz de fazer. Observando-se esta Figura percebe-se que a união automática dos dois tubos formou um nó. Este nó é o separador dos *três novos tubos* formados por esta união.



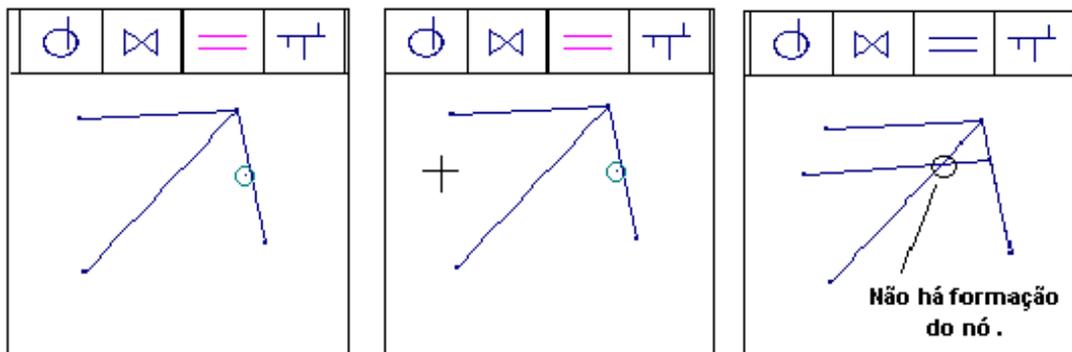
**Figura 4.42 - União Automática de Dois Tubos Formando Um Nó Que Separa Três Novos Tubos da Instalação.**

A Figura 4.43 demonstra uma limitação do editor. Nesta Figura observa-se que o aplicativo não é capaz de criar um nó na interseção de dois tubos desenhados. Por este motivo o tubo não é desenhado. Para contornar este problema o usuário terá que aplicar duas vezes a concordância mostrada na Figura 4.41.



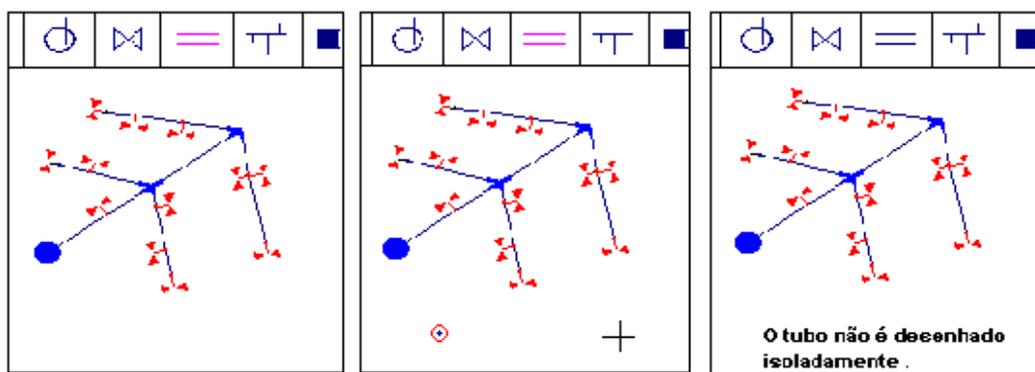
**Figura 4.43 - União de Dois Tubos Que o Aplicativo Não é Capaz de Executar.**

A Figura 4.44 demonstra um tipo de concordância que o computador aceita porém não forma um nó que deve separar um tubo do outro. O motivo porque isto acontece é o mesmo da Figura 4.43, ou seja, o computador não identifica o nó devido ao cruzamento de dois tubos.



**Figura 4.44 - Tipo de Concordância Que o Computador Aceita Mas Que Deve Ser Evitada.**

Por fim, a Figura 4.45 demonstra ser impossível desenhar um tubo isolado dos demais. Isto ocorre, pois o computador não é capaz de simular duas instalações hidráulicas ao mesmo tempo.



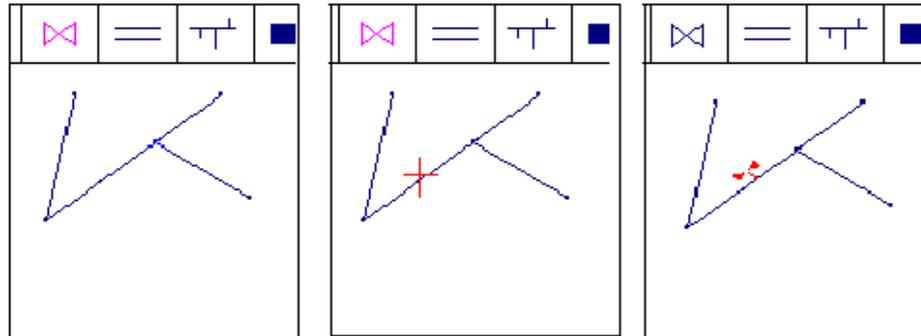
**Figura 4.45 - Um Tubo Não Pode Ser Desenhado Isoladamente dos Demais.**

#### 4.3.3.2) Desenhando as Válvulas dos Consumidores

A Figura 4.46 ilustra como realizar o desenho das válvulas dos consumidores (bóias). Como pode ser visto nesta Figura, deve-se fazer o seguinte:

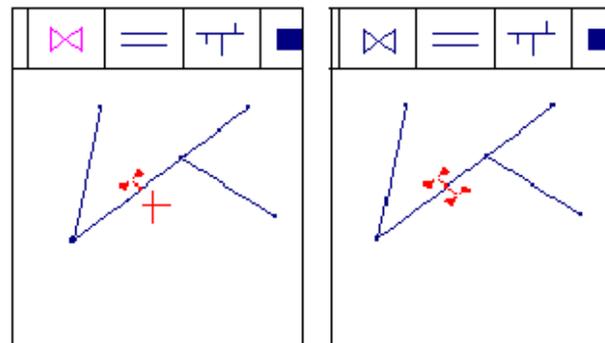
- Pressionar o botão esquerdo do mouse na ícone em lilás da Figura 4.46;
- Posicionar o cursor sobre o tubo onde se deseja desenhar a válvula e pressionar o botão esquerdo do mouse novamente;
- A Válvula será desenhada automaticamente sobre o tubo.

Nota: Para desenhar uma nova válvula o usuário terá que ativar novamente a ícone mencionada no parágrafo anterior.



**Figura 4.46 - Desenhando Uma Válvula (Bóia) de Um Consumidor na Planta da Instalação Hidráulica.**

A Figura 4.47 ilustra o caso de que é possível desenhar uma válvula emparelhada com outra. Isto ilustra o caso comum de consumidores vizinhos poderem ser representados na planta. Neste caso, o nó é o mesmo para ambos os consumidores, e o computador, é capaz de criá-lo automaticamente.

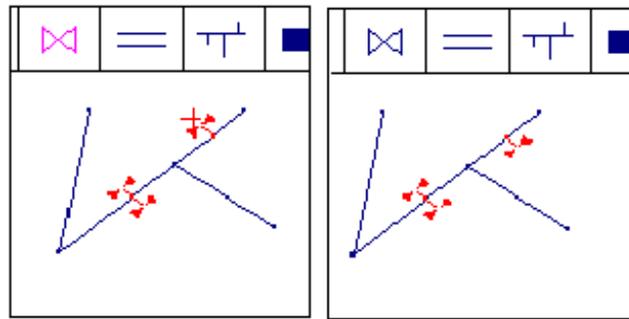


**Figura 4.47 - Desenhando Consumidores Vizinhos na Planta.**

Para isso, basta pressionar o botão esquerdo do mouse, sobre o nó da válvula já existente, que o computador desenhá a próxima válvula automaticamente.

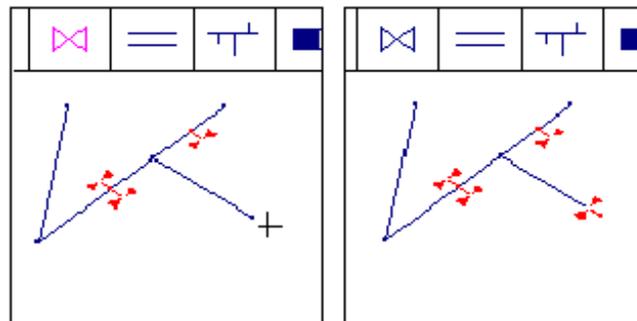
Deve ser observado que, se o usuário pressionar o botão esquerdo do mouse sobre a cabeça da válvula, já existente, então outra válvula não será desenhada, mas sim a atual

será rotacionada de 180 graus (ver Figura 4.48). Este recurso tem a finalidade de aproveitar melhor o espaço do editor para confecção do desenho.

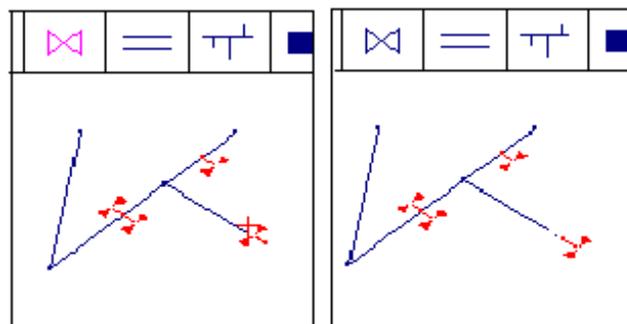


**Figura 4.48 - Rotacionando em 180 Graus Uma Bóia.**

O Recurso mencionado anteriormente poderá ser aplicado na Figura 4.49. Observando-a percebe-se que a válvula, ao ser desenhada pelo computador no final de linha, encobre parcialmente o tubo já desenhado. Desta forma, ao pressionar a cabeça desta válvula ela sofrerá uma rotação de 180 graus (como ilustra a Figura 4.50) e deixará a lateral final do tubo novamente livre onde se poderá desenhar um novo consumidor.



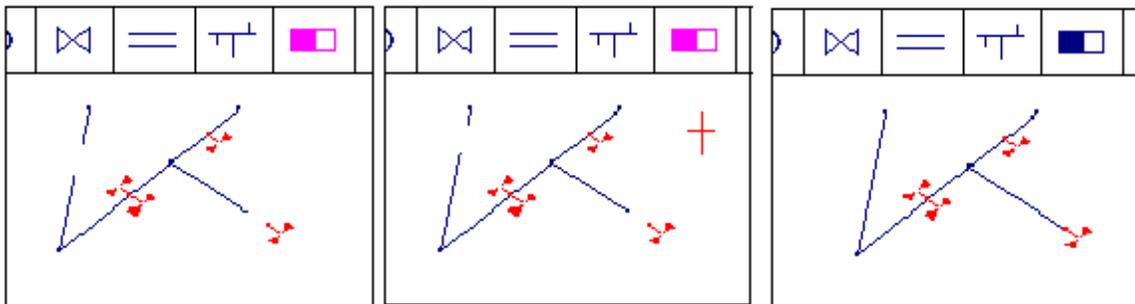
**Figura 4.49 - Válvula em Final de Linha Quando Encobre o Tubo Já Existente.**



**Figura 4.50 - Rotacionando Uma Válvula em Final de Linha.**

Finalmente, a Figura 4.51 apresenta rapidamente o recurso da borracha. Para eliminar os borrões da Figura faça o seguinte:

- Pressione o botão esquerdo do mouse sobre a ícone lilás da Figura 4.51;
- Posicione o cursor do mouse sobre uma *região em branco* da instalação;
- Pressione novamente o botão esquerdo do mouse. O computador eliminará automaticamente os borrões da tela.

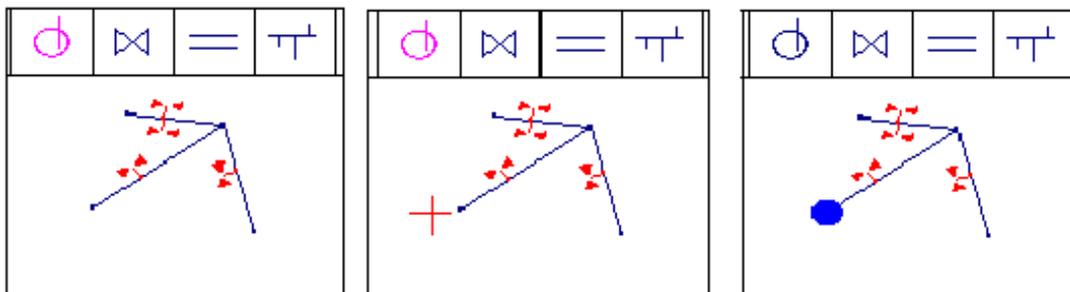


**Figura 4.51 - Limpando os *Borrões* de Um Desenho.**

#### 4.3.3.3) Desenhando a Bomba

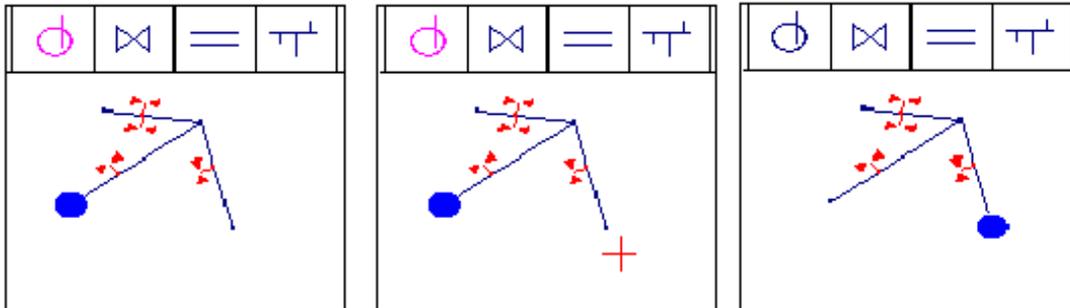
Para desenhar uma bomba sobre a instalação hidráulica faça o seguinte:

- Pressione o botão esquerdo do mouse sobre a ícone lilás da Figura 4.52;
- Posicione o cursor do mouse sobre um *extremo de tubulação* e pressione novamente o botão esquerdo do mouse;
- A bomba será desenhada automaticamente sobre o tubo selecionado (veja novamente a Figura 4.52).



**Figura 4.52 - Desenhando a Bomba Centrífuga Sobre a Planta.**

Deve ser observado que este simulador possibilita a presença de apenas uma única bomba. Desta forma, ao se tentar desenhar uma segunda bomba o editor não aceitará esta tarefa. Na tentativa de se inserir uma nova bomba, o editor gráfico entenderá que o usuário deseja apenas deslocá-la para uma nova posição (ver Figura 4.53).

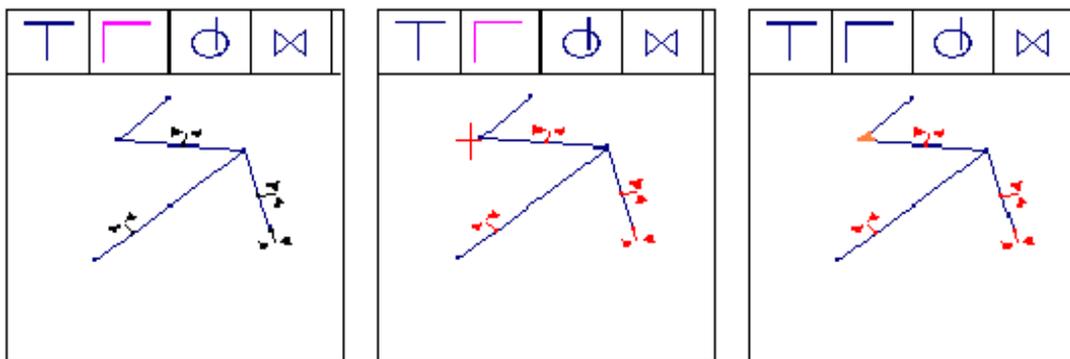


**Figura 4.53 - Deslocando a Bomba Para Uma Nova Posição.**

#### 4.3.3.4) Desenhando o Cotovelo

Para desenhar um cotovelo siga os seguintes passos:

- Pressione com o botão esquerdo do mouse a ícone em lilás da Figura 4.54;
- Posicione o cursor do mouse sobre o nó que *une dois tubos*;
- Pressione o botão esquerdo do mouse sobre este nó e o cotovelo será desenhado automaticamente.



**Figura 4.54 - Desenhando Um Cotovelo na Instalação.**

Caso o nó selecionado una três ou mais tubos, então o computador anulará esta tarefa, pois este seria um caso típico de um tê (ou cruzeta) e não cotovelo.

#### 4.3.3.5) Desenhando o Tê

A tarefa aqui é semelhante ao desenho do cotovelo, ou seja:

- Pressione com o botão esquerdo do mouse a ícone em lilás da Figura 4.55;
- Posicione o cursor do mouse sobre o nó que une três tubos;
- Pressione o botão esquerdo do mouse sobre o nó selecionado e o tê será desenhado automaticamente.

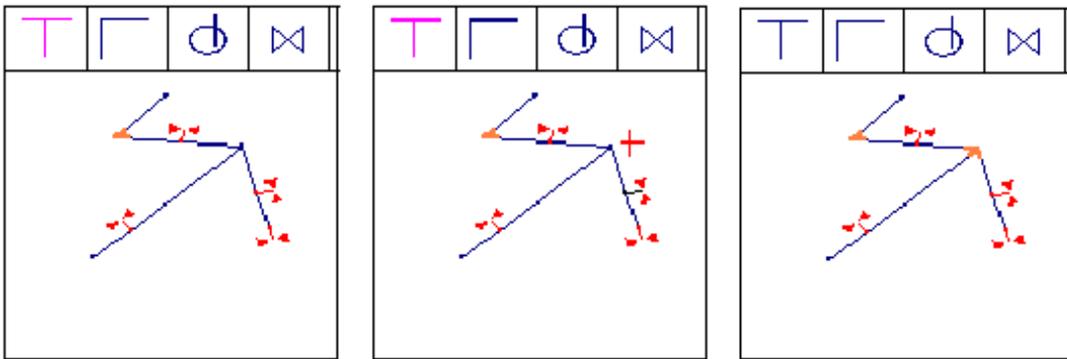


Figura 4.55 - Desenhando Um Tê.

#### 4.3.3.6) Desenhando a Cruzeta

Para desenhar uma cruzeta siga os seguintes passos:

- Pressione com o botão esquerdo do mouse a ícone em lilás da Figura 4.56;
- Posicione o cursor do mouse sobre o nó que une quatro tubos;
- Pressione o botão esquerdo do mouse sobre o nó selecionado e a cruzeta será desenhada automaticamente.

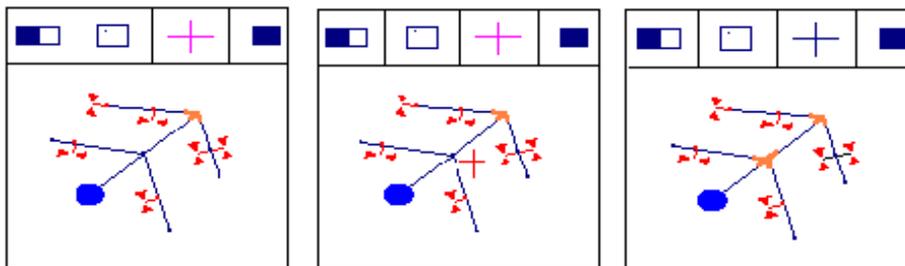
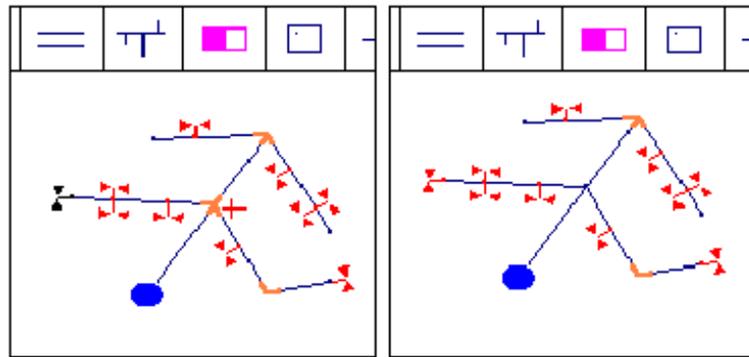


Figura 4.56 - Desenhando Uma Cruzeta.

#### 4.3.3.7) Apagando Um Objeto de Desenho

Para apagar uma cruzeta faça o seguinte:

- Pressione com o botão esquerdo do mouse a ícone em lilás da Figura 4.57;
- Posicione o cursor do mouse sobre a cruzeta a ser eliminada;
- Pressione novamente o botão esquerdo do mouse e ela será eliminada automaticamente.



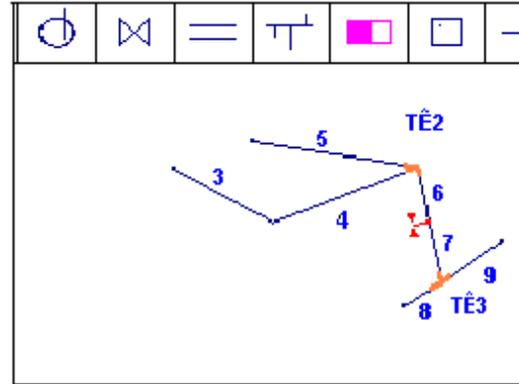
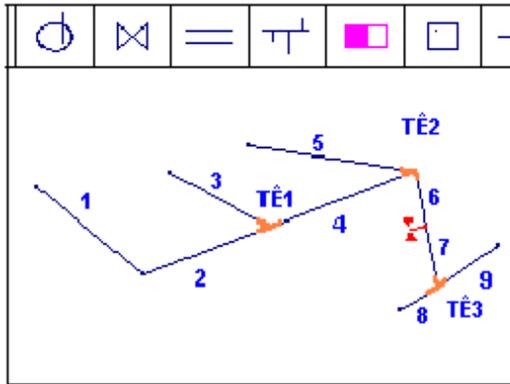
**Figura 4.57 - Apagando Uma Cruzeta no Desenho.**

Para se apagar um tê, um cotovelo ou uma válvula o procedimento é semelhante ao exemplificado para o caso de uma cruzeta. Desta forma, não será necessário repetir este procedimento. A bomba uma vez desenhada não poderá ser apagada, mas sua posição na planta hidráulica poderá ser alterada pela ícone da BOMBA. A operação para se apagar um tubo é um pouco mais trabalhosa, pois é importante ter em mente; duas importantes regras:

Primeira regra: *Um tubo só pode ser apagado se este for um extremo da tubulação e não possuir nenhum elemento hidráulico (bomba, tê, cotovelo, ...) em seus dois extremos.*

Segunda Regra: *É impossível repartir a planta hidráulica em duas ou mais partes.*

Seguindo o princípio acima, somente o tubo 1 da Figura 4.58.a poderá ser apagado de imediato. Assim, se o usuário desejar eliminar o tubo 2 terá que apagar primeiro o tubo 1 (tubo 2 vira extremo) e em seguida o tê 1 (tubo 2 fica com os extremos livres). Observe então, que a instalação final não poderá ser dividida em outras duas.



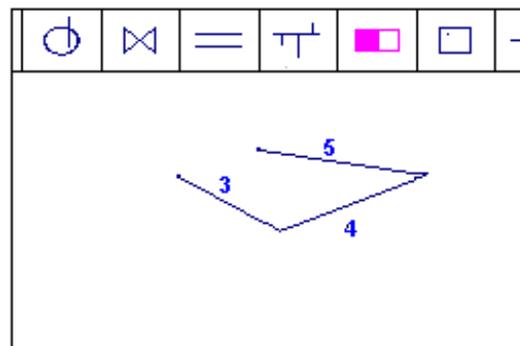
**Figura 4.58.a - Instalação Completa. Figura 4.58.b - Instalação Final Após a Tentativa de se Apagar o Tubo 2.**

Seja então, o caso mais complicado: apagar o tubo 7 da Figura 4.58.b. Neste caso, os passos serão o seguinte:

- Apagar o tê 3 e a válvula (tubo 7 fica livre nos nós);
- Apagar os tubos 8 e 9 (tubo 7 vira extremo).

Entretanto, aqui há um pequeno problema: ao apagar a válvula, os nós comuns dos tubos 6 e 7 desaparecem, pois estes dois tubos se transformam em apenas um. Desta forma, o tê 2 deverá ser apagado também.

Agora sim, o usuário poderá apagar o tubo 7 (observe que o tubo 6 inevitavelmente desaparece). A Figura 4.59 mostra o resultado final desta operação.



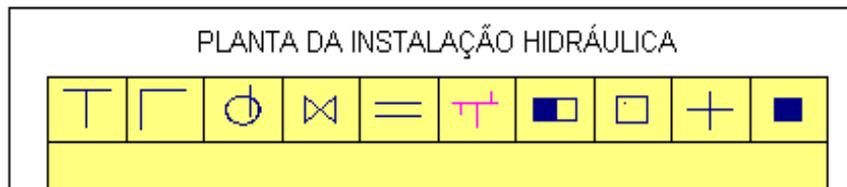
**Figura 4.59 - Resultado Final da Tentativa de se Apagar o Tubo 7 da Figura 4.58.b.**

Há também três limitações na tentativa de se tentar apagar um tubo, são elas:

- a) Se houver apenas um tubo na tela ele não poderá ser apagado (limitação técnica do software);
- b) Se o tubo desenhado na tela for muito pequeno, o aplicativo não conseguirá identificá-lo, e portanto; não poderá ser apagado (outra limitação técnica);
- c) Não há uma ícone que permita apagar uma região inteira da instalação (os elementos da planta só poderão ser apagados individualmente).

#### 4.3.3.8) A Ícone Para a Entrada de Dados

A entrada de dados para o dimensionamento da planta desenhada no editor gráfico do Matlab será iniciada a partir do momento que a ícone em lilás da Figura 4.60 seja pressionada.

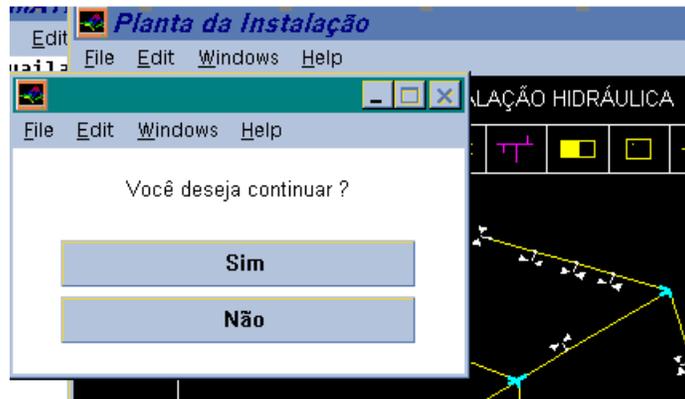


**Figura 4.60 - Ícone Para Entrada do Dimensionamento da Planta.**

Deve ser observado que esta ícone possui duas tarefas distintas a serem executadas: o dimensionamento dos elementos físicos da instalação e a especificação dos caminhos existente entre a bomba e os consumidores da rede. Desta forma, os itens 4.3.3.8.1 e 4.3.3.8.2 tratam, respectivamente, destes dois assuntos individualmente.

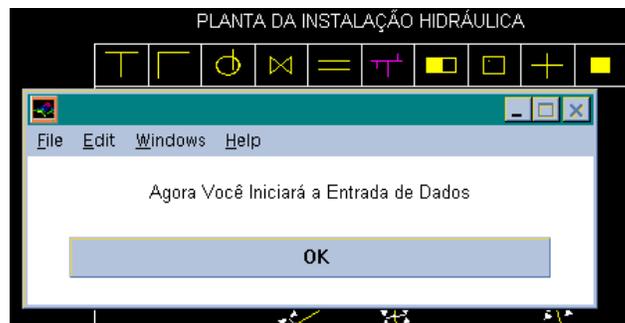
##### 4.3.3.8.1) Entrada de Dados dos Elementos da Planta

A ícone em lilás da Figura 4.60 ao ser pressionada exibirá a janela de opções como ilustrado na Figura 4.61. Esta janela pede ao usuário se ele deseja confirmar o início desta tarefa, que para instalações de vários consumidores, exigirá bastante tempo.



**Figura 4.61 - Janela Que Confirma o Início da Entrada de Dados.**

Em seguida outra mensagem aparecerá na tela (ver Figura 4.62). Esta janela diz ao usuário para ele iniciar a entrada de dados. Para isto basta pressionar a barra de **Ok**.



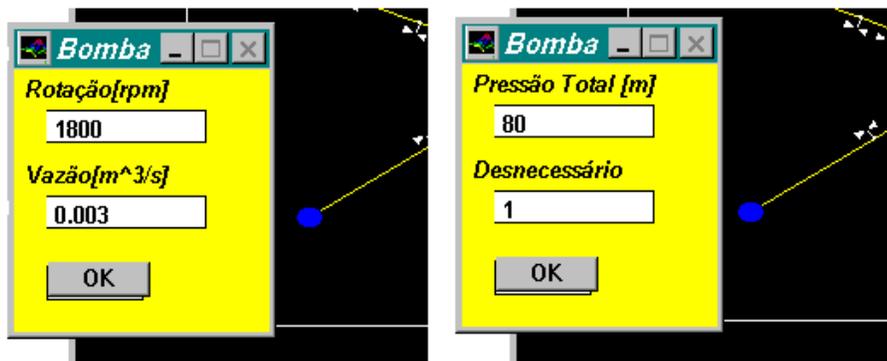
**Figura 4.62 - Mensagem de Aviso Para Início da Entrada de Dados.**

Em seguida, o usuário ao pressionar qualquer elemento (com o botão esquerdo do mouse) que esteja desenhado na tela fará aparecer uma janela de entrada de dados. É importante observar que para elementos diferentes (bomba, tubos, cotovelos, ...) também ter-se-ão janelas diferentes.

Seja, por exemplo, o caso da bomba (ver Figura 4.63). Ao pressionar o botão esquerdo do mouse sobre o desenho da bomba, então a janela da esquerda da Figura 4.63 aparecerá automaticamente. Esta janela pede ao usuário que entre com a rotação nominal da bomba em [rpm] e a vazão nominal em [m<sup>3</sup>/s]. Ao pressionar o botão de **Ok** esta janela sumirá automaticamente e a da direita tomará seu lugar. Esta nova janela pede ao usuário que entre com o valor nominal da pressão total da bomba em [m]. A mensagem inferior desta janela, onde está escrito **Desnecessário**, significa que o usuário não precisa

digitar nada neste espaço. É importante observar que a janela de entrada de dados possui as seguintes limitações:

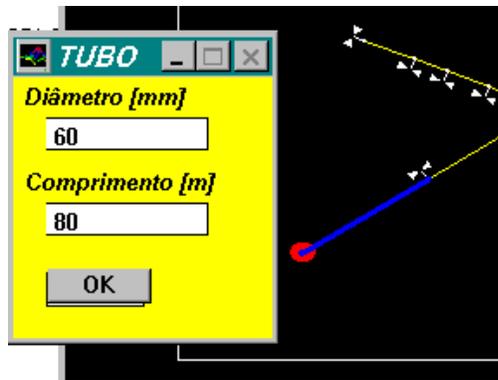
- a) A janela não aceita a notação decimal;
- b) A parte fracionária do número deve ser separada por um ponto e não pela vírgula;
- c) A entrada de dados só será executada pelo teclado, mas somente se o cursor do mouse também estiver situado sobre um ponto qualquer desta janela.



**Figura 4.63 - Entrada de Dados Para a Condição Nominal da Bomba.**

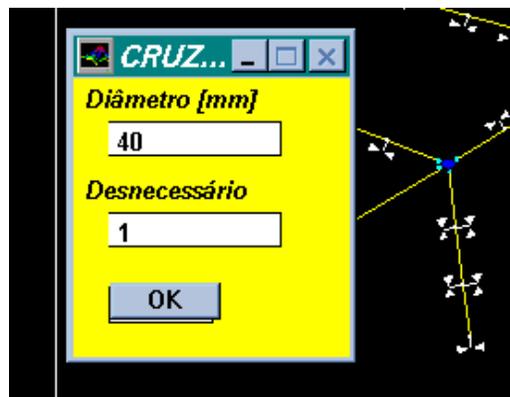
É interessante observar que ao se pressionar um elemento para executar a entrada de dados, este se tornará azul. Por outro lado, ao se concluir esta entrada de dados, o elemento ficará permanentemente vermelho (ver Figura 4.64). Esta alternância de cores tem a finalidade de identificar os elementos que já foram dimensionados daqueles que ainda não foram.

Por exemplo, a Figura 4.64 mostra que a bomba já foi dimensionada, pois esta já está pintada de vermelho. Por outro lado, o tubo em azul identifica que este é que está sendo modificado no momento. Os tubos amarelos são aqueles que ainda não foram modificados.



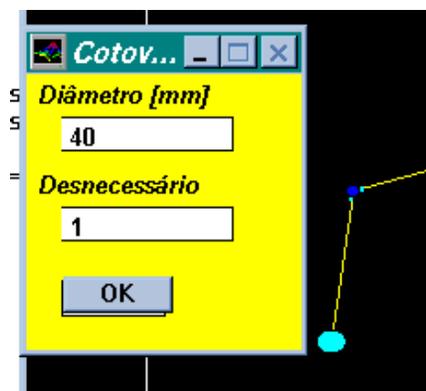
**Figura 4.64 - Dimensionando Um Tubo.**

No caso de tubos deve-se mencionar o seguinte em seu dimensionamento: o seu diâmetro em [mm] e seu comprimento em [m]. É importante respeitar estas unidades. O aplicativo não possui um recurso que permita alterar estas unidades.



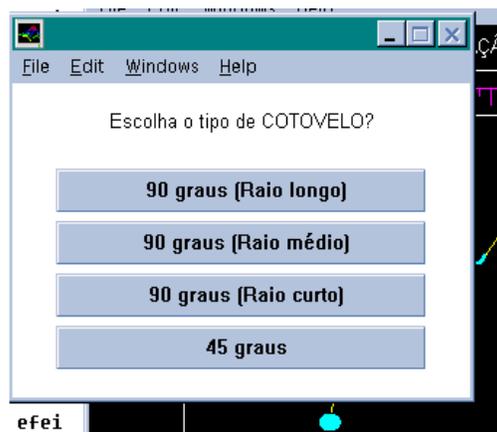
**Figura 4.65 - Dimensionamento de Uma Cruzeta.**

No dimensionamento da cruzeta deve-se entrar apenas com o diâmetro da mesma (em milímetros). A mensagem **Desnecessário** ( exibida na parte inferior da janela da Figura 4.65) significa que este espaço não necessita ser preenchido. É importante observar que o dimensionamento do tê é semelhante ao da cruzeta e por isso será omitido. Observe que a cruzeta também fica azul quando é selecionada para a entrada de dados. O dimensionamento dos cotovelos é um pouco diferente, pois ao ser digitado seu diâmetro (também em milímetros) como mostra a Figura 4.66 , então uma nova janela aparecerá no vídeo (ver Figura 4.67).



**Figura 4.66 - Dimensionamento de Um Cotovelo.**

A janela da Figura 4.67 pede ao usuário que especifique o tipo de cotovelo que a instalação possui (raio longo, raio curto, ...). Estas informações devem ser preenchidas corretamente, pois serão utilizadas no cálculo da perda de carga da instalação hidráulica durante a simulação do sistema.



**Figura 4.67 - Tipos de Cotovelos Que o Aplicativo Possui.**

Para o dimensionamento das válvulas dos consumidores, o usuário deve ter em mente duas diferenças básicas deste aplicativo: Aplicação Direta do Método de Monte Carlo ou Transposição dos Resultados. Se ao iniciar este aplicativo, o usuário tenha optado pela Aplicação Direta do método, então a janela de entrada de dados (para as bóias dos consumidores) será igual àquela apresentada na Figura 4.68. Por outro lado, se o usuário tenha optado por Transposição dos Resultados no início do aplicativo, então a janela para entrada de dados (para as bóias dos consumidores) será igual àquela

apresentada na Figura 4.69. Deve-se ter isto em mente, pois esta é uma diferença bastante importante. Desta forma, a seguir é explicado separadamente cada uma destas janelas.



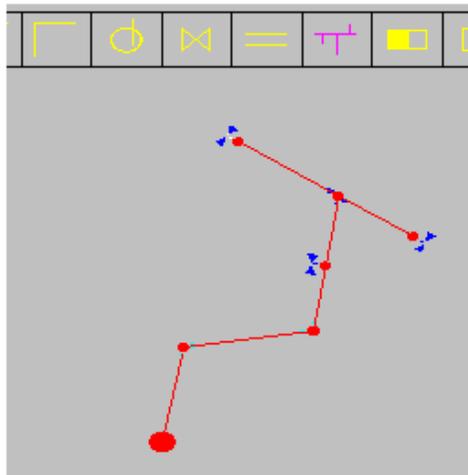
**Figura 4.68 - Janela de Entrada de Dados Para as Bóias dos Consumidores Quando Estiver Sendo Aplicado Diretamente o Método de Monte Carlo.**

A janela da Figura 4.68 exige que o usuário tenha optado pela Aplicação Direta do Método de Monte Carlo. Nela pode-se observar que o usuário deve preencher a duas perguntas: a elevação da bóias (em metros) em relação a bomba centrífuga e a numeração do consumidor. Deve-se ter um cuidado especial com relação a numeração dos consumidores. A numeração aqui deve coincidir com a numeração feita na Figura 4.10 (entrada de dados dos valores lidos nos hidrômetros dos consumidores) do item 4.3.1.2. O consumidor 1 da tabela da Figura 4.10 deve ser o mesmo que o consumidor 1 da planta da instalação e assim por diante.

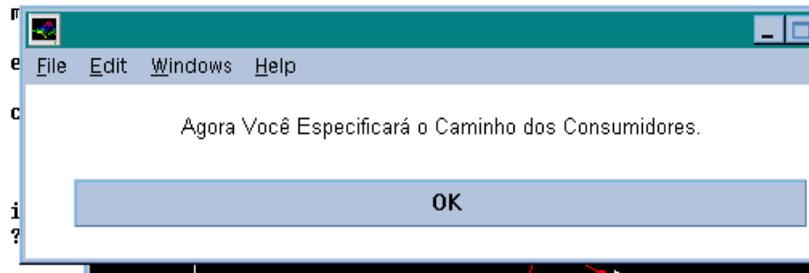
Por outro lado, em se tratando da aplicação da Transposição dos Resultados esta numeração não será necessária (ver Figura 4.69). Como pode ser visto nesta Figura o usuário terá que entrar com duas informações básicas: a elevação do consumidor em relação à bomba centrífuga e a vazão mensal do referido consumidor (em  $m^3/s$ ). Como foi dito anteriormente, os elementos físicos da instalação que já foram dimensionados vão ficando permanentemente vermelhos (ver Figura 4.70). Quando todos os elementos forem dimensionados, o computador automaticamente exibirá a mensagem da Figura 4.71, que pede ao usuário que inicie a especificação dos caminhos existentes entre a bomba e os consumidores.



**Figura 4.69 - Janela de Entrada de Dados Para as Bóias dos Consumidores Quando Estiver Sendo Aplicado a Transposição dos Resultados.**

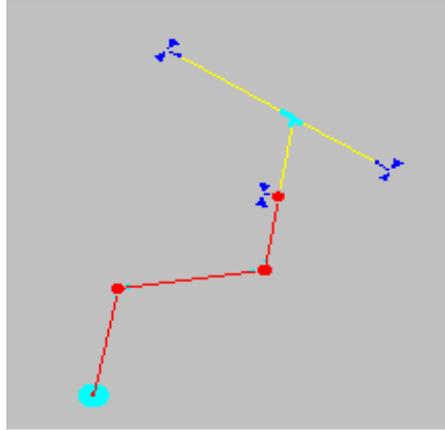


**Figura 4.70 - Finalização da Entrada de Dados.**



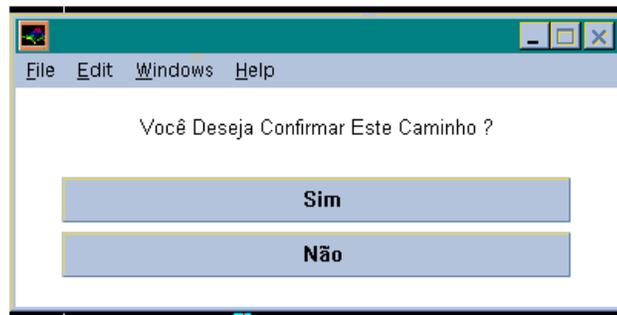
**Figura 4.71 - Mensagem Que Pede ao Usuário Iniciar a Especificação dos Caminhos Existentes Entre a Bomba e os Consumidores.**





**Figura 4.73 - Especificando o Caminho de Um Consumidor.**

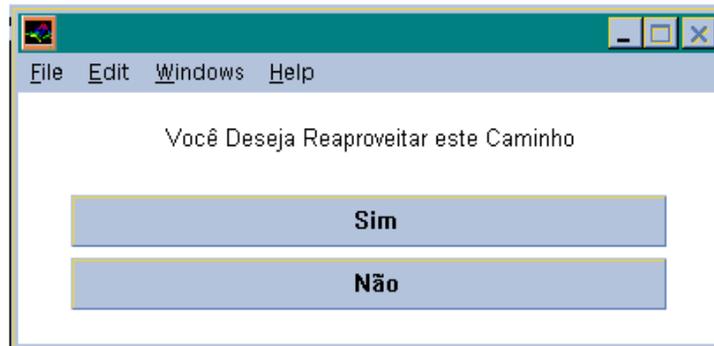
Quando o usuário terminar a especificação do caminho entre um consumidor e a bomba, este deverá pressionar o botão esquerdo do mouse sobre a válvula do consumidor associado a este caminho. Esta é a forma que o computador compreende o término de um determinado caminho. Desta forma, uma mensagem aparecerá no vídeo, como ilustra a Figura abaixo.



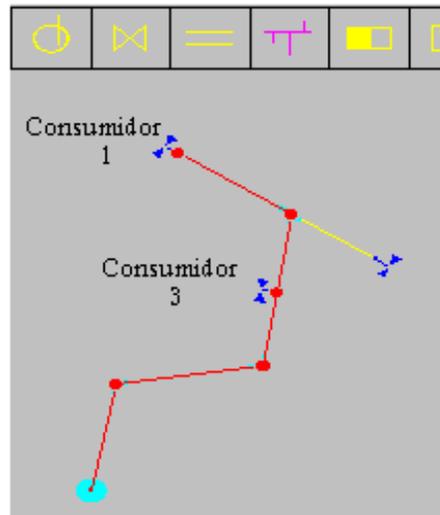
**Figura 4.74 - Mensagem Que Finaliza a Especificação de Um Caminho.**

A mensagem da Figura 4.74 pede ao usuário que confirme este caminho. Se o usuário optar por **não**, então o computador ignorará este procedimento. Se o usuário optar por **sim**, então o computador registrará este caminho e desenhará um círculo vermelho sobre o consumidor escolhido. O Computador vai desenhando um círculo vermelho sobre os consumidores que já possuem um caminho até a bomba, com o intuito de diferenciá-los dos que ainda não possuem este caminho.

Logo em seguida da mensagem da Figura 4.74, uma nova janela aparecerá na tela (ver Figura 4.75). Esta janela possibilita ao usuário escolher entre reaproveitar ou não um caminho já especificado para determinar um novo caminho de um outro consumidor.



**Figura 4.75 - Mensagem Que Permite ao Usuário Reaproveitar ou Não Um Caminho Já Existente Para Especificar Um Novo Caminho de Um Outro Consumidor.**



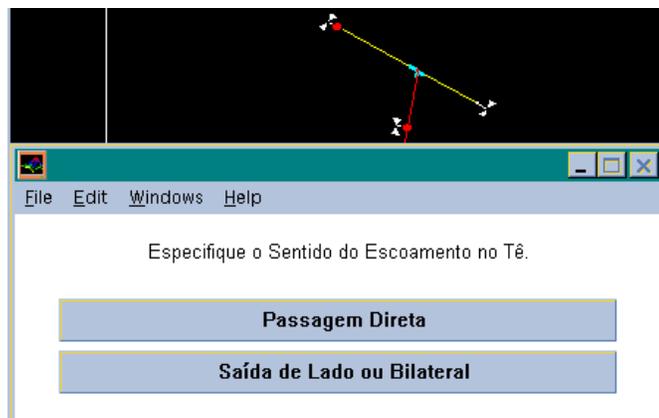
**Figura 4.76 - Reaproveitando Um Caminho.**

A Figura 4.76 exemplifica esta situação. Por exemplo, se o usuário desejar especificar o caminho do consumidor 1 até a bomba, ele poderá realizar isso de duas formas distintas:

- a) Especificar todo os elementos existentes entre os caminhos 1 e a bomba centrífuga;

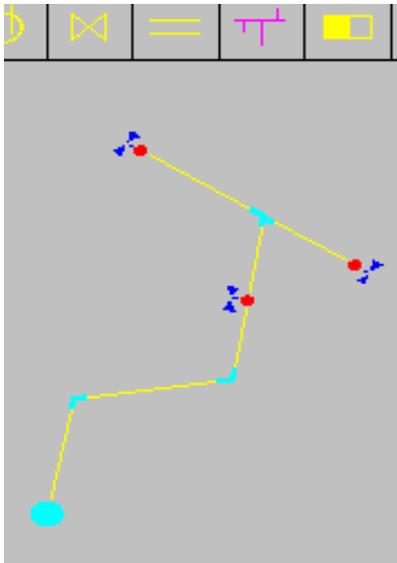
- b) Especificar somente os elementos existentes entre os consumidores 3 e 1, desde que, o usuário já tenha especificado o caminho do consumidor 3 e tenha optado por **sim** na janela da Figura 4.75.

Na especificação do caminho é importante saber que, ao especificar os elementos tê ou cruzeta, uma mensagem será exibida na tela (ver Figura 4.77). Esta mensagem pede ao usuário, se no caminho atual, o fluido passará direto pelo tê (ou pela cruzeta) ou se o fluido sofrerá um desvio de 90 graus. Esta mensagem deve ser preenchida corretamente, pois ela será muito importante para a determinação da perda de carga do sistema.



**Figura 4.77 - Menu de Opção ao Especificar Um Elemento Como Um Tê ou Uma Cruzeta Durante a Especificação dos Caminhos (Entre os Consumidores e a Bomba).**

Como foi dito anteriormente, os consumidores que já tiverem seu caminho especificado ficam marcados no vídeo com um círculo vermelho (ver Figura 4.78).

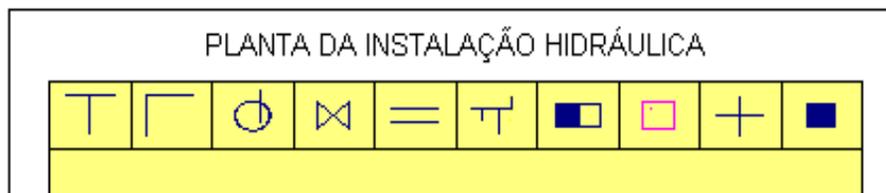


**Figura 4.78 - Os Consumidores Que Já Tiverem Seu Caminho Especificado Permanecem Marcados Com Um Círculo Vermelho.**

Quando todos os consumidores forem especificados o computador automaticamente encerrará esta tarefa.

#### **4.3.3.9) Ler ou Gravar Um Desenho.**

A ícone que permite *ler* ou *gravar* um desenho no editor gráfico do Matlab está representada na Figura 4.79 (ícone em lilás). Ao pressioná-la, a janela da Figura 4.80 aparecerá na tela do computador. A janela da Figura 4.80 pede ao usuário que escolha entre ler ou gravar um desenho. Desta forma, a seguir cada uma destas opções será tratada separadamente.



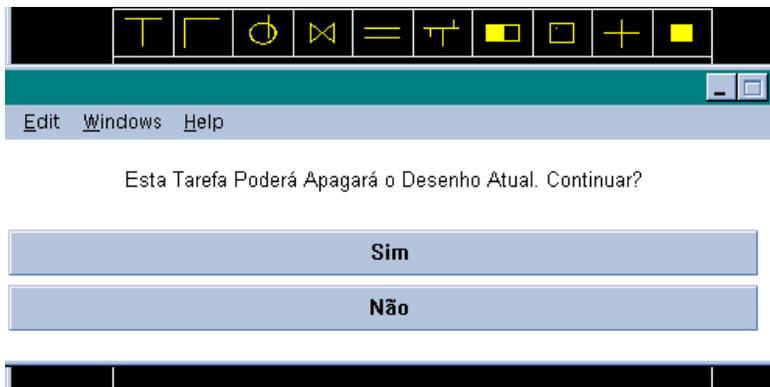
**Figura 4.79 - Ícone Que Possibilita Ler ou Gravar Um Desenho no Editor do Matlab V4.0.**



**Figura 4.80 - Menu Inicial Para Escolher Entre: *Gravar* ou *Ler* Um Desenho.**

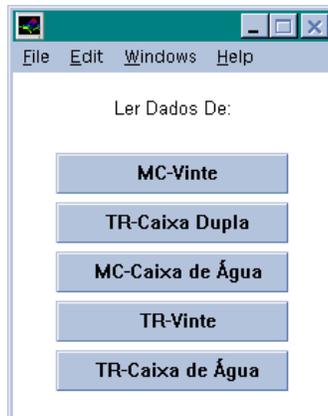
a) Lendo um Desenho

Optando-se por ler um desenho na janela da Figura 4.80, então uma nova mensagem será exibida na tela (ver Figura 4.81). Esta nova janela diz ao usuário, que, se ele for abrir um desenho novo, então tudo que estiver desenhado na tela será perdido, caso a tela atual não esteja gravada.



**Figura 4.81 - Mensagem Que é Exibida na Tela, Momentos Antes, do Usuário Tentar Abrir Um Desenho Novo.**

Desta forma, é sempre bom que o usuário grave o desenho atual antes de tentar abrir um novo. Desta forma, se o usuário confirmar a leitura de um arquivo gravado, então a janela da Figura 4.82 aparecerá no vídeo. Esta janela exibe os nomes dos arquivos dos desenhos gravados no computador. Observe que este editor permite que se leia no máximo cinco desenhos.

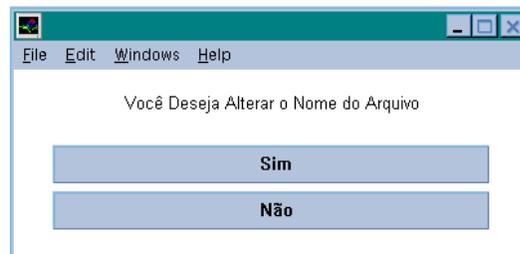


**Figura 4.82- Exemplos de Nomes de Desenhos Que Podem Ser Lidos Pelo Computador.**

Para visualizar o desenho do arquivo desejado, basta pressionar o botão esquerdo do mouse sobre o nome correto exibido na janela da Figura 4.82. O computador abrirá automaticamente este desenho.

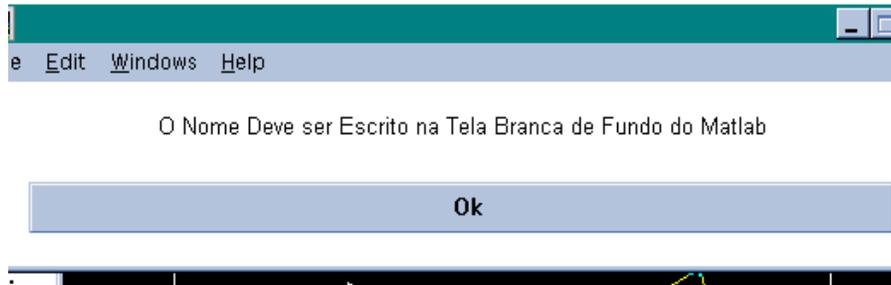
#### b) Gravando um Desenho

Por outro lado, se o usuário optar por gravar dados, então uma janela (parecida com a da Figura 4.82) aparecerá na tela. Para gravar um desenho, então bastará pressionar um dos cinco botões presentes nesta janela. Deve ser observado que, se um outro desenho estiver gravado sobre o botão selecionado, então o desenho antigo será substituído pelo atual. Deve ser observado que o editor permite gravar no máximo cinco desenhos ao mesmo tempo.



**Figura 4.83 - Janela Que Permite Alterar o Nome Do Arquivo Gravado.**

A Figura 4.83 pede ao usuário se ele deseja mudar ou não o nome do arquivo a ser gravado. Caso o usuário opte por sim, então a janela da Figura 4.84 solicitará que o mesmo faça a modificação na tela de fundo do Matlab (ver Figura 4.85).



**Figura 4.84 - Janela Que Solicita ao Usuário Que Faça a Alteração do Nome do Arquivo (a Ser Gravado) na Tela de Fundo do Matlab.**

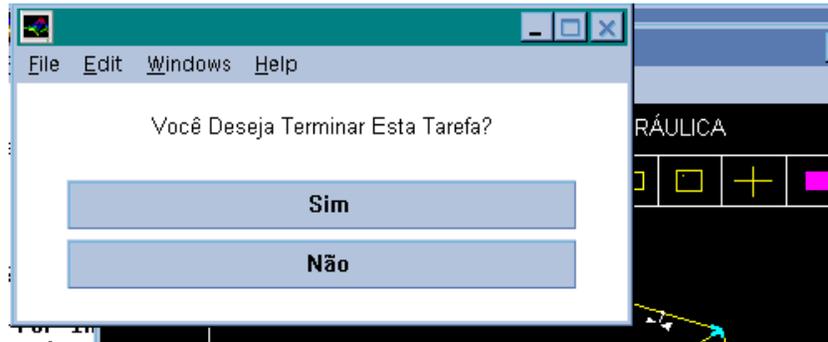


**Figura 4.85 - Tela de Fundo do Matlab Onde é Feita a Troca do Nome a Ser Gravado.**

É interessante que o usuário, toda vez que for gravar um arquivo, especifique no início do nome do arquivo as siglas: **MC** para Monte Carlo e **TR** para Transposição dos Resultados. Isto evitará confusões futuras na utilização deste aplicativo.

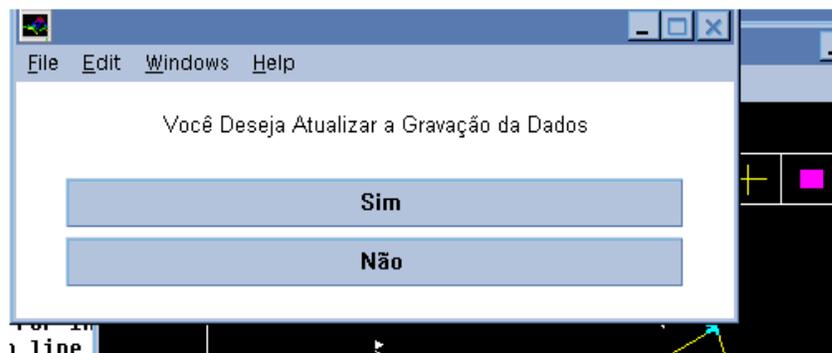
#### **4.3.3.10) Saindo do Editor Gráfico do Matlab**

Para finalizar este aplicativo basta pressionar com o botão esquerdo do mouse a ícone em lilás da Figura 4.86. Feito isto, então uma janela (semelhante aquela exibida na Figura 4.86) aparecerá no vídeo.



**Figura 4.86 - Janela de Finalização do Editor Gráfico.**

Esta janela pede ao usuário se ele deseja ou não confirmar a tarefa de finalização. Caso o usuário deseje continuar com esta tarefa, então uma última mensagem será exibida no editor (ver Figura 4.87).



**Figura 4.87 - Janela Que Solicita ao Usuário Atualizar ou Não o Desenho Atual Antes de Sair Definitivamente do Editor.**

A Figura 4.87 pede a confirmação do usuário com relação a atualização ou não do desenho atual. Caso o usuário opte por sim, então um procedimento semelhante aquele apresentado em **gravando um desenho** aparecerá na tela para o usuário manipular. Feito isto o editor será desativado.

#### 4.4) Limitações do Aplicativo

Este aplicativo possui algumas restrições que serão mencionadas a seguir. É importante considerar estas informações, durante a simulação do sistema, para que não se utilize de forma errada este aplicativo. Estas limitações são:

- a) Todos os tubos da instalação hidráulica são admitidos possuir seção transversal circular;
- b) Elementos Localizados do tipo válvula (gaveta, globo, retenção, ...) não foram considerados na elaboração deste simulador, e portanto, não podem ser considerados durante a simulação;
- c) Os elementos de união tê e cruzetas são considerados terem todos uma inclinação de 90 graus. Caso estes elementos, da instalação que se deseja simular, não tenham este ângulo de inclinação, então deverão ser aproximados para 90 graus.
- d) Os Cotovelos podem possuir inclinações de 90 ou 45 graus. Inclinações fora destes valores não podem ser utilizadas.
- e) Só é possível simular uma instalação hidráulica que possua uma única bomba. Duas ou mais bombas não é permitido pelo simulador.
- f) O simulador só aceita instalações hidráulicas do tipo *espinha de peixe*. Instalações do tipo anel não são permitidas.
- g) Por enquanto, este aplicativo só permite utilizar bombas centrífugas com campo de funcionamento semelhante à bomba empregada no bairro Vista Verde.

## Capítulo 5

### Apresentação dos Resultados das Simulações

#### 5.1) Introdução

Este capítulo abordará alguns testes realizados sobre o aplicativo EFEI/PROCEL V1.0 (desenvolvido pelo autor) e, posteriormente, a aplicação do mesmo sobre a instalação hidráulica de água potável do bairro Vista Verde (Itajubá/MG). Para maiores informações sobre esta instalação hidráulica veja o Capítulo 1 e o Apêndice B desta Dissertação. Neles estão contidos, respectivamente, a descrição física da instalação hidráulica e os valores experimentais das medições ali obtidos (inclusive também a planta hidráulica detalhada da instalação).

É importante observar que o bairro Vista Verde possui 78 consumidores (residências) e, por esta razão, demonstrou-se ser bastante difícil e complicada a leitura detalhada e repetitiva de todos estes hidrômetros durante um período longo do dia. Desta forma, optou-se pela aplicação do método de Monte Carlo a partir da Transposição dos Resultados. Assim sendo, foi realizada a leitura dos hidrômetros de 15 consumidores do bairro (durante um longo período do dia) e, a partir daí, obtida a matriz variância-covariância unitária para aplicação do método aos 78 consumidores da linha.

Os consumos mensais de água destes 78 consumidores foram obtidos nos computadores da COPASA e a planta hidráulica da instalação (para o posicionamento dos consumidores na linha) também obtida por intermédio dos engenheiros desta mesma empresa. Entretanto, antes da apresentação destes resultados foi realizado um teste (indireto) para testar o desvio gerado pela aplicação da Transposição dos Resultados ao invés do método direto de Monte Carlo. Isto será explicado detalhadamente na próxima seção.

## 5.2) Testes Iniciais do Aplicativo EFEI/PROCEL V1.0

Como dito na introdução deste Capítulo, a Transposição dos Resultados para aplicação do método de Monte Carlo foi preferida em relação a aplicação direta do mesmo. Desta forma, uma linha hidráulica fictícia foi elaborada com 20 consumidores para os testes iniciais de verificação da Transposição dos Resultados.

Os volumes acumulados destes 20 consumidores fictícios (criados aleatoriamente) podem ser visto na Figura 5.1.

| Leitura de Hidrômetros Fictícia Para Teste do Aplicativo |                            |      |      |       |       |       |       |       |
|--|----------------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Consumidor 1   | Horário                    | 8:00 | 9:00 | 10:00 | 11:00 | 12:00 | . . . | 17:00 |
|  | Leitura [ m <sup>3</sup> ] | 1.05 | 1.23 | 1.47  | 1.63  | 1.78  | . . . | 3.23  |
| Consumidor 2   | Horário                    | 8:05 | 9:05 | 10:05 | 11:05 | 12:05 | . . . | 17:05 |
|  | Leitura [ m <sup>3</sup> ] | 0.58 | 0.68 | 0.89  | 1.05  | 1.11  | . . . | 1.97  |
| Consumidor 3   | Horário                    | 8:02 | 9:02 | 10:04 | 11:03 | 12:06 | . . . | 17:08 |
|  | Leitura [ m <sup>3</sup> ] | 1.25 | 1.36 | 1.67  | 1.78  | 1.97  | . . . | 2.45  |
| Consumidor 4   | Horário                    | 8:09 | 9:10 | 10:09 | 11:08 | 12:05 | . . . | 17:14 |
|  | Leitura [ m <sup>3</sup> ] | 2.14 | 2.45 | 2.98  | 3.34  | 3.42  | . . . | 4.56  |
| .  | .                          | .    | .    | .     | .     | .     | . . . | .     |
| .  | .                          | .    | .    | .     | .     | .     | . . . | .     |
| .  | .                          | .    | .    | .     | .     | .     | . . . | .     |
| Consumidor 20  | Horário                    | 8:00 | 9:00 | 10:06 | 11:00 | 12:06 | . . . | 17:07 |
|  | Leitura [ m <sup>3</sup> ] | 4.78 | 5.67 | 6.09  | 6.45  | 6.57  | . . . | 8.16  |

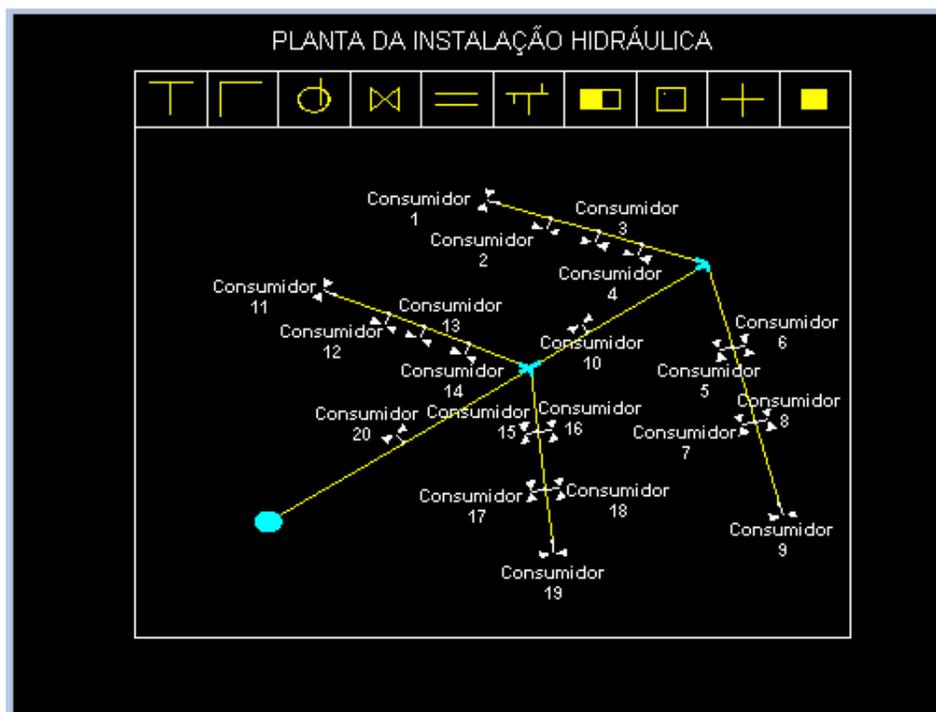
**Figura 5.1 - Volumes Acumulados Fictícios de 20 Consumidores Para a Realização do Teste de Verificação da Transposição dos Resultados Aplicada ao Método de Monte Carlo.**

Os volumes acumulados no tempo dos 20 consumidores, representados na Figura 5.1, foram elaborados aleatoriamente, mas de tal forma, que as vazões dos mesmos sejam iguais aquelas apresentadas na Tabela 5.1 O leitor deve observar que a soma das vazões médias da Tabela 5.1 resulta num valor que está em coerência com o diagrama colina da bomba centrífuga empregado na simulação (O diagrama Colina da bomba centrífuga do Bairro Vista Verde pode ser visto no Apêndice B).

**Tabela 5.1 - Vazões Médias Fictícias dos Consumidores da Figura 5.2.  
A Unidade de Medida é Dada em [Litros/Segundo].**

|                      |                      |                      |                      |                      |
|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| <b>Consumidor 1</b>  | <b>Consumidor 2</b>  | <b>Consumidor 3</b>  | <b>Consumidor 4</b>  | <b>Consumidor 5</b>  |
| <b>0.06807</b>       | <b>0.04339</b>       | <b>0.03716</b>       | <b>0.07383</b>       | <b>0.04199</b>       |
| <b>Consumidor 6</b>  | <b>Consumidor 7</b>  | <b>Consumidor 8</b>  | <b>Consumidor 9</b>  | <b>Consumidor 10</b> |
| <b>0.04447</b>       | <b>0.03376</b>       | <b>0.05666</b>       | <b>0.04167</b>       | <b>0.05385</b>       |
| <b>Consumidor 11</b> | <b>Consumidor 12</b> | <b>Consumidor 13</b> | <b>Consumidor 14</b> | <b>Consumidor 15</b> |
| <b>0.06927</b>       | <b>0.07723</b>       | <b>0.06601</b>       | <b>0.07049</b>       | <b>0.07076</b>       |
| <b>Consumidor 16</b> | <b>Consumidor 17</b> | <b>Consumidor 18</b> | <b>Consumidor 19</b> | <b>Consumidor 20</b> |
| <b>0.08384</b>       | <b>0.06354</b>       | <b>0.07118</b>       | <b>0.08918</b>       | <b>0.09750</b>       |

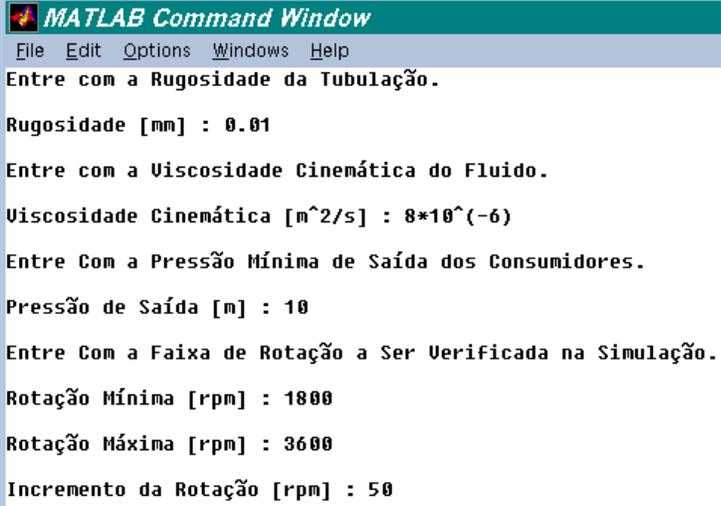
O esquema ilustrativo da instalação hidráulica está representado na Figura 5.2. Como pode ser observado, ali estão representados os posicionamentos dos 20 consumidores da rede hidráulica.



**Figura 5.2 - Esquema Ilustrativo da Instalação Hidráulica Fictícia  
Empregada no Teste da Transposição dos Resultados.**

Os diâmetros dos dutos presentes nesta instalação são os seguintes: para os tubos da linha principal foi adotado o valor de 75 [mm] e para os dutos secundários 50 [mm]. O comprimento dos tubos variam de 10 a 40 metros. A elevação dos consumidores da linha,

em relação ao nível da bomba, variam entre 15 e 60 metros. Os dados de entrada auxiliares (rugosidade da tubulação, viscosidade cinemática do fluido, etc. . .) podem ser vistos na Figura 5.3.

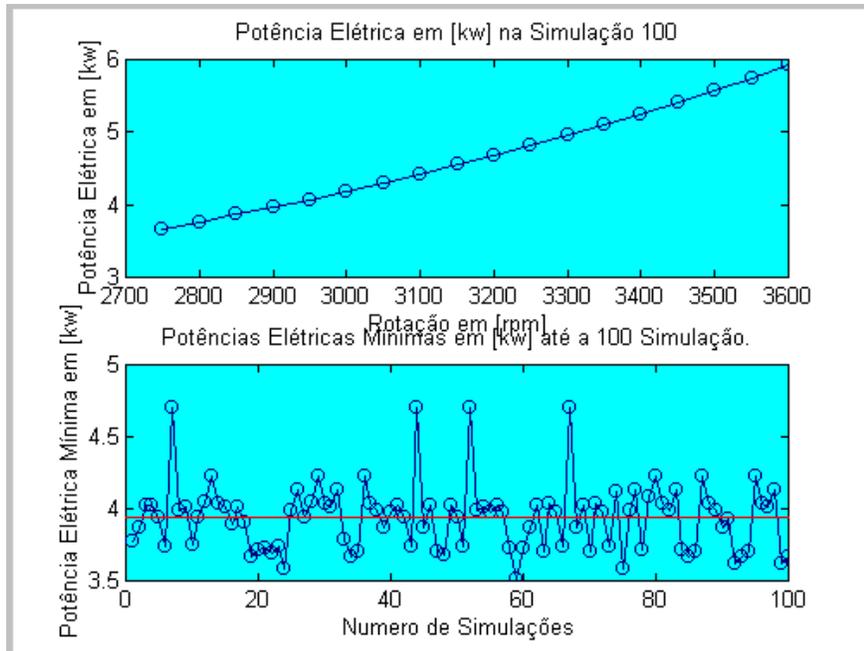


```
MATLAB Command Window
File Edit Options Windows Help
Entre com a Rugosidade da Tubulação.
Rugosidade [mm] : 0.01
Entre com a Viscosidade Cinemática do Fluido.
Viscosidade Cinemática [m^2/s] : 8*10^(-6)
Entre Com a Pressão Mínima de Saída dos Consumidores.
Pressão de Saída [m] : 10
Entre Com a Faixa de Rotação a Ser Verificada na Simulação.
Rotação Mínima [rpm] : 1800
Rotação Máxima [rpm] : 3600
Incremento da Rotação [rpm] : 50
```

**Figura 5.3 - Dados Auxiliares da Instalação Hidráulica Para a Realização da Simulação de Monte Carlo.**

Um resultado gráfico obtido na simulação através do método direto de Monte Carlo (sem a Transposição dos Resultados) a esta instalação fictícia pode ser visto na Figura 5.4. Neste gráfico, pode ser observado que as potências elétricas mínimas, para 50 estados diferentes de funcionamento desta rede, oscilam em torno do valor 3.9 [kw]. Isto demonstra uma primeira consistência do método, ou seja, não gerar valores absurdos para as potências elétricas nos vários estados de funcionamento da rede.

Por outro lado, a Tabela 5.2 apresenta os valores médios das potências elétricas mínimas para vários testes do aplicativo EFEI/PROCEL V1.0 para esta mesma instalação fictícia. Como pode ser observado, variou-se o número de simulações (entre 10 e 100) em cada teste realizado, e mesmo assim, os valores obtidos oscilaram em torno de 3.9 [kw].



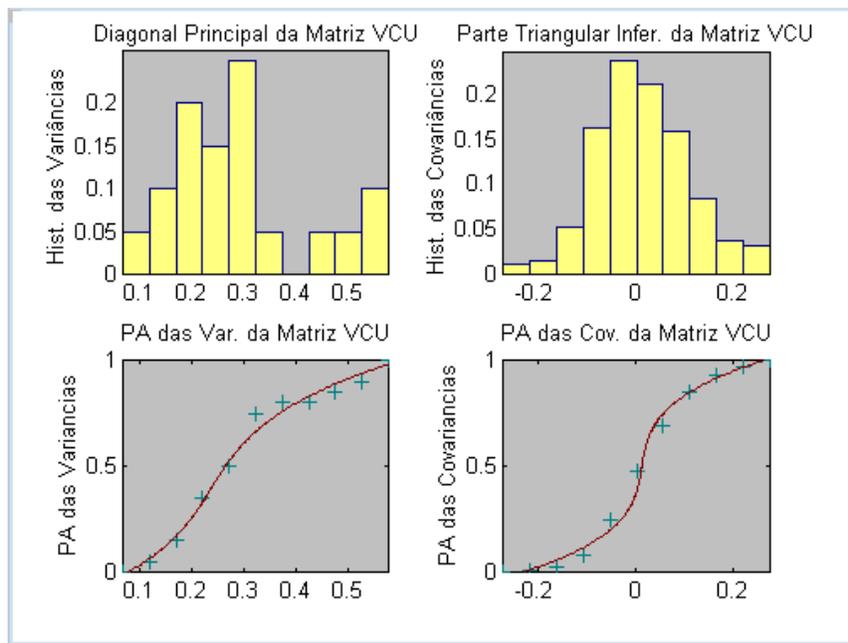
**Figura 5.4 - Resultado Gráfico Obtido Para a Instalação Fictícia da Figura 5.2 Através da Aplicação Direta do Método de Monte Carlo.**

**Tabela 5.2 - Tabela de Valores Obtidos Para Várias Simulações Distintas.**

| Número do Teste | Número de Simulações | Tempo de Processamento [minutos] | Média das Potências Mínimas [kw] | Tipo do Teste |
|-----------------|----------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------|
| 1               | 10                   | 1.27                             | 3.8917                           | Direto        |
| 2               | 10                   | 1.71                             | 3.9960                           | Direto        |
| 3               | 10                   | 1.36                             | 3.9609                           | Direto        |
| 4               | 20                   | 2.81                             | 3.9462                           | Direto        |
| 5               | 20                   | 2.73                             | 3.9419                           | Direto        |
| 6               | 20                   | 2.12                             | 3.8779                           | Direto        |
| 7               | 30                   | 3.91                             | 3.8906                           | Direto        |
| 8               | 30                   | 3.77                             | 3.8991                           | Direto        |
| 9               | 30                   | 4.85                             | 3.9744                           | Direto        |
| 10              | 50                   | 6.07                             | 3.8445                           | Direto        |
| 11              | 50                   | 8.15                             | 3.9381                           | Direto        |
| 12              | 50                   | 8.78                             | 3.9473                           | Direto        |
| 13              | 100                  | 13.26                            | 3.9405                           | Direto        |
| 14              | 100                  | 13.72                            | 3.9368                           | Direto        |
|                 |                      | Média [kw]                       | 3.9276                           |               |

É interessante observar, que esta tabela, apresenta também o tempo de processamento de cada um dos testes realizados. Desta forma, um número de simulações igual a 30 demonstrou ser satisfatório e, ao mesmo tempo, exigindo um tempo curto de processamento para esta instalação em particular.

Por outro lado, agora será realizada a Transposição dos Resultados, a esta mesma instalação fictícia, e os resultados obtidos aqui serão comparados com aqueles obtidos na Tabela 5.2. Caso os novos valores coincidam com os antigos pode-se dizer, em primeira instância, que existe um certo grau de confiança do método da Transposição (a nível de software) para a aplicação desejada neste trabalho. Desta forma, a Figura 5.5 apresenta os histogramas e as probabilidades acumuladas da matriz variância-covariância unitária obtida a partir dos valores dos volumes acumulados dos 20 consumidores fictícios representados da Figura 5.1.



**Figura 5.5 - Histogramas e Probabilidades Acumuladas da Matriz Variância-Covariância Unitária Gerada a Partir dos Volumes Acumulados dos 20 Consumidores Fictícios das Figuras 5.1 e 5.2.**

Desta forma, pode-se sortear uma nova matriz variância-covariância a partir das probabilidades acumuladas da Figura 5.5 e das vazões mensais dos consumidores da rede.

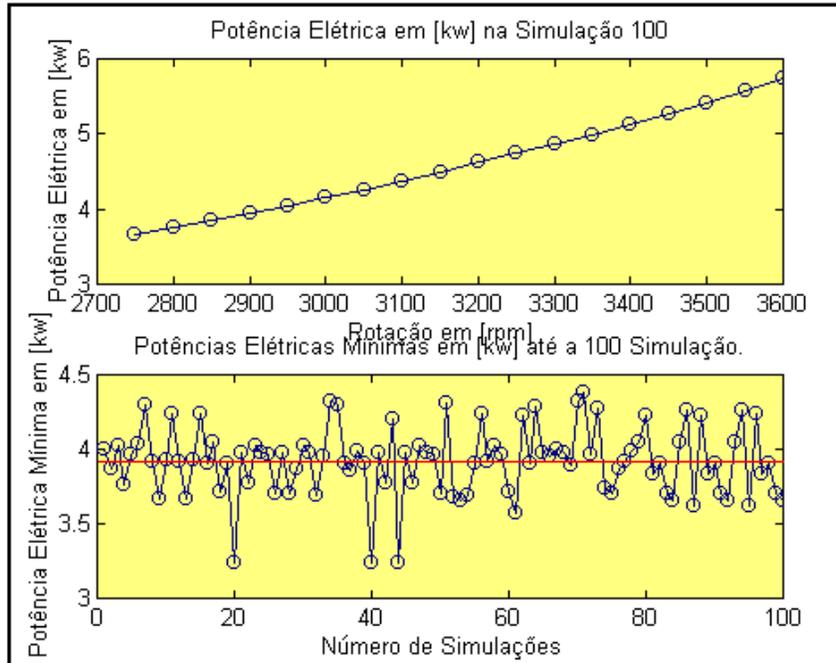
É importante observar que as vazões médias que foram adotadas na Transposição dos Resultados são as mesmas daquelas representadas na Tabela 5.1. Os valores auxiliares (rugosidade da tubulação, viscosidade cinemática do fluido, etc. ...), a configuração física e geométrica da rede e a elevação dos consumidores em relação a bomba centrífuga, que foram adotados na Transposição dos Resultados, são semelhantes aqueles empregados na aplicação direta do método.

Assim sendo, a única variante na aplicação da Transposição dos Resultados foi a matriz variância-covariância (gerada a partir de um sorteio). Todas as demais variáveis são idênticas aquelas empregadas no método direto de Monte Carlo. Por fim, a Figura 5.6 representa um teste do aplicativo EFEI/PROCEL V1.0 para um número de simulações igual a 100. Observe que este resultado já leva em consideração a Transposição dos Resultados. O valor médio das potências mínimas, obtidas nesta simulação, também está em torno de 3.9 [kw].

A Tabela 5.3 representa vários testes distintos do aplicativo na simulação desta instalação fictícia. Observando-se a Tabela 5.3 conclui-se que o número de simulações de cada teste variou entre 10 e 100. O valor médio das potências mínimas de cada teste oscilaram todos em torno 3.9 [kw]. Isto demonstra uma consistência bastante boa com relação a aplicação direta do método de Monte Carlo.

Desta forma, pode-se dizer que a aplicação da Transposição dos Resultados é uma boa alternativa para contornar o problema da aplicação direta do método de Monte Carlo, desde que, a amostra de dados para gerar a matriz variância-covariância unitária seja bastante rica em informações dos possíveis estados que o sistema possa assumir.

O único inconveniente da aplicação da Transposição é o ligeiro aumento no tempo de processamento da simulação. Observando este fator, nas Tabelas 5.2 e 5.1, pode-se observar que o aumento no tempo de processamento, de um caso para outro, pode aumentar em até 53% para esta situação em particular.



**Figura 5.6 - Resultados da Simulação de Monte Carlo Obtidos Através da Transposição dos Resultados.**

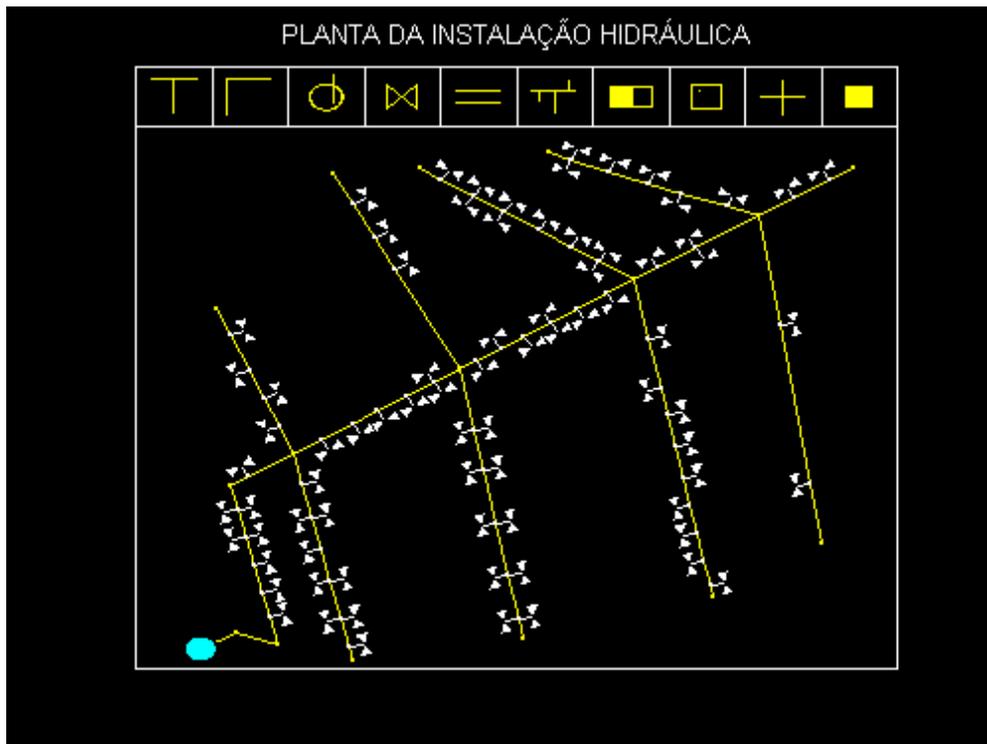
**Tabela 5.3 - Tabela de Valores Obtidos Para Várias Simulações Distintas Utilizando-se a Transposição dos Resultados.**

| Número do Teste | Número de Simulações | Tempo de Processamento [minutos] | Média das Potências Mínimas [kw] | Tipo do Teste |
|-----------------|----------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------|
| 1               | 10                   | 1.92                             | 3.8552                           | Transposição  |
| 2               | 10                   | 2.05                             | 3.7940                           | Transposição  |
| 3               | 10                   | 2.70                             | 3.9854                           | Transposição  |
| 4               | 20                   | 5.04                             | 3.9626                           | Transposição  |
| 5               | 20                   | 5.67                             | 3.9971                           | Transposição  |
| 6               | 20                   | 5.26                             | 3.9669                           | Transposição  |
| 7               | 30                   | 6.49                             | 3.8526                           | Transposição  |
| 8               | 30                   | 7.05                             | 3.8535                           | Transposição  |
| 9               | 30                   | 7.09                             | 3.8899                           | Transposição  |
| 10              | 50                   | 13.09                            | 3.9354                           | Transposição  |
| 11              | 50                   | 13.11                            | 3.9641                           | Transposição  |
| 12              | 50                   | 12.60                            | 3.9134                           | Transposição  |
| 13              | 100                  | 24.66                            | 3.9190                           | Transposição  |
| 14              | 100                  | 24.96                            | 3.9119                           | Transposição  |
| Média [kw]      |                      |                                  | 3.9144                           |               |

Finalmente, realizados estes primeiros testes do programa, então agora poder-se-á utilizar o aplicativo EFEI/PROCEL V1.0 na instalação hidráulica do bairro Vista Verde. A próxima seção tratará deste caso mais detalhadamente. Na seção 5.3 estará subentendido a aplicação da Transposição dos Resultados sobre o Método de Monte Carlo na simulação do bairro Vista Verde.

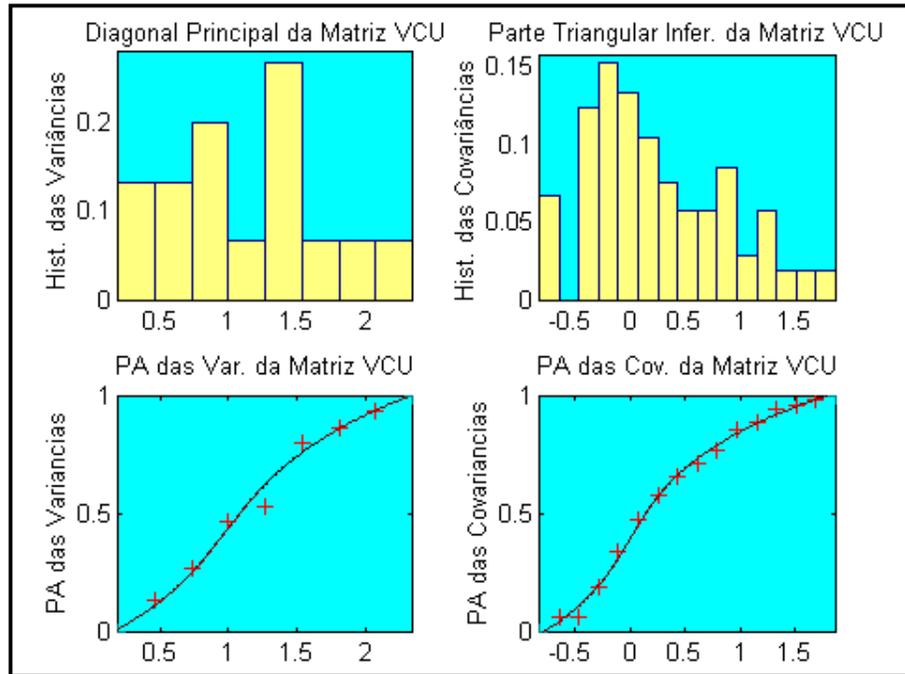
### 5.3) Utilização do Aplicativo EFEI/PROCEL V1.0 no Bairro Vista Verde.

A simulação computacional do bairro Vista Verde (veja esquema ilustrativo desta instalação hidráulica na Figura 5.7) será apresentada nesta seção. A matriz variância-covariância unitária, gerada a partir da leitura hidrométrica de 15 consumidores deste bairro, foi determinada previamente. Os histogramas desta matriz e as probabilidades acumuladas estão representados graficamente na Figura 5.8.



**Figura 5.7 - Esquema Ilustrativo da Instalação Hidráulica de Abastecimento de Água Potável do Bairro Vista Verde (Itajubá/MG).**

Os valores das leituras hidrométricas de 15 consumidores (realizadas das 8 às 18 horas), assim como, a planta hidráulica original deste bairro, o consumo mensal e a elevação de todos os consumidores da rede e o diagrama colina da bomba centrífuga utilizados nesta simulação podem ser vistos no Apêndice B desta Dissertação.



**Figura 5.8 - Histogramas e Probabilidades Acumuladas da Matriz Variância-Covariância Unitária Gerada a Partir da Leitura de Um Dia (dos Hidrômetros) de 15 Casas do Bairro Vista Verde.**

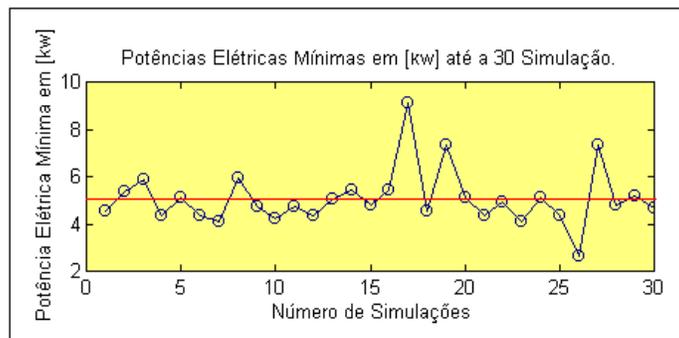
Os dados auxiliares, tais como, rugosidade da tubulação, viscosidade cinemática do fluido, pressão mínima de saída nos consumidores da rede, faixa de rotação da bomba centrífuga a ser verificada durante a simulação estão expressos na Figura 5.9. É importante observar que a COPASA (empresa responsável pelo abastecimento de água potável em Itajubá/MG) fornece apenas o volume de água mensal consumido pelas residências. Desta forma, o volume mensal deverá ser dividido pelo tempo de 30 dias para a obtenção da vazão mensal para cada um dos consumidores da rede.

```

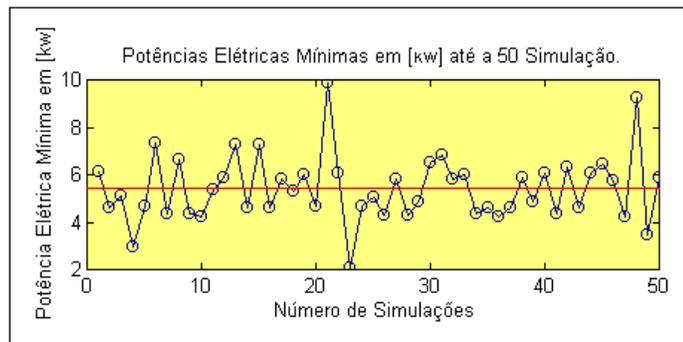
MATLAB Command Window
File Edit Options Windows Help
Entre com a Rugosidade da Tubulação.
Rugosidade [mm] : .1
Entre com a Viscosidade Cinemática do Fluido.
Viscosidade Cinemática [m^2/s] : 1.15*10^(-6)
Entre Com a Pressão Mínima de Saída dos Consumidores.
Pressão de Saída [m] : 10
Entre Com a Faixa de Rotação a Ser Verificada na Simulação.
Rotação Mínima [rpm] : 1800
Rotação Máxima [rpm] : 3600
Incremento da Rotação [rpm] : 50

```

**Figura 5.9 - Dados Auxiliares Para a Realização da Simulação da Rede Hidráulica do Bairro Vista Verde.**



**Figura 5.10 - Resultados da Simulação do Bairro Vista Verde (30 estados).**



**Figura 5.11 - Resultados da Simulação do Bairro Vista Verde (50 estados).**

As Figuras 5.10 e 5.11 apresentam os resultados gráficos obtidos para dois teste realizados sobre a instalação Vista Verde. O primeiro resultado, assumindo 30 estados distintos para a instalação hidráulica, e o segundo resultado, assumindo 50 estados, praticamente coincidiram com relação a média das potências elétricas mínimas de todos os estado. A Tabela 5.4 apresenta, resumidamente, o resultado obtido para 4 testes distintos sobre a mesma instalação hidráulica Vista Verde. Como pode ser observado todos os 4 valores médios das potências elétricas mínimas resultaram em torno de 5.35 [kw].

**Tabela 5.4 - Apresentação dos Resultados Para 4 Testes Distintos do Aplicativo EFEINPROCEL V1.0 Aplicado ao Bairro Vista Verde.**

| Número do Teste | Número de Simulações | Tempo de Processamento [horas] | Média das Potências Mínimas [kw] | Tipo do Teste       |
|-----------------|----------------------|--------------------------------|----------------------------------|---------------------|
| <b>1</b>        | <b>30</b>            | <b>2.65</b>                    | <b>5.0598</b>                    | <b>Transposição</b> |
| <b>2</b>        | <b>30</b>            | <b>2.37</b>                    | <b>5.4874</b>                    | <b>Transposição</b> |
| <b>3</b>        | <b>50</b>            | <b>3.98</b>                    | <b>5.4847</b>                    | <b>Transposição</b> |
| <b>4</b>        | <b>50</b>            | <b>3.76</b>                    | <b>5.4020</b>                    | <b>Transposição</b> |
|                 |                      | <b>Média [kw]</b>              | <b>5.3585</b>                    |                     |

Com relação aos resultados apresentados na Tabela 5.4 deve-se observar os seguintes comentários:

- 1) Um elevado tempo de processamento é exigido para instalações com um grande número de consumidores, neste caso, 78 consumidores. O tempo médio de processamento computacional de uma simulação, assumindo 50 estados distintos de funcionamento da instalação hidráulica, pode chegar a 4 horas.
- 2) O sorteio da matriz variância-covariância unitária demonstrou ser bastante lento. Desta forma, uma nova matriz será gerada só depois de ser utilizada em 10 estados distintos. Utilizar uma nova matriz unitária, para cada novo estado do sistema., tornará o aplicativo extremamente lento.
- 3) Como foi obtido uma potência mínima global (válida para todo o período do dia) o valor encontrado para esta potência elétrica poderá ser insuficiente para

os horários de pico. Desta forma, a simulação do sistema para cada um dos períodos do dia (manhã, tarde e noite) poderá ser implementada futuramente.

O valor encontrado pelo aplicativo para a potência elétrica mínima do sistema hidráulico, então poderá ser interpretado como sendo a energia elétrica gasta pelo conjunto moto-bomba na presença do inversor de frequência. É claro que, o valor médio encontrado na Tabela 5.4, só poderá ser confirmado a partir do momento que o inversor de frequência for realmente implantado na instalação hidráulica, e testes experimentais, forem realizados sobre o sistema para a confirmação do valor teórico obtido pelo computador.

Finalizando, pode-se dizer que o mais importante desta Dissertação de Mestrado, não são em si, os valores numéricos obtidos neste Capítulo, mas sim, as ferramentas computacionais desenvolvidas aqui ( Redes Neurais e método de Monte Carlo) para representação computacional de sistemas hidráulicos complexos como um todo. Isto sem dúvida alguma permitirá, em desenvolvimentos futuros, explorar várias outras aplicação práticas destas ferramentas computacionais.

Entre estas aplicações pode-se citar:

- a) Determinação computacional da perda de carga para uma instalação hidráulica complexa em função da sua geometria e da sua vazão;
- b) Determinação do diagrama colina de funcionamento de uma rede hidráulica levando-se em consideração tanto o conjunto moto-bomba como a configuração física e geométrica da instalação hidráulica em si;
- c) Aplicar estas ferramentas também para as turbinas hidráulicas e desenvolver sistemas de controle tanto para máquinas de fluxo geradoras como para máquinas de fluxo motoras;
- d) Enfim, representar computacionalmente o estado de funcionamento para uma ampla faixa de máquinas de fluxo existentes no mercado.

## Capítulo 6

### Conclusões

#### 6.1) Comentários Finais

O aplicativo desenvolvido nesta Dissertação de Mestrado foi elaborado com o intuito de criar um simulador genérico aplicável a uma gama bastante grande e distinta de instalações de bombeamento hidráulico. Desta forma, este simulador poderá ser utilizado não só para a instalação hidráulica do bairro Vista Verde, como também, para outras instalações hidráulicas graças as ferramentas matemáticas utilizadas em sua elaboração. Assim sendo, a generalização deste simulador foi obtida graças basicamente a três aspectos básicos:

- a) Utilização das Redes Neurais para as interpolações dos diagramas colina unitários, a partir do parâmetro adimensional **ns**, para a geração do diagrama da bomba desejado. É certo que esta técnica não foi desenvolvida completamente para as bombas centrífugas, simplesmente, pela falta dos referidos diagramas. Entretanto, foi possível desenvolver esta técnica para as turbinas Francis, provando portanto, a validade deste modelo computacional. Assim, a generalização do campo básico de funcionamento das máquinas de fluxo, em função única dos valores nominais da mesma, foi alcançado parcialmente.
- b) Desenvolvimento de um editor gráfico que permite reconhecer as características físicas e geométricas de uma instalação hidráulica, simplesmente a partir, do desenho da mesma, e daí, calcular a perda de carga de toda a instalação hidráulica construída no editor. Assim, a generalização física e geométrica da instalação hidráulica foi alcançada parcialmente. Deve ser observado que as tabelas de comprimentos equivalentes de elementos localizados (válvulas gaveta, válvulas globo, ...) ainda devem ser inseridos neste editor.

- c) Aplicação da Transposição dos Resultados para prever o comportamento dos consumidores da rede, e daí, evitar a leitura hidrométrica repetitiva e exaustiva dos consumidores da rede onde deseja-se simular o comportamento energético do sistema hidráulico. Assim, a utilização dos consumos médios mensais de água das residências será mais que suficiente para prever o consumo das residências.
- d) A metodologia elaborada aqui poderá, no futuro, ser extrapolada para outros tipos de instalações hidráulicas. Desta forma, tanto máquinas de fluxo geradoras como motoras poderão ser beneficiadas com as metodologias apresentadas aqui.
- e) Outros modelos matemáticos e computacionais poderão ser desenvolvidos, a partir do emprego das ferramentas, que já foram empregadas nesta Dissertação.

Por fim, espera-se ter desenvolvido, nesta Dissertação, um aplicativo computacional que venha a ser facilmente utilizado industrialmente no futuro, e com isso, consolidar todo trabalho aqui desenvolvido.

## 6.2) Propostas Para Trabalhos Futuros

O simulador desenvolvido nessa Dissertação de Mestrado ainda deve receber aprimorado em vários aspectos. Entre os principais e possíveis aperfeiçoamentos, encontram-se:

- a) Desenvolver uma rede neural que faça a interpolação do diagrama colina (em função do **ns** ou **nqa**) para as bombas centrífugas. É importante lembrar que nesta Dissertação essa técnica foi desenvolvida para as turbinas Francis e não para as bombas;
- b) Desenvolver uma rede neural que permita avaliar a cavitação, da máquina de fluxo considerada, em função do ponto de funcionamento desejado e do **nqa**;
- c) Desenvolver um outro método, mais eficiente, para interpolar as probabilidades acumuladas dos histogramas gerados a partir da matriz unitária. Neste trabalho foi utilizada a técnica dos mínimos quadrados (polinômio de grau 3).

## Referências Bibliográficas

Chen, S.; Billings, S. A. Neural networks for nonlinear dynamic system modelling and identification. *Int. J. Control*, v. 56, n. 2, p. 319-346, 1992.

Chiang, J.-H. A hybrid neural network model in handwritten word recognition. *Neural Networks*, v. 11, n.2, p. 337-346, March 1998.

Cotter, N. E. The Stone-Weierstrass and its application to neural networks. *IEEE Transactions on Neural Networks*. v. 1, n. 4, pp. 290-295, 1990.

Cybenko, G. Continuous valued networks with two hidden layers are sufficient. *Technical Report*, Department of Computer Science, Tufts University, 1988.

Gomide, F. A. C.; Gudwin, R. R. Modelagem, controle, sistemas e lógica fuzzy. *SBA Controle & Automação*, Vol. 4, nº 3, 1994.

Glasserman, P. *Monte Carlo methods in financial engineering: stochastic modeling and applied probability*, 53. 1 ed., New York: Springer, 2004.

Hagan, M. T.; Menhaj, M. B. Training feedforward networks with the Marquardt algorithm. *IEEE Transactions on Neural Networks*, v. 5, n. 6, p. 989-993, Nov. 1994.

Hammersley, J. M. *Monte Carlo methods*. Editora Methren, London, 1964.

Hanselman, D. *Matlab: versão do estudante*. Editora MAKRON Books, São Paulo, 1997.

Haykin, S. *Neural networks: a comprehensive foundation*. 2nd ed., New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1999.

Hornik, K.; Stinchcombe, M.; White, H. Multilayer feedforward networks are universal approximators. *Neural Networks*, v. 2, n. 5, p. 359-366, 1989.

Hunt, K. J.; Sbarbaro, D. Neural networks for nonlinear internal model control. *IEE Proceedings – D*, v. 138, n. 5, p. 431-438, Sep. 1991.

Hunt, K. J.; Sbarbaro, D.; Zbikowski, R.; Gawthrop, P. J. Neural networks for control systems – a survey. *Automatica*, v. 28, n. 6, p. 1083-1112, Nov. 1992.

Jang, J.-S. R., Sun, C.-T and Mizutani, E. *Neuro-fuzzy and soft computing: a computational approach to learning and machine intelligence*. Prentice-Hall, Inc., 1997.

Jarmulak, J.; Spronck, P.; Kerckhoffs, E. J. H. Neural networks in process control: model-based and reinforcement trained controllers. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 18, n. 1-2, p. 149-166, Aug. 1997.

Kim, S. K.; Kim, J. W.; Kim, H. J. On-line recognition of cursive Korean characters using neural networks. *Neurocomputing*, v. 10, n.3 , p. 291-305, April, 1996.

Kosko, B. *Neural networks and fuzzy systems: a dynamical systems approach to machine intelligence*. New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1992.

Kovács, L.; Solt, Z. *Redes neurais artificiais. fundamentos e aplicações*. 2. ed., São Paulo: Edição acadêmica, Collegium Cognitivo, 1996.

Kuncheva, L. I. Initializing of an RBF network by a genetic algorithm. *Neurocomputing*, v. 14, pp. 273-288, 1997.

Linkens, D. A., Learning systems in Intelligent Control: an Appraisal of fuzzy, neural and genetic algorithm control applications. *IEE Control System* , pp 367- 386, Setembro, 1996.

Loesch, C.; Sari, S. T. *Redes neurais artificiais fundamentos e modelos*. Blumenau: Editora da Furb, Brasil, 1996.

Macintyre, A. J. *Bombas e instalações de bombeamento*. Editora Guanabara Koogan, Segunda Edição, Rio de Janeiro, 1987.

Metropolis, N.; Ulam, S. The Monte Carlo method. *Journal of the American statistical association*, Taylor & Francis Broup, v. 44, n. 247, p. 335-341, 1949.

Minsky, M. L.; Papert, S. A. *Perceptron*. Cambridge, MA: The MIT Press, 1969.

Mitchell, M. *An Introduction to genetic algorithms*. First MIT Press paperback edition, 1998.

Narendra, K. S.; Parthasarathy, K. Identification and control of dynamical systems using neural networks. *IEEE Transactions on Neural Networks*, v. 1, n. 1 , p. 4-27, March 1990.

Narendra, K. S. Neural networks for control: theory and practice. *Proceedings of the IEEE*, v. 84, n.10, p. 1385-1406, Oct. 1996.

Nascimento, P. C. *Redes neurais para controle em tempo-real*. Dissertação de Mestrado, EFEI, Itajubá, 1995.

Nilsson, N. J. *Learning machines*. New York: McGraw-Hill, 1965.

Papoulis, A. *Probability, random variables, and stochastic processes*. New York: McGraw-Hill, 1965.

Rich, E. *Inteligência artificial*. Editora MAKRON Books, Segunda Edição, 1993.

Rios Neto, A. Dynamic systems numerical integrators in neural control schemes. *V Congresso Brasileiro de Redes Neurais*, Rio de Janeiro - RJ, pp. 85–88, 2001.

Russell, S. and Norvig, P. *Artificial intelligence*. 2nd ed., New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 2003.

Rumelhart, D. E.; Hilton, G. E.; Williams, R. J. Learning internal representations by error propagation. In: Rumelhart, D. E., McClelland, J. L.(ed). *Parallel data processing*. Cambridge, MA: M.I.T. Press, v. 1, cap. 8, 1986.

Silva Telles, P. C. *Tubulações industriais*. Livros Técnicos e Científicos Editora, Quinta Edição, São Paulo, 1979.

Silva Telles, P. C. *Tabelas e gráficos para projetos de tubulações*. Editora Inteligência LTDA. , Terceira Edição, Rio de Janeiro, 1985.

Shah, S.; Palmieri, F.; Datum, M. Optimal filtering algorithms for fast learning in feedforward neural networks. *Neural Networks*, v. 5, n. 5, p. 779-787, 1992.

Shreider, Y. A., *The Monte Carlo method*. Editora Pergamon Press, Oxford, 1967.

Shustorovich, A.; Thrasher, C. W. Neural network positioning and classification of handwritten characters. *Neural Networks*, v. 9, n. 4, p. 685-693, 1996.

Spooner, J. T., Maggiore, M., Ordóñez, R. and Passino, K. M. *Stable adaptive control and estimation for nonlinear systems neural and fuzzy approximator techniques*. New York: Wiley-Interscience, 2002.

Wang, Y. J. and Lin, C. T. Runge-Kutta neural network for identification of dynamical systems in high accuracy. *IEEE Transactions On Neural Networks*, v. 9, n. 2, p. 294-307, 1998.

Werbos, P. J. *Beyond regression: new tools for prediction and analysis in the behavior sciences*. Ph.D. Thesis, Harvard University, Committee on Applied Mathematics, 1974.

Werbos, P. J. Backpropagation through time: what it does and how to do it?. in *Proc. IEEE*, v. 78, n. 10, 1550-1560, 1990.

Zadeh, L. Fuzzy sets. *information and control*, vol. 8, pp. 338-353, 1965.

Zadeh, L. Fuzzy logic. *IEEE Computer*, pp. 83-92, April, 1988.

Zurada, J. M. *Introduction to artificial neural system*. St. Paul, MN, USA: West Pub. Co., 1992.

## Apêndice A

### Perda de Carga da Instalação

O cálculo da perda de carga na instalação hidráulica de bombeamento de água potável é uma parte bastante importante no modelo de simulação apresentado no Capítulo 2 desta Dissertação. Desta forma, a seguir é explicado, resumidamente, o método matemático utilizado na implementação computacional da perda de carga segundo Silva Telles (1979) e Macintyre (1987).

Todo escoamento em torno de uma tubulação está sujeito a uma perda de carga que é função das seguintes grandezas físicas:

- a) Diâmetro da tubulação (D);
- b) Velocidade (v) ou vazão (Q) do escoamento;
- c) Coeficiente de atrito (f);
- d) Número de Reynolds (Re);
- e) Rugosidade relativa ( $\epsilon/d$ ).

O número de Reynolds é um coeficiente adimensional definido por:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} = \frac{v \cdot D}{\nu} \quad (A.1)$$

Onde:

Re  $\equiv$  Número de Reynolds [-]

$\rho$   $\equiv$  Massa específica do fluido [ $\text{kg/m}^3$ ]

v  $\equiv$  Velocidade do fluido [m/s]

$\mu$   $\equiv$  Viscosidade absoluta [kg/m.s]

$\nu$   $\equiv$  Viscosidade cinemática [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]

D  $\equiv$  Diâmetro do tubo [m]

Entretanto, por questões de simplificação computacional, é conveniente expressar o número de Reynolds da equação (A.1) em função da vazão(Q) e não da velocidade (v). Isto pode ser obtido a partir da seguinte equação:

$$Q = v \cdot A \quad (A.2)$$

Onde

$Q \equiv$  Vazão do escoamento [ $m^3/s$ ]

$v \equiv$  Velocidade do escoamento [ $m/s$ ]

$A \equiv$  Área da seção transversal da tubulação [ $m^2$ ]

Como os tubos considerados aqui são todos de seção circular, tem-se:

$$A = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \quad (A.3)$$

Logo, substituindo (A.3) em (A.2) e explicitando  $v$ , resulta:

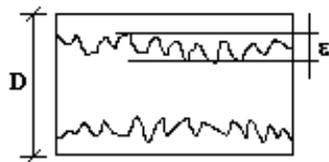
$$v = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{Q}{d^2} \quad (A.4)$$

Substituindo (A.4) em (A.1), vem:

$$Re = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{Q}{d \cdot \nu} \quad (A.5)$$

Por outro lado, a rugosidade relativa ( $\epsilon/d$ ) do escoamento é definida como sendo a relação da rugosidade absoluta ( $\epsilon$ ) da tubulação pelo diâmetro da mesma. Entende-se por *rugosidade absoluta* a altura média das saliências da rugosidade de uma superfície.

Como nos casos práticos, a rugosidade absoluta não é uniforme, ela é medida por um valor médio. A Figura (A.1) ilustra esta situação.



**Figura A.1 - A Rugosidade Relativa de Uma Tubulação é Expressa**

**Pela Relação  $\left(\frac{\epsilon}{d}\right)$ .**

Os valores médios da rugosidade absoluta são denominado rugosidades equivalentes ou efetivas ( $\epsilon$ ). A Tabela A.1 fornece alguns destes valores.

**Tabela A.1 - Valores da Rugosidade Equivalente ( $\epsilon$ )**

| <b>Material</b>                                  | <b>Rugosidade equivalente<br/>(mm)</b> |
|--|--|
| Acó, revestimento com asfalto quente             | 0.03 a 0.05                            |
| Aço, revestimento de esmalte centrífugo          | 0.01 a 0.06                            |
| Aço novo, sem pintura                            | 0.15 a 0.20                            |
| Aço enferrujado                                  | 0.4 a 0.6                              |
| Aço muito enferrujado                            | 0.9 a 2.4                              |
| Ferro galvanizado novo                           | 0.10 a 0.15                            |
| Ferro fundido com revestimento de asfalto        | 0.12 a 0.20                            |
| Ferro fundido com incrustações e tuberculizações | 1.5 a 3.0                              |
| Aço com pintura de vinil                         | 0.001 a 0.002                          |

Feito isto, então já é possível descrever brevemente o Método Moderno ou Racional para o cálculo da perda de carga em uma dada tubulação. Darcy e Weisbach chegaram a seguinte expressão válida para qualquer líquido ou fluido:

$$\Delta h = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (\text{A.6})$$

Onde

$\Delta h$   $\equiv$  Perda de carga [m] entre os pontos a e b de uma dada tubulação (ver Figura A.2)

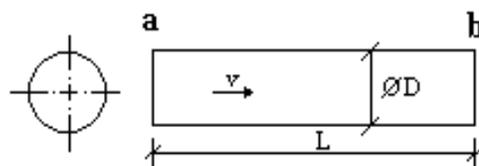
$v$   $\equiv$  Velocidade do escoamento [m/s]

$f$   $\equiv$  Coeficiente de atrito do fluido [-]

$L$   $\equiv$  Comprimento total da tubulação [m]

$D$   $\equiv$  Diâmetro da tubulação [m]

$g$   $\equiv$  Aceleração da gravidade local [m/s<sup>2</sup>]



**Figura A.2 - Representação Gráfica de Uma Tubulação de Seção Circular de Diâmetro (D) e Comprimento (L).**

Para fins computacionais é mais conveniente expressar (A.6) em função da vazão (Q) e não da velocidade (v) do fluido. Assim sendo, substituindo (A.4) em (A.6), tem-se:

$$\Delta H = 0.0826 \cdot f \cdot L \cdot \frac{Q^2}{D^5} \quad (\text{A.7})$$

A expressão (A.7) fornece a perda de carga em uma tubulação de seção transversal circular de comprimento L, diâmetro D e vazão Q. O único inconveniente desta equação é a determinação do fator de atrito (f). Este é um coeficiente adimensional que é função do número de Reynolds (Re) e da rugosidade relativa ( $\epsilon/d$ ).

Desta forma, para determinar o fator f, da fórmula de Darcy-Weisbach, existem várias maneiras: equações de Blasius, Karman-Prandtl, Nikuradse, Colebrook e outros. Entretanto, estes métodos em geral são formados por um conjunto de equações e não por uma única equação para a execução do referido cálculo. Assim sendo, fica difícil para o computador decidir por qual delas optar em cada caso.

Por esta razão, o método utilizado aqui foi o da interpolação do Diagrama de Moody (Ver apêndice B) por Redes Neurais. Com isto, foi possível obter uma única rede que o interpolasse completamente e portanto, facilitando a utilização do mesmo pelo computador. O diagrama de Moody (1944) é um gráfico em escala logarítmica com o número de Reynolds (Re) representado nas abcissas e na ordenada a rugosidade relativa ( $\epsilon/d$ ). Conhecidos estes valores é possível ler o fator de atrito da tubulação. Para que este diagrama possa ser utilizado corretamente ele foi dividido em três regiões distintas:

- a) Para  $Re < 2000$  o regime é considerado laminar e a equação de Poiseuille poderá ser utilizada nesta situação:

$$f = \frac{64}{Re} \quad (A.8)$$

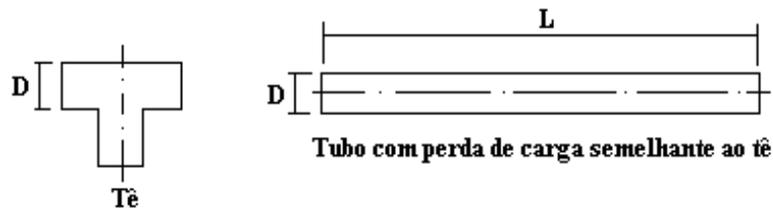
Observe que neste caso, o coeficiente de atrito independe da rugosidade relativa.

b) Para  $Re$  compreendido entre 2000 e 4000 o escoamento possuirá regime instável ou crítico de transição do laminar para o turbulento. Neste caso, em particular, o fator de atrito oscila em torno de uma curva que pode ser considerada independente da rugosidade relativa. Neste caso, pode-se aplicar também a equação (A.8).

c) Para  $Re > 4000$ , o regime será turbulento e então o coeficiente de atrito ( $f$ ) dependerá do número de Reynolds e da rugosidade relativa. Entretanto, quando a turbulência for completa (Reynolds muito elevado) então,  $f$  dependerá apenas da rugosidade relativa.

Desta forma, com o método apresentado anteriormente, o computador será capaz de determinar a perda de carga em uma tubulação sem maiores problemas. O único inconveniente a ser resolvido agora é com respeito as perdas localizadas (tês, cotovelos, cruzetas, ...). Deve ser observado, que estas perdas são muito importantes e devem também ser consideradas no cálculo global da perda de carga da instalação.

Para resolver este último problema será empregado o conceito de *comprimento equivalente* sobre um elemento físico da instalação. Por exemplo, um tê que possui uma perda de carga  $J$  possuirá um comprimento equivalente  $L$ , de tal forma que, se este fosse um tubo teria a mesma perda de carga  $J$  (ver Figura A.3).



**Figura A.3 - Conceito de Comprimento Equivalente Aplicado ao Tê.**

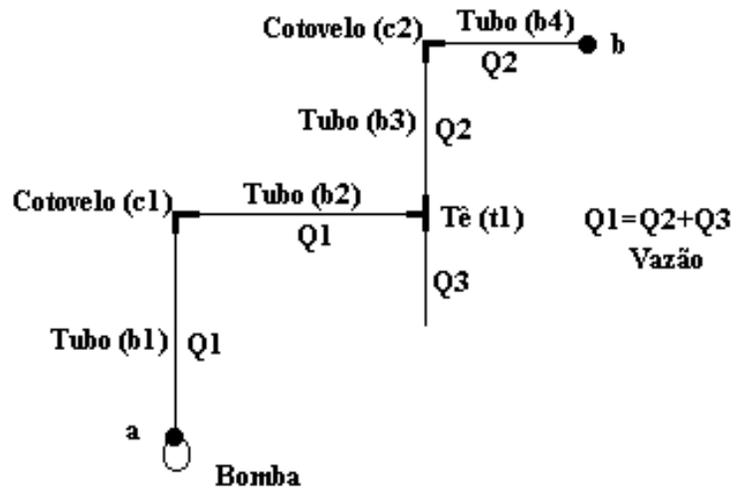
**Tabela A.2 - Comprimentos Equivalentes em Perdas Localizadas [m].**

| Diâmetro (mm) | Curva 90°<br>Raio Longo | Curva 90°<br>Raio Médio | Curva 90°<br>Raio curto | Curva 45° | Tê<br>passagem<br>direta | Tê<br>Asíd<br>a<br>de<br>1.0la<br>do1.<br>4 | Tê<br>Saída<br>Bilateral |
|---------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------|--------------------------|---|--------------------------|
| 13            | 0.3                     | 0.4                     | 0.5                     | 0.2       | 0.3                      | 1.0   | 1.0                      |
| 19            | 0.4                     | 0.6                     | 0.7                     | 0.3       | 0.4                      | 1.4   | 1.4                      |
| 25            | 0.5                     | 0.7                     | 0.8                     | 0.4       | 0.5                      | 1.7   | 1.7                      |
| 32            | 0.7                     | 0.9                     | 1.1                     | 0.5       | 0.7                      | 2.3   | 2.3                      |
| 38            | 0.9                     | 1.1                     | 1.3                     | 0.6       | 0.9                      | 2.8   | 2.8                      |
| 50            | 1.1                     | 1.4                     | 1.7                     | 0.8       | 1.1                      | 3.5   | 3.5                      |
| 63            | 1.3                     | 1.7                     | 2.0                     | 0.9       | 1.3                      | 4.3   | 4.3                      |
| 75            | 1.6                     | 2.1                     | 2.5                     | 1.2       | 1.6                      | 5.2   | 5.2                      |
| 100           | 2.1                     | 2.8                     | 3.4                     | 1.5       | 2.1                      | 6.7   | 6.7                      |
| 125           | 2.7                     | 3.7                     | 4.2                     | 1.9       | 2.7                      | 8.4   | 8.4                      |
| 150           | 3.4                     | 4.3                     | 4.9                     | 2.3       | 3.4                      | 10.0  | 10.0                     |
| 200           | 4.3                     | 5.5                     | 6.4                     | 3.0       | 4.3                      | 13.0  | 13.0                     |
| 250           | 5.5                     | 6.7                     | 7.9                     | 3.8       | 5.5                      | 16.0  | 16.0                     |
| 300           | 6.1                     | 7.9                     | 9.5                     | 4.6       | 6.1                      | 19.0  | 19.0                     |
| 350           | 7.3                     | 9.5                     | 10.5                    | 5.3       | 7.3                      | 22.0  | 22.0                     |

Desta forma, este conceito pode ser generalizado para os demais elementos físicos presentes em uma tubulação. A Tabela A.2 segundo Silva Telles (1985) apresenta alguns elementos com seus respectivos comprimentos equivalentes em função do diâmetro. Estes valores foram obtidos em laboratório e posteriormente tabelados. Finalizando, conhecendo-se o comprimento equivalente de um elemento localizado da tubulação, então este poderá ser tratado como um tubo, e portanto, a equação (A.7) poderá ser aplicado sobre ele também. Assim sendo, o cálculo da perda de carga poderá ser aplicado por toda a extensão da tubulação.

No caso da Figura A.4 pode-se observar que a perda de carga total entre os pontos **a** e **b** será a soma das perdas do tubo (b1) + cotovelo (c1) + tubo (b2) + tê (t1) + tubo (b3) + cotovelo (c2) + tubo (b4). Em cada um desses elementos aplica-se a equação (A.7) separadamente, tendo os seguintes cuidados: observar a vazão que passa pelo elemento considerado, o diâmetro do mesmo e o comprimento total. Caso o elemento seja

localizado (tê ou cotovelo), então o comprimento equivalente será obtido através da tabela (A.2).



**Figura A.4 - Exemplo de Cálculo de Perda de Carga em Uma Tubulação.**

## **Apêndice B**

# **( Tabelas e Gráficos )**

| Valores Lidos nos Hidrômetros em m <sup>3</sup> de 15 Residências do Bairro Vista Verde (5/09/1996). |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |  |  |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--|--|
| Horário  | 8:00   | 8:15   | 8:30   | 8:45   | 9:00   | 9:15   | 9:30   | 9:45   | 10:00  | 10:15  |  |  |
| <b>Casa 1</b>  | 0.6635 | 0.6856 | 0.7069 | 0.7273 | 0.7469 | 0.7657 | 0.7836 | 0.8008 | 0.8171 | 0.8325 |  |  |
| <b>Casa 2</b>  | 0.8138 | 0.8158 | 0.8177 | 0.8195 | 0.8212 | 0.8228 | 0.8244 | 0.8258 | 0.8271 | 0.8283 |  |  |
| <b>Casa 3</b>  | 0.5020 | 0.5020 | 0.5020 | 0.5020 | 0.5020 | 0.5020 | 0.5020 | 0.5020 | 0.5020 | 0.5020 |  |  |
| <b>Casa 4</b>  | 0.7941 | 0.7959 | 0.7975 | 0.7989 | 0.8002 | 0.8013 | 0.8022 | 0.8030 | 0.8036 | 0.8040 |  |  |
| <b>Casa 5</b>  | 0.3588 | 0.3996 | 0.4387 | 0.4759 | 0.5114 | 0.5450 | 0.5768 | 0.6068 | 0.6351 | 0.6615 |  |  |
| <b>Casa 6</b>  | 0.4965 | 0.4978 | 0.4990 | 0.5000 | 0.5010 | 0.5019 | 0.5028 | 0.5035 | 0.5041 | 0.5047 |  |  |
| <b>Casa 7</b>  | 0.7300 | 0.7309 | 0.7318 | 0.7325 | 0.7332 | 0.7338 | 0.7344 | 0.7349 | 0.7352 | 0.7355 |  |  |
| <b>Casa 8</b>  | 0.3139 | 0.3134 | 0.3130 | 0.3126 | 0.3123 | 0.3121 | 0.3119 | 0.3117 | 0.3116 | 0.3116 |  |  |
| <b>Casa 9</b>  | 0.8500 | 0.8500 | 0.8500 | 0.8500 | 0.8500 | 0.8500 | 0.8500 | 0.8500 | 0.8500 | 0.8500 |  |  |
| <b>Casa 10</b>   | 0.6823 | 0.6829 | 0.6836 | 0.6844 | 0.6853 | 0.6863 | 0.6874 | 0.6885 | 0.6898 | 0.6912 |  |  |
| <b>Casa 11</b>   | 0.9379 | 0.9390 | 0.9401 | 0.9410 | 0.9418 | 0.9426 | 0.9432 | 0.9436 | 0.9440 | 0.9443 |  |  |
| <b>Casa 12</b>   | 0.3461 | 0.3426 | 0.3394 | 0.3366 | 0.3343 | 0.3324 | 0.3308 | 0.3297 | 0.3290 | 0.3288 |  |  |
| <b>Casa 13</b>   | 0.7223 | 0.7355 | 0.7477 | 0.7588 | 0.7688 | 0.7778 | 0.7858 | 0.7927 | 0.7986 | 0.8034 |  |  |
| <b>Casa 14</b>   | 0.3001 | 0.3175 | 0.3337 | 0.3487 | 0.3623 | 0.3747 | 0.3858 | 0.3957 | 0.4042 | 0.4115 |  |  |
| <b>Casa 15</b>   | 0.1268 | 0.1343 | 0.1412 | 0.1476 | 0.1534 | 0.1588 | 0.1636 | 0.1678 | 0.1716 | 0.1748 |  |  |

Valores Lidos nos Hidrômetros em m<sup>3</sup> de 15 Residências do Bairro Vista Verde (5/09/1996).

| <b>Horário</b> | <b>10:30</b> | <b>10:45</b> | <b>11:00</b> | <b>11:15</b> | <b>11:30</b> | <b>11:45</b> | <b>12:00</b> | <b>12:15</b> | <b>12:30</b> | <b>12:45</b> |
|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| <b>Casa 1</b>  | 0.8472       | 0.8610       | 0.8740       | 0.8863       | 0.8987       | 0.9125       | 0.9259       | 0.9388       | 0.9517       | 0.9641       |
| <b>Casa 2</b>  | 0.8295       | 0.8305       | 0.8314       | 0.8323       | 0.8329       | 0.8330       | 0.8330       | 0.8330       | 0.8330       | 0.8332       |
| <b>Casa 3</b>  | 0.5020       | 0.5020       | 0.5020       | 0.5022       | 0.5028       | 0.5029       | 0.5030       | 0.5030       | 0.5030       | 0.5031       |
| <b>Casa 4</b>  | 0.8041       | 0.8042       | 0.8042       | 0.8043       | 0.8044       | 0.8045       | 0.8051       | 0.8050       | 0.8051       | 0.8052       |
| <b>Casa 5</b>  | 0.6861       | 0.7088       | 0.7298       | 0.7490       | 0.7649       | 0.7708       | 0.7766       | 0.7865       | 0.7853       | 0.7848       |
| <b>Casa 6</b>  | 0.5051       | 0.5055       | 0.5058       | 0.5059       | 0.5060       | 0.5060       | 0.5063       | 0.5066       | 0.5066       | 0.5067       |
| <b>Casa 7</b>  | 0.7358       | 0.7359       | 0.7360       | 0.7360       | 0.7360       | 0.7361       | 0.7367       | 0.7369       | 0.7415       | 0.7459       |
| <b>Casa 8</b>  | 0.3116       | 0.3117       | 0.3118       | 0.3119       | 0.3121       | 0.3119       | 0.3124       | 0.3143       | 0.3138       | 0.3132       |
| <b>Casa 9</b>  | 0.8500       | 0.8500       | 0.8500       | 0.8500       | 0.8500       | 0.8500       | 0.8500       | 0.8500       | 0.8500       | 0.8501       |
| <b>Casa 10</b> | 0.6927       | 0.6943       | 0.6960       | 0.6977       | 0.6996       | 0.7013       | 0.7020       | 0.7021       | 0.7033       | 0.7044       |
| <b>Casa 11</b> | 0.9444       | 0.9444       | 0.9444       | 0.9443       | 0.9444       | 0.9445       | 0.9451       | 0.9450       | 0.9450       | 0.9451       |
| <b>Casa 12</b> | 0.3289       | 0.3294       | 0.3304       | 0.3318       | 0.3335       | 0.3350       | 0.3350       | 0.3351       | 0.3362       | 0.3373       |
| <b>Casa 13</b> | 0.8072       | 0.8100       | 0.8117       | 0.8123       | 0.8119       | 0.8118       | 0.8150       | 0.8160       | 0.8190       | 0.8222       |
| <b>Casa 14</b> | 0.4176       | 0.4223       | 0.4258       | 0.4281       | 0.4290       | 0.4297       | 0.4342       | 0.4405       | 0.4420       | 0.4420       |
| <b>Casa 15</b> | 0.1775       | 0.1796       | 0.1813       | 0.1824       | 0.1829       | 0.1830       | 0.1830       | 0.1830       | 0.1829       | 0.1847       |

Valores Lidos nos Hidrômetros em m<sup>3</sup> de 15 Residências do Bairro Vista Verde (5/09/1996).

| <b>Horário</b> | <b>13:00</b> | <b>13:15</b> | <b>13:30</b> | <b>13:45</b> | <b>14:00</b> | <b>14:15</b> | <b>14:30</b> | <b>14:45</b> | <b>15:00</b> | <b>15:15</b> |
|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| <b>Casa 1</b>  | 0.9760       | 0.9874       | 0.9983       | 10.088       | 10.187       | 10.282       | 10.373       | 10.460       | 10.542       | 10.621       |
| <b>Casa 2</b>  | 0.8335       | 0.8338       | 0.8343       | 0.8348       | 0.8354       | 0.8359       | 0.8365       | 0.8371       | 0.8377       | 0.8383       |
| <b>Casa 3</b>  | 0.5032       | 0.5034       | 0.5036       | 0.5038       | 0.5041       | 0.5044       | 0.5047       | 0.5050       | 0.5053       | 0.5056       |
| <b>Casa 4</b>  | 0.8054       | 0.8056       | 0.8058       | 0.8060       | 0.8063       | 0.8066       | 0.8069       | 0.8071       | 0.8074       | 0.8077       |
| <b>Casa 5</b>  | 0.7858       | 0.7882       | 0.7920       | 0.7969       | 0.8029       | 0.8099       | 0.8178       | 0.8264       | 0.8356       | 0.8454       |
| <b>Casa 6</b>  | 0.5066       | 0.5065       | 0.5066       | 0.5067       | 0.5068       | 0.5071       | 0.5073       | 0.5076       | 0.5079       | 0.5082       |
| <b>Casa 7</b>  | 0.7496       | 0.7527       | 0.7552       | 0.7573       | 0.7589       | 0.7601       | 0.7609       | 0.7614       | 0.7616       | 0.7616       |
| <b>Casa 8</b>  | 0.3127       | 0.3124       | 0.3121       | 0.3120       | 0.3119       | 0.3119       | 0.3120       | 0.3121       | 0.3122       | 0.3124       |
| <b>Casa 9</b>  | 0.8503       | 0.8506       | 0.8509       | 0.8513       | 0.8518       | 0.8522       | 0.8528       | 0.8533       | 0.8538       | 0.8543       |
| <b>Casa 10</b> | 0.7054       | 0.7062       | 0.7069       | 0.7075       | 0.7079       | 0.7084       | 0.7087       | 0.7090       | 0.7093       | 0.7096       |
| <b>Casa 11</b> | 0.9452       | 0.9453       | 0.9453       | 0.9454       | 0.9455       | 0.9456       | 0.9456       | 0.9457       | 0.9457       | 0.9458       |
| <b>Casa 12</b> | 0.3382       | 0.3389       | 0.3395       | 0.3400       | 0.3403       | 0.3405       | 0.3406       | 0.3406       | 0.3405       | 0.3404       |
| <b>Casa 13</b> | 0.8247       | 0.8267       | 0.8281       | 0.8289       | 0.8294       | 0.8295       | 0.8292       | 0.8287       | 0.8280       | 0.8272       |
| <b>Casa 14</b> | 0.4421       | 0.4423       | 0.4426       | 0.4430       | 0.4436       | 0.4442       | 0.4449       | 0.4457       | 0.4465       | 0.4475       |
| <b>Casa 15</b> | 0.1891       | 0.1958       | 0.2045       | 0.2150       | 0.2269       | 0.2399       | 0.2538       | 0.2683       | 0.2830       | 0.2977       |

Valores Lidos nos Hidrômetros em m<sup>3</sup> de 15 Residências do Bairro Vista Verde (5/09/1996).

| <b>Horário</b> | <b>15:30</b> | <b>15:45</b> | <b>16:00</b> | <b>16:15</b> | <b>16:30</b> | <b>16:45</b> | <b>17:00</b> | <b>17:15</b> | <b>17:30</b> | <b>17:45</b> | <b>18:00</b> |
|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| <b>Casa 1</b>  | 10.695       | 10.766       | 10.834       | 10.897       | 10.958       | 11.015       | 11.069       | 11.120       | 11.165       | 11.203       | 11.249       |
| <b>Casa 2</b>  | 0.8388       | 0.8393       | 0.8397       | 0.8399       | 0.8401       | 0.8402       | 0.8401       | 0.8399       | 0.8401       | 0.8410       | 0.8412       |
| <b>Casa 3</b>  | 0.5058       | 0.5061       | 0.5064       | 0.5066       | 0.5067       | 0.5069       | 0.5070       | 0.5070       | 0.5070       | 0.5070       | 0.5070       |
| <b>Casa 4</b>  | 0.8080       | 0.8082       | 0.8084       | 0.8086       | 0.8088       | 0.8089       | 0.8090       | 0.8090       | 0.8090       | 0.8090       | 0.8090       |
| <b>Casa 5</b>  | 0.8556       | 0.8662       | 0.8769       | 0.8877       | 0.8986       | 0.9092       | 0.9197       | 0.9298       | 0.9383       | 0.9417       | 0.9426       |
| <b>Casa 6</b>  | 0.5085       | 0.5089       | 0.5091       | 0.5094       | 0.5096       | 0.5098       | 0.5099       | 0.5100       | 0.5100       | 0.5100       | 0.5100       |
| <b>Casa 7</b>  | 0.7615       | 0.7612       | 0.7608       | 0.7603       | 0.7599       | 0.7595       | 0.7592       | 0.7590       | 0.7590       | 0.7590       | 0.7590       |
| <b>Casa 8</b>  | 0.3127       | 0.3129       | 0.3131       | 0.3134       | 0.3136       | 0.3137       | 0.3139       | 0.3140       | 0.3140       | 0.3139       | 0.3143       |
| <b>Casa 9</b>  | 0.8548       | 0.8553       | 0.8557       | 0.8561       | 0.8565       | 0.8567       | 0.8569       | 0.8570       | 0.8570       | 0.8570       | 0.8570       |
| <b>Casa 10</b> | 0.7098       | 0.7102       | 0.7105       | 0.7110       | 0.7115       | 0.7121       | 0.7128       | 0.7137       | 0.7147       | 0.7151       | 0.7150       |
| <b>Casa 11</b> | 0.9458       | 0.9459       | 0.9459       | 0.9459       | 0.9460       | 0.9460       | 0.9460       | 0.9460       | 0.9460       | 0.9460       | 0.9460       |
| <b>Casa 12</b> | 0.3402       | 0.3400       | 0.3398       | 0.3396       | 0.3394       | 0.3392       | 0.3391       | 0.3390       | 0.3390       | 0.3390       | 0.3390       |
| <b>Casa 13</b> | 0.8262       | 0.8252       | 0.8243       | 0.8234       | 0.8227       | 0.8221       | 0.8218       | 0.8219       | 0.8223       | 0.8236       | 0.8382       |
| <b>Casa 14</b> | 0.4486       | 0.4497       | 0.4509       | 0.4522       | 0.4536       | 0.4550       | 0.4566       | 0.4582       | 0.4598       | 0.4615       | 0.4631       |
| <b>Casa 15</b> | 0.3120       | 0.3258       | 0.3386       | 0.3503       | 0.3604       | 0.3687       | 0.3750       | 0.3789       | 0.3801       | 0.3814       | 0.3890       |

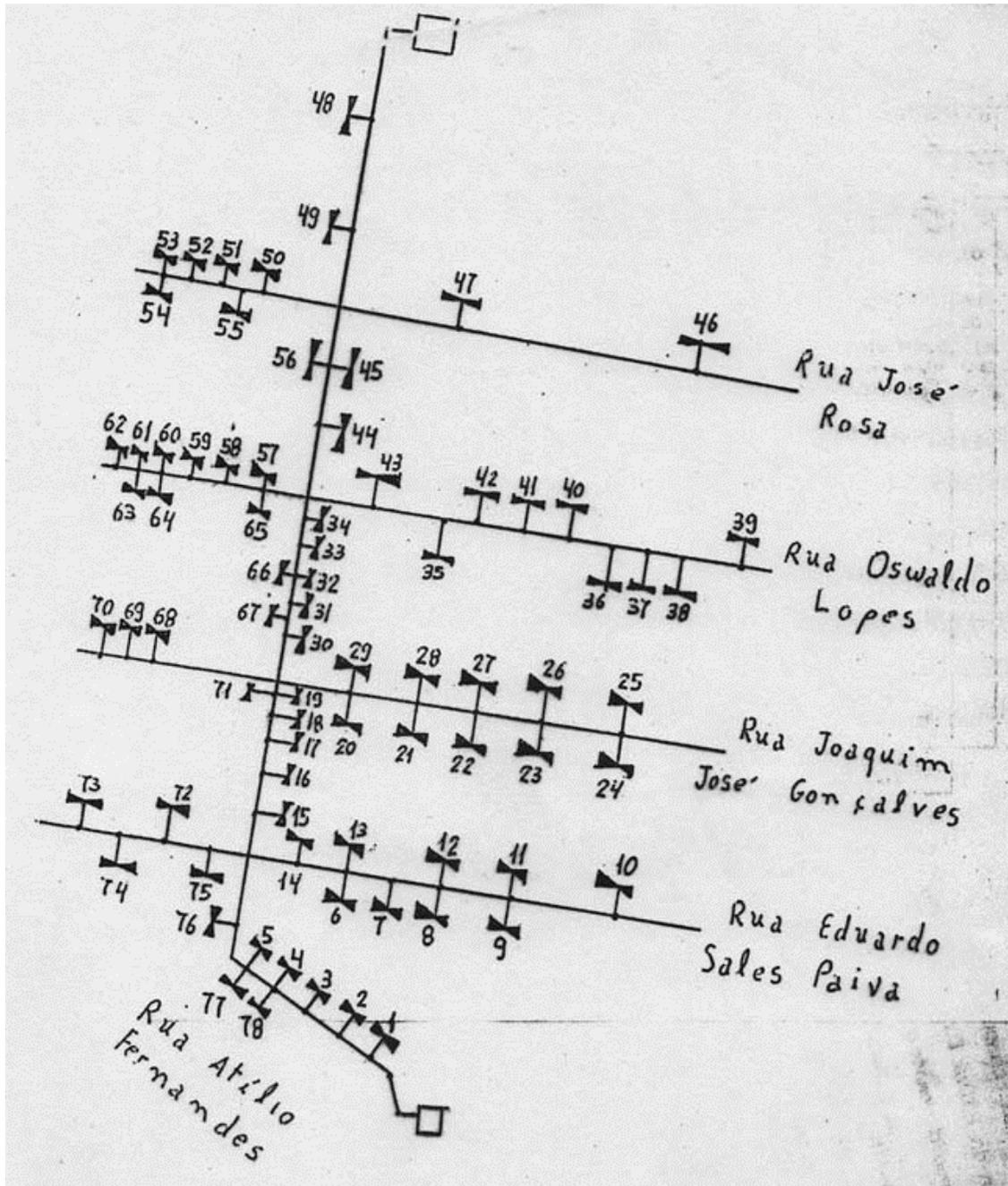
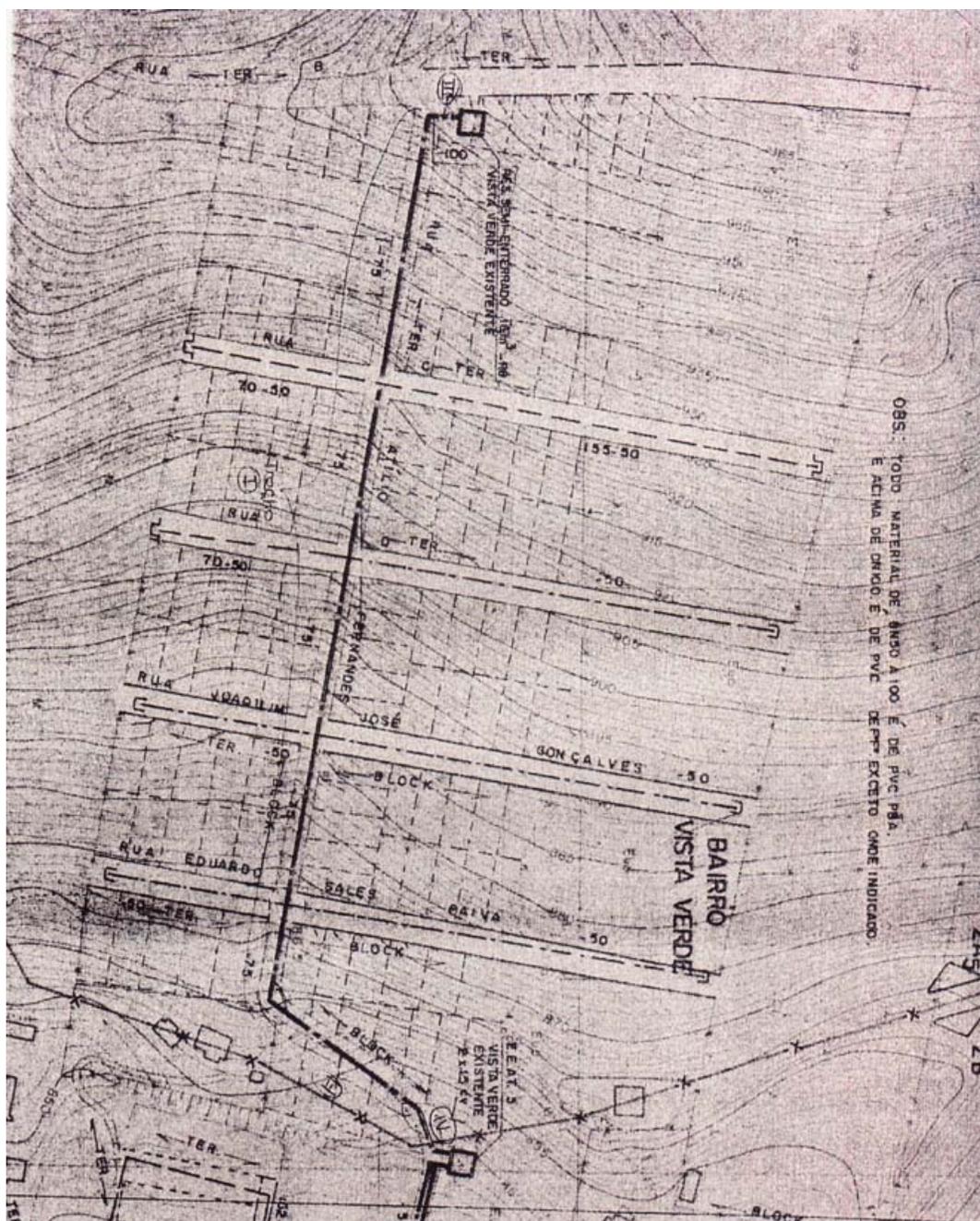


Figura B.1 - Esboço das Ruas do Sistema de Abastecimento de Água Potável do Bairro Vista Verde (Itajubá/MG).



**Figura B.2 - Planta Hidráulica do Sistema de Abastecimento de Água Potável do Bairro Vista Verde (Itajubá/MG).**

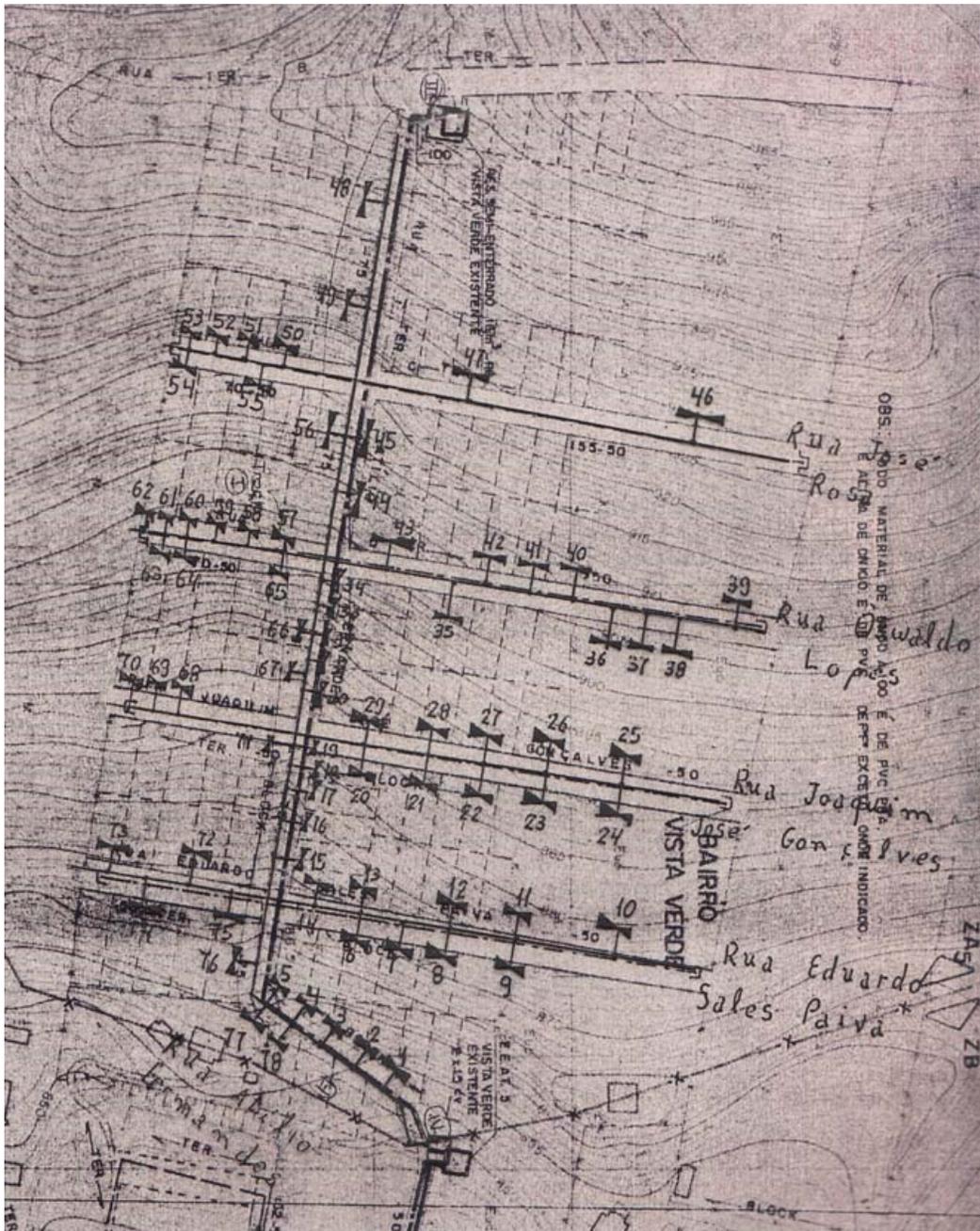
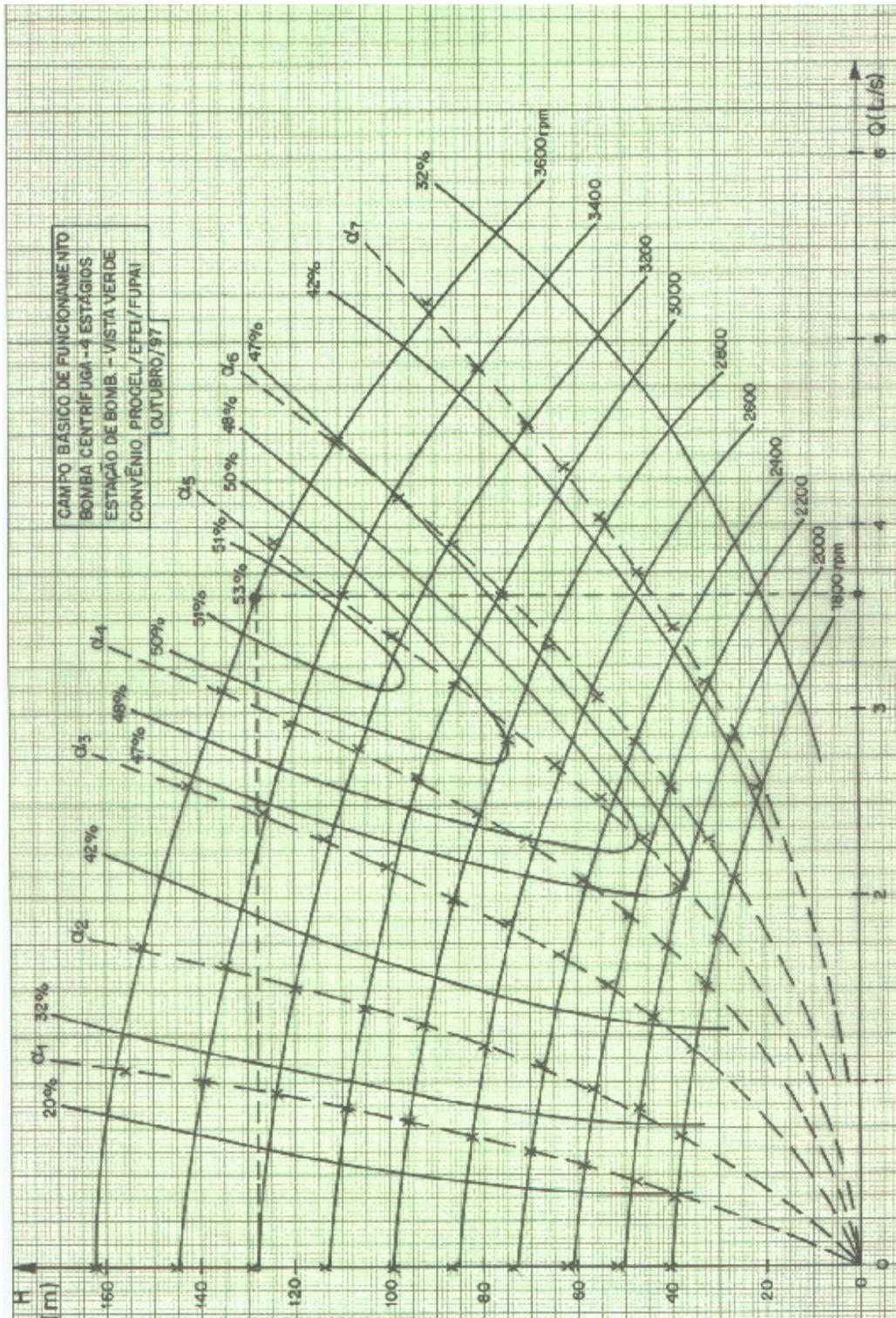


Figura B.3 - Esboço das Ruas e Planta Hidráulica do Sistema de Abastecimento de Água Potável do Bairro Vista Verde (Itajubá/MG).

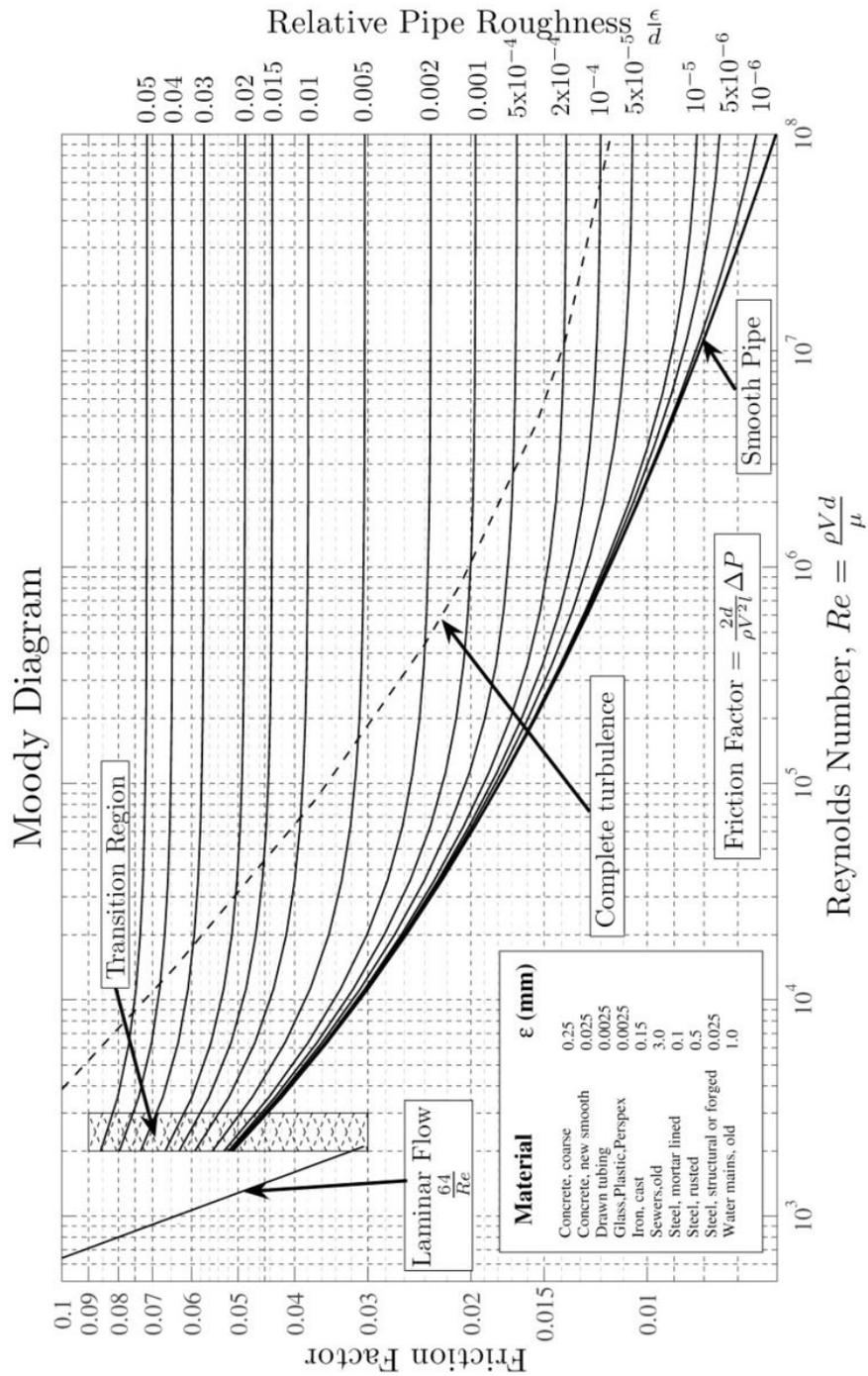
**Tabela B.2 - Numeração dos Consumidores (Residências) Representados na Figura B.3 e Seus Respectivos Valores de Vazão Mensal e Elevação em Relação a Bomba Centrífuga.**

| Número do Consumidor | Consumo Médio Mensal [m <sup>3</sup> ] (Fevereiro/Março de 98) | Vazão Mensal em [m <sup>3</sup> /s].10 <sup>-4</sup> Horas úteis/dia=8 | Elevação dos Consumidores [m] |
|----------------------|--|--|-------------------------------|
| 1                    | 22   | 0.254  | 3                             |
| 2                    | 10   | 0.115  | 3.5                           |
| 3                    | 21   | 0.243  | 6                             |
| 4                    | 15   | 0.173  | 7                             |
| 5                    | 16   | 0.185  | 9                             |
| 6                    | 24   | 0.277  | 25                            |
| 7                    | 33   | 0.381  | 25                            |
| 8                    | 10   | 0.115  | 25                            |
| 9                    | 11   | 0.127  | 25                            |
| 10                   | 18   | 0.208  | 25                            |
| 11                   | 14   | 0.162  | 25                            |
| 12                   | 15   | 0.173  | 25                            |
| 13                   | 19   | 0.219  | 25                            |
| 14                   | 10   | 0.115  | 25                            |
| 15                   | 20   | 0.231  | 20                            |
| 16                   | 17   | 0.196  | 22                            |
| 17                   | 31   | 0.358  | 24                            |
| 18                   | 15   | 0.173  | 26.5                          |
| 19                   | 19   | 0.219  | 28                            |
| 20                   | 34   | 0.393  | 40                            |
| 21                   | 22   | 0.254  | 40                            |
| 22                   | 10   | 0.115  | 40                            |
| 23                   | 37   | 0.428  | 40                            |
| 24                   | 10   | 0.115  | 40                            |
| 25                   | 10   | 0.115  | 40                            |
| 26                   | 43   | 0.497  | 40                            |
| 27                   | 17   | 0.196  | 40                            |
| 28                   | 20   | 0.231  | 40                            |
| 29                   | 48   | 0.555  | 40                            |
| 30                   | 30   | 0.347  | 34                            |
| 31                   | 26   | 0.300  | 37                            |
| 32                   | 18   | 0.208  | 40                            |
| 33                   | 27   | 0.312  | 43                            |
| 34                   | 18   | 0.208  | 45                            |
| 35                   | 10   | 0.115  | 55                            |
| 36                   | 23   | 0.266  | 55                            |
| 37                   | 48   | 0.555  | 55                            |
| 38                   | 14   | 0.162  | 55                            |
| 39                   | 49   | 0.567  | 55                            |
| 40                   | 18   | 0.208  | 55                            |
| 41                   | 24   | 0.277  | 55                            |
| 42                   | 13   | 0.150  | 55                            |

| Número do Consumidor | Consumo Médio Mensal [m <sup>3</sup> ]<br>(Fevereiro/Março de 98) | Vazão Mensal em [m <sup>3</sup> /s].10 <sup>-4</sup><br>Horas úteis/dia=8 | Elevação dos Consumidores [m] |
|----------------------|---|---|-------------------------------|
| 43                   | 11  | 0.127   | 55                            |
| 44                   | 13  | 0.150   | 52                            |
| 45                   | 21  | 0.243   | 61                            |
| 46                   | 23  | 0.266   | 75                            |
| 47                   | 15  | 0.173   | 75                            |
| 48                   | 24  | 0.277   | 96                            |
| 49                   | 10  | 0.115   | 74                            |
| 50                   | 14  | 0.162   | 75                            |
| 51                   | 21  | 0.243   | 75                            |
| 52                   | 10  | 0.115   | 75                            |
| 53                   | 10  | 0.115   | 75                            |
| 54                   | 10  | 0.115   | 75                            |
| 55                   | 10  | 0.115   | 75                            |
| 56                   | 10  | 0.115   | 61                            |
| 57                   | 10  | 0.115   | 55                            |
| 58                   | 12  | 0.138   | 55                            |
| 59                   | 10  | 0.115   | 55                            |
| 60                   | 14  | 0.162   | 55                            |
| 61                   | 12  | 0.138   | 55                            |
| 62                   | 23  | 0.266   | 55                            |
| 63                   | 18  | 0.208   | 55                            |
| 64                   | 54  | 0.625   | 55                            |
| 65                   | 25  | 0.289   | 55                            |
| 66                   | 19  | 0.219   | 40                            |
| 67                   | 18  | 0.208   | 35                            |
| 68                   | 10  | 0.115   | 40                            |
| 69                   | 13  | 0.150   | 40                            |
| 70                   | 10  | 0.115   | 40                            |
| 71                   | 12  | 0.138   | 28                            |
| 72                   | 34  | 0.393   | 25                            |
| 73                   | 14  | 0.162   | 25                            |
| 74                   | 18  | 0.208   | 25                            |
| 75                   | 21  | 0.243   | 25                            |
| 76                   | 31  | 0.358   | 12                            |
| 77                   | 10  | 0.115   | 9                             |
| 78                   | 31  | 0.358   | 7                             |



**Figura B.4 - Diagrama Colina da Bomba Centrífuga Utilizada no Bairro Vista Verde (Itajubá/MG) e Que Foi Interpolado Por Redes Neurais Nesta Dissertação.**



**Figura B.5 - Diagrama de Moody Que é Utilizado Para a Determinação do Fator de Atrito  $f$  e Que Foi Interpolado Por Redes Neurais Nesta Dissertação.**

## Apêndice C

### Aproximadores Universais de Funções

Para o estudo matemático adequado da teoria de aproximações de funções algumas definições são necessárias a priori (Spooner et al, 2002), a saber:

Definição 01: uma função  $f : D \rightarrow \mathbb{R}^n$  é contínua no ponto  $x \in D \subseteq \mathbb{R}^n$  se para cada  $\varepsilon > 0$  lá existe um  $\delta(\varepsilon, x)$  tal que para todo  $y \in D$  satisfazendo  $|x - y| < \delta(\varepsilon, x)$ , então  $|f(x) - f(y)| < \varepsilon$ . A função  $f : D \rightarrow \mathbb{R}^n$  será contínua sobre  $D$  se ela for contínua para cada ponto em  $D$ .

Definição 02: uma função  $f : D \rightarrow \mathbb{R}^n$  será uniformemente contínua sobre  $D \subseteq \mathbb{R}^n$  se para cada  $\varepsilon > 0$ , lá existir um  $\delta(\varepsilon)$  (dependente somente de  $\varepsilon$ ) tal que para todo  $x, y \in D$  satisfazendo  $|x - y| < \delta(\varepsilon)$ , então  $|f(x) - f(y)| < \varepsilon$ .

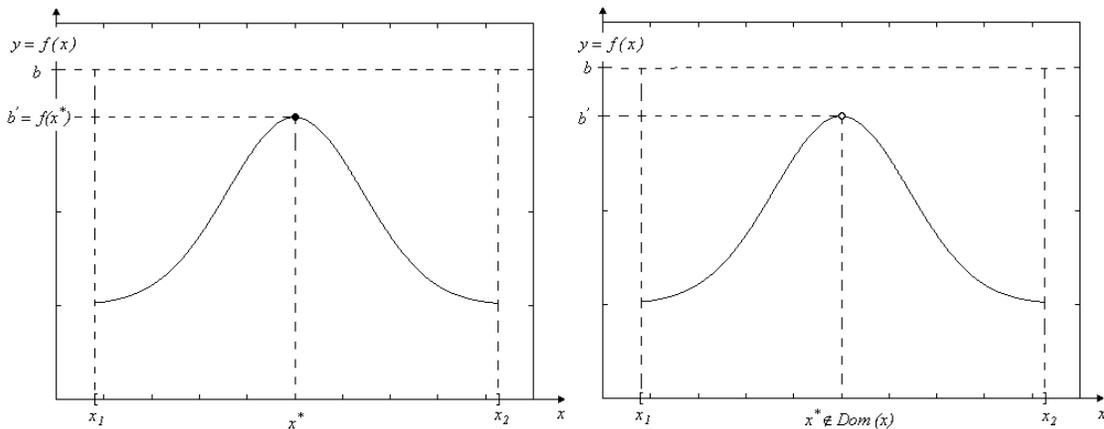
Definição 03: Uma função  $f : [0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$  será contínua por partes sobre  $[0, \infty)$  se  $f$  for contínua sobre qualquer intervalo finito  $[a, b] \subset [0, \infty)$  exceto sobre um número finito de pontos em cada um desses intervalos.

Definição 04: um número real  $b$  será uma cota superior de um conjunto  $X \neq \emptyset$  de números reais, se e somente se,  $x \leq b$  para todo  $x \in X$ . Além disso, se nenhum número menor que  $b$  for uma cota superior de  $X$ , então se diz que  $b$  é um supremo (sup) de  $X$ . A mesma definição é válida para o universo das funções reais  $y = f(x)$ , ou seja, a definição de supremo se aplica tanto ao universo dos conjuntos, quanto ao universo das funções.

Sendo assim, a partir da definição anterior sobre supremo é possível enunciar o princípio fundamental da existência de um supremo do domínio dos números reais, ou seja:

Princípio do Supremo: todo conjunto de números reais  $X \neq \emptyset$  ou uma função real do tipo  $y = f(x)$ , limitados superiormente, tem um supremo.

A Figura C.1 ilustra o significado geométrico do supremo. No lado esquerdo da Figura C.1, observe que tanto  $b$  como  $b'$  são cotas superiores, mas  $b'$  também é um supremo, pois não existe nenhuma cota superior menor que  $b'$ . Nesse caso, observe que  $b'$  também é o valor máximo de  $y = f(x)$  no domínio  $[x_1, x_2]$  considerado. Por outro lado, no lado direito da Figura C.1, tem-se um caso em que  $b'$  é ainda o supremo de  $y = f(x)$ , mas como  $x^*$  não pertence ao domínio que define a função  $y = f(x)$ ,  $b'$  não é o máximo de  $y = f(x)$ . Com essas considerações simples, vê-se que nem sempre o supremo é também o máximo.



**Figura C.1 – Exemplo Geométrico Simples para Ilustrar o Fato de que o Supremo de uma Função  $y = f(x)$  Nem Sempre é o Seu Máximo.**

Assim, conclui-se que o menor limite superior  $b'$  de uma função  $y = f(x)$  é o seu supremo, mas  $b'$  não pertence necessariamente a  $y = f(x)$ . Entretanto, se o menor limite superior  $b'$  pertencer a  $y = f(x)$ , então ele também será denominado de máximo. Se a função  $y = f(x)$  tiver um máximo, obviamente terá um supremo. Se a função  $y = f(x)$  tiver um supremo, este não será necessariamente o seu máximo. Observe que para universos finitos a operação de supremo também é necessariamente o máximo. Para universos infinitos (caso este, considerado nos parágrafos anteriores) o supremo poderá ou não ser o máximo.

Pode-se escrever o aproximador de funções como  $F(x, w)$ , onde  $w \in R^p$  é o vetor de parâmetros que são utilizados na definição do mapeamento do aproximador. Suponha ainda que  $\Omega^p \subset R^p$  denote o subconjunto de todos os valores que os parâmetros de um aproximador pode adquirir. Assim, admite-se:

$$G = \{F(x, w) : w \in \Omega^p, p \geq 0\} \quad (\text{C.1})$$

ser a classe de funções na forma  $F(x, w)$ ,  $w \in \Omega^p$ , para qualquer  $p \geq 0$ . Nesse caso, quando se diz “as funções de classe  $G$ ” não se diz necessariamente quão grande é  $p$ . Posto isso, um *aproximador uniforme* é definido da seguinte forma:

Definição 05: uma função  $f : D \rightarrow R$  pode ser *aproximada uniformemente* sobre  $D \subseteq R^n$  pelas funções de classe  $G$ , se para cada  $\varepsilon > 0$ , lá existir algum  $F \in G$  tal que  $\sup_{x \in D} |F(x) - f(x)| < \varepsilon$ .

Observe que na definição acima, quando se diz “ $F(x) \in G$ ”, não é especificado o valor de  $p \geq 0$ , que é o número de parâmetros necessários que define que  $F(x)$  seja capaz de alcançar um valor particular de  $\varepsilon > 0$ , e que definirá o nível de precisão da função do aproximador. Ainda com relação à definição cinco, observe que a operação de supremo sobre a função  $F(x) - f(x)$  estabelece que mesmo a diferença máxima em módulo dessas duas funções, a qual inevitavelmente ocorrerá para algum  $x$ , deve ainda ser menor que  $\varepsilon$ . Posto isso, dá-se agora a definição de um aproximador universal:

Definição 06: uma estrutura matemática definindo uma classe de funções  $G_1$  é considerada um *aproximador universal* para funções de classe  $G_2$ , se cada  $f \in G_2$  puder ser *uniformemente aproximada* por  $G_1$ .

Nesse formalismo, será desejado posteriormente extrair informações do tipo “redes neurais com arquitetura MLP (*MultiLayer Perceptrons*), que são aproximadores universais de funções contínuas”; os “sistemas *Fuzzy* do tipo Mandani são também aproximadores universais de funções contínuas”, etc. Sendo assim, de agora em diante e até o final deste Apêndice, tentar-se-á descobrir que certas classes de funções podem

servir como aproximadores universais de funções de outras classes de funções. Entretanto, essas provas estabelecerão condições que, dado um aproximador com um suficiente número de parâmetros ajustáveis, o aproximador associará alguma função  $f(x)$  com precisão arbitrária. As provas, entretanto, não dirão com precisão qual o número mínimo de parâmetros ajustáveis requeridos, sendo esses, na prática, ajustados sempre empiricamente. Assim, segundo Jang et al (1997), o estabelecimento de uma vasta classe de aproximadores universais são meros teoremas de existência e não métodos construtivos.

O teorema de partida para estabelecer a existência de aproximadores universais de funções é o teorema de Stone-Weierstrass. Entretanto, a demonstração desse teorema está além do escopo desta Dissertação. Acima de tudo, o que importa aqui é como utilizá-lo no estudo de estruturas de aproximadores universais. Esse teorema provê uma maneira muito geral e útil para determinar se certos aproximadores são realmente universais para uma classe de funções contínuas e definidas sobre um conjunto compacto. O teorema de Stone-Weierstrass será enunciado a seguir (e.g., Cotter, 1990; Jang et al, 1997; Spooner et al, 2002):

Teorema 01 (Stone-Weierstrass): uma função contínua  $f : D \rightarrow R$  pode ser *uniformemente aproximada* sobre  $D \subseteq R^n$  pelas funções de classe  $G$  se,

- (1) A função constante  $g(x) = 1, x \in D$  pertencer a  $G$ ,
- (2) Se  $g_1, g_2$  pertencer a  $G$ , então  $a \cdot g_1 + b \cdot g_2$  pertencerá a  $G$  para todo  $a, b \in R$ ,
- (3) Se  $g_1, g_2$  pertencer a  $G$ , então  $g_1 \cdot g_2$  pertencerá a  $G$ , e
- (4) Se  $x_1 \neq x_2$  forem dois pontos distintos em  $D$ , então lá existirá uma função em  $g \in G$  tal que  $g(x_1) \neq g(x_2)$ .

Por exemplo, aplica-se o teorema 1 para demonstrar que polinômios são aproximadores uniformes para funções contínuas. Antes, porém define-se a seguir tais classes de funções.

Definição 07: A função  $g : D \rightarrow R$  para  $D \subseteq R$  é considerada uma *função polinomial* se ela estiver na classe de funções definidas por

$$G_{fp} = \left\{ g(x) = \sum_{i=0}^p a_i x^i : a_0, \dots, a_p \in R, p \geq 0 \right\} \quad (C.2)$$

Posto isso, admite-se  $G_{cb}(n, D)$  ser o conjunto de todas as funções contínuas de valores escalares definidas sobre o subconjunto  $D \subset R^n$ , então será válido o seguinte teorema:

Teorema 02 (Teorema de Weierstrass): polinômios são aproximadores universais para  $f \in G_{cb}(1, D)$ ,  $D \subset R^1$ .

Demonstração: para demonstrar isso a partir do teorema de Stone-Weierstrass deve-se indicar que os itens (1) até (4) do teorema 01 conduzem para a classe de funções polinomiais  $G_{fp}$ . Assim,

(1) Tem-se que  $g(x) = 1$  quando  $a_0 = 1$  e  $a_k = 0$  para  $k \neq 0$  em  $g(x) = \sum_{i=0}^p a_i x^i$ .

(2) Se  $g_1(x) = \sum_{i=0}^p \alpha_i x^i$  e  $g_2(x) = \sum_{i=0}^p \beta_i x^i$  então,  $a.g_1(x) + b.g_2(x) = a \sum_{i=0}^p \alpha_i x^i + b \sum_{i=0}^p \beta_i x^i = \sum_{i=0}^p (a\alpha_i + b\beta_i) x^i = \sum_{i=0}^p \gamma_i x^i$  e desde que  $a.g_1(x) + b.g_2(x)$

é também um polinômio, fica estabelecido à segunda condição do teorema 01.

(3) Se  $g_1(x) = \sum_{i=0}^p \alpha_i x^i$  e  $g_2(x) = \sum_{i=0}^p \beta_i x^i$  então  $g_1(x).g_2(x) = \sum_{i=0}^{2p} \gamma_i x^i$  também é um polinômio.

(4) Se for admitida a função  $g(x) = x \in G_{fp}$  então,  $g(x_1) \neq g(x_2)$  para todo  $x_1 \neq x_2$ , estabelece-se também a verdade da quarta condição do teorema 01. Fica assim demonstrado o teorema 02.

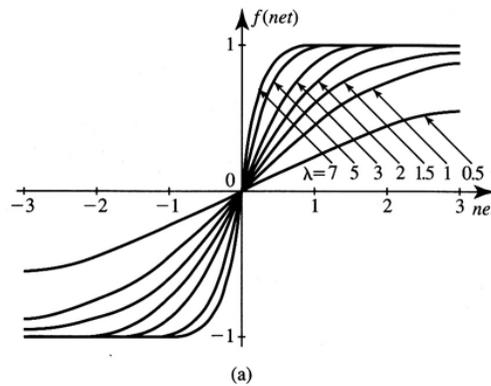
O teorema de Stone-Weierstrass proveniente da análise real clássica pode ser utilizado também para mostrar que certas arquiteturas de redes neurais possuem uma capacidade de aproximação universal (Cotter, 1990). O teorema de Stone-Weierstrass estabelece condições que garantem que redes neurais com arquitetura MLP (*Multilayer Perceptrons*) ou arquitetura RBF (*Radial-Basis Functions*), ou sistemas Fuzzy de

Inferência tipo Mamdani (e.g., Spooner et al, 2002; Jang et al, 1997) podem aproximar quaisquer funções contínuas no sentido dado pelas definições 5 e 6. Assim, antes de listar alguns teoremas importantes extraídos de (Spooner et al, 2002), concernentes ao tópico sobre aproximadores universais, define-se algumas funções importantes utilizadas na teoria de redes neurais.

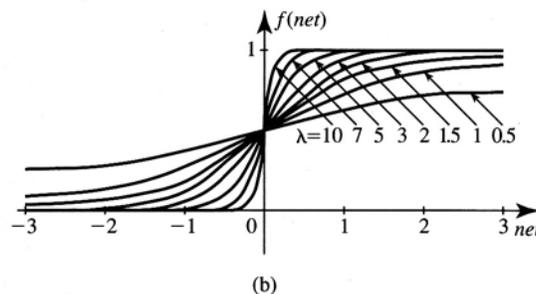
Uma *função sigmoide* é toda função *contínua* em formato de “s”. Exemplo de tal função seria a função tangente hiperbólica (ou função tansig) com assíntotas horizontais em -1 e +1 e dada pela equação  $\varphi(\text{net}) = \frac{2}{1 + \exp(-\lambda \cdot \text{net})} - 1$  (ver Figura C.2). Outro

exemplo de função sigmoide seria a função logística (ou função logsig) com assíntotas horizontais em 0 e -1 e dada pela equação  $\varphi(\text{net}) = \frac{1}{1 + \exp(-\lambda \cdot \text{net})}$  (ver Figura C.3).

Além dessas, existem outras funções que são em formato de “s”, mas são descontínuas. A seguir, serão definidas duas delas.



**Figura C.2 – Função tangente hiperbólica.**



**Figura C.3 – Função logística.**

**Função Sinal (*Signum Function*):** função descontínua dada pela equação

$$\varphi(\text{net}) = \text{sgn}(\text{net}) = \begin{cases} 1 & \text{se } \text{net} > 0 \\ -1 & \text{se } \text{net} < 0 \end{cases} \quad \text{ou} \quad \varphi(\text{net}) = \begin{cases} 1 & \text{se } \text{net} > 0 \\ 0 & \text{se } \text{net} = 0 \\ -1 & \text{se } \text{net} < 0 \end{cases}. \text{ Observe que essa}$$

equação é o limite de  $\lambda \rightarrow \infty$  na função Tangente Hiperbólica.

**Função de Limiar (*Heaviside Function* ou *Threshold Function*):** função descontínua dada pela equação  $\varphi(\text{net}) = \begin{cases} 1 & \text{se } \text{net} \geq 0 \\ 0 & \text{se } \text{net} < 0 \end{cases}$ . Essa equação foi originalmente

utilizada no neurônio de McCulloch e Pitts em 1943. Observe que essa equação é o limite de  $\lambda \rightarrow \infty$  na função Logística.

Observe que as funções sinal e a função de limiar não são funções sigmóides, uma vez que não são contínuas. Dada a definição dessas funções, pode-se agora listar os seguintes aproximadores universais de funções (e.g., Spooner et al, 2002) que podem ser demonstrados a partir do Teorema 01:

Teorema 03: redes MLP de duas camadas, uma camada interna com neurônios definidos pela função de limiar e uma saída linear, são aproximadores universais para  $f \in G_{cb}(1, D)$ ,  $D = [a, b]$ .

Teorema 04: redes MLP de duas camadas, uma camada interna com neurônios definidos pela função sigmoide  $\varphi: R \rightarrow [0, 1]$  e uma camada de saída linear, são aproximadores universais para  $f \in G_{cb}(1, D)$ ,  $D = [a, b]$ .

Teorema 05: sistemas *Fuzzy* com funções de pertinência triangulares na entrada e defuzzificação que utiliza a média dos centros são aproximadores universais para  $f \in G_{cb}(1, D)$ ,  $D = [a, b]$ .

Teorema 06: sistemas *Fuzzy* com funções de pertinência Gaussianas na entrada e defuzzificação que utiliza o cálculo do centro de gravidade (centroide) são aproximadores universais para  $f \in G_{cb}(n, D)$ ,  $D \subseteq R^n$ .

Teorema 07: redes MLP de duas camadas, uma camada interna com neurônios definidos pela função sigmoide e uma camada de saída linear, são aproximadores universais para  $f \in G_{cb}(n, D)$ ,  $D \subseteq R^n$ .

Teorema 08: redes RBF definidas pela classe de *funções de bases radiais*

$$G_{\text{fbr}} = \left\{ g(x) = \sum_{i=1}^p a_i \exp(-\gamma_i |x - c_i|^2) \right\} \text{ com } a_i, \gamma_i \in R \text{ e } c_i \in R^n \text{ para } i = 1, 2, \dots, p \text{ são}$$

aproximadores universais para  $f \in G_{cb}(n, D)$ .

Evidentemente, existem outros aproximadores universais além desses, como as redes SVM (Máquinas de Vetor de Suporte — Haykin, 1999). Entretanto, os aproximadores listados ao final dessa seção são suficientes para uma visão geral do assunto e para aludir ao fato de que a literatura a respeito desse tópico é bastante rica. Nos moldes expostos nesta seção fica claro que qualquer problema que pode ser resolvido com uma rede neural com arquitetura MLP poderia também ser resolvido com uma rede RBF ou um sistema *Fuzzy* do tipo Mamdani.

## Apêndice D

### Revisão Bibliográfica

O projeto de tubulações industriais e cálculo da perda de carga podem ser encontrados em Silva Telles (1979 e 1985). Introdução ao projeto de máquinas de fluxo está descrito em Macintyre (1987). Uma boa introdução ao Matlab pode ser encontrada em Hanselman (1997). Entretanto, essa revisão bibliográfica irá focar mais precisamente sobre os assuntos e trabalhos referentes ao método de Monte Carlo e nas redes neurais artificiais. Com esse propósito em mente, a seguir, serão descritos inicialmente os artigos e livros principais sobre os métodos de Monte Carlo e logo em seguida os artigos e livros sobre a teoria de redes neurais artificiais.

Há vários livros e artigos descrevendo matematicamente o método de Monte Carlo (e.g., Metropolis e Ulam, 1949; Hammersley, 1964; Shreider, 1967; Glasserman, 2004). Entretanto, um conhecimento mínimo em estatística é necessário para compreender melhor esse método. Um livro de estatística clássico da área é devido a Papoulis (1965).

O método de Monte Carlo é uma forma de resolver problemas utilizando números aleatórios. Este método é largamente utilizado em modelos de simulações computacionais. Neste contexto, define-se simulação como uma técnica que emula a operação de um sistema do mundo real à medida que esse sistema evolui no tempo. Uma forma adequada de simular o comportamento do tipo de variáveis que se pretende analisar é através do desenvolvimento de um modelo de simulação utilizando distribuições de probabilidades de eventos discretos conhecido como método de Monte Carlo.

O método de Monte Carlo consegue estabelecer condições geométricas precisas de comprimento e área de figuras complexas a partir de considerações puramente probabilísticas. Isto é devido à grande capacidade de geração de números aleatórios inerentes aos computadores. Considerações importantes a respeito dos métodos de Monte Carlo é que estes são baseados sobre a analogia existente entre probabilidade e volume, sendo inclusive o volume considerado no espaço n-dimensional. As matemáticas da medida (Glasserman, 2004) formalizam a noção intuitiva de probabilidades, associando

um evento com um conjunto de ocorrências possíveis e define a probabilidade do evento ocorrer sobre todo o universo de ocorrências. O método de Monte Carlo utiliza essa identidade do modelo inverso (Glasserman, 2004), ou seja, calculando o volume de um conjunto por interpretar o volume como uma probabilidade. Isto significa que amostras randômicas ou aleatórias de um universo de ocorrências de interesse - geradas exaustivamente pelo computador - conduzem a um sub-conjunto de leis formadoras daquele volume considerado. Observe que o método de Monte Carlo não necessariamente otimiza o comportamento de um volume considerado, embora eventualmente um sub-conjunto de leis formadoras do volume poderá coincidir de ser ótimo.

Como mostra Metropolis (1949), descobriu-se ser possível abrir mão dos complexos modelos matemáticos analíticos que modelavam as interações entre partículas nucleares em favor de modelar apenas as regras e estatísticas que governam cada etapa do processo. Partindo-se de uma distribuição estatística uniforme e então mapeando-a para distribuições de interesse ao problema dado, era possível processar múltiplas cadeias de decisões (simulações) e então extrair resultados relevantes com precisão compatível à métodos analíticos.

A inteligência artificial permitiu grandes avanços na área da computação. Uma das abordagens com maior sucesso são as redes neurais artificiais, que permitem, por exemplo, o reconhecimento da escrita, processamento de imagens, modelagem de sistemas dinâmicos não lineares, aplicações em teoria de controle e etc. Uma boa introdução à teoria das redes neurais artificiais pode ser encontrada em Zurada (1992), em Haykin (1999) ou em Russell e Norvig (2003). Um ponto de partida bastante importante no estudo das redes neurais artificiais é que elas são consideradas aproximadores universais de funções (e.g., Cybenko, 1988; Hornik et al, 1989; Cotter, 1990; Jang et al, 1997; Spooner et al, 2002). Por exemplo, para saber um pouco mais sobre o trabalho de Spooner et al (2002) ler o Apêndice C desta Dissertação de Mestrado.

Assim, as redes neurais artificiais (RNA) têm sido muito utilizadas na *modelagem de sistemas dinâmicos não lineares* nas últimas décadas, pois elas possuem uma alta capacidade de aproximar mapeamentos não lineares. Vários estudos foram desenvolvidos nessa área utilizando a metodologia NARMAX (*Non linear Auto Regressive Moving Average with eXogenous input*) e posterior aplicação em controle (e.g., Narendra and

Parthasarathy, 1990; Chen e Billings, 1992; Hunt e Sbarbaro, 1992; Hunt et al., 1992; Narendra, 1996; Jarmulak et al, 1997; Wang e Lin, 1998; Rios Neto, 2001).

Livros nacionais sobre redes neurais artificiais e escritos originalmente em língua portuguesa podem ser encontrados em Nascimento (1995), em Kovács e Solt (1996) ou em Loesch e Sari (1996). O primeiro livro traduzido para a língua portuguesa sobre inteligência artificial é o livro de Rich (1993). Entretanto, é bom observar que atualmente o melhor livro de inteligência artificial traduzido para a língua portuguesa é o livro de Russel e Novig (2003) e que é utilizado pelas principais universidades ao redor do mundo. Uma boa tradução para a língua portuguesa de um livro exclusivamente sobre redes neurais artificiais é o livro de Yalkin (1999).

O trabalho histórico que limitou a aplicação de redes neurais artificiais no final da década de sessenta é devido a Minsky (1969). Outro trabalho histórico, mas sobre aprendizado de máquinas é devido a Nilsson (1965). O algoritmo de treinamento de uma rede neural com arquitetura MLP denominado *backpropagation* é devido a Rumelhart et al (1986). Entretanto, os primeiros conceitos matemáticos sobre o algoritmo *backpropagation* pode ser encontrado em Werbos (1974). Werbos (1990) publica um artigo sobre a descrição histórica desse algoritmo.

O algoritmo de treinamento de uma rede neural com arquitetura MLP (*Multi Layer Perceptron*) conhecido como algoritmo de Marquardt e muito utilizado nessa Dissertação de Mestrado é devido a Hagan (1994). Outros algoritmos foram desenvolvidos para acelerar o treinamento de redes MLP como, por exemplo, o trabalho de Shah et al (1992).

Trabalhos muito interessantes para reconhecimento autônomo de palavras manuscritas e utilizando redes neurais artificiais podem ser encontrados em Chiang, (1998) ou em Shustorovich e Tharsher (1996). Kim e Kim (1996) resolve esse mesmo tipo de problema para o reconhecimento de manuscritos coreanos. Um trabalho utilizando redes neurais artificiais com arquitetura RBF e treinada via algoritmos genéticos pode ser encontrado em Kuncheva (1997).

É importante observar que o surgimento histórico das redes neurais artificiais coincide com os surgimentos da lógica *fuzzy* e dos algoritmos genéticos. Por essa razão é comum aparecer artigos importantes que envolvem sistemas híbridos combinando essa

três técnicas de inteligência artificial. Por exemplo, o trabalho Linkens (1996) tem uma importância muito grande, pois esse autor utiliza um sistema híbrido com essas três técnicas de inteligência artificial aplicadas em problemas de controle. Uma leitura bastante agradável e profunda sobre algoritmos genéticos pode ser encontrada no livro de Mitchell (1998). O trabalho original de surgimento da lógica *fuzzy* é devido a Zadeh (1965) e (1988). Um livro histórico sobre lógica *fuzzy* e sistemas *neuro fuzzy* é devido a Kosko (1992). Gomide (1994) publica um artigo muito interessante na revista nacional da SBA *Controle e Automação* sobre controladores *fuzzy*. Esse autor é muito reconhecido no Brasil.