

JOSÉ GOMES DA SILVA

**OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE
ÁGUA CONSIDERANDO VARIÁVEIS AS CONDIÇÕES DE
CONTORNO DO PROJETO**

Tese apresentada à Universidade
Federal de Campina Grande -
UFCG, em cumprimento dos
requisitos necessários para a
obtenção do grau de Doutor em
Recursos Naturais, área de
Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Heber Pimentel Gomes

Campina Grande - PB



FICHA CATALOGRÁFICA

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCEG

S 586o

Silva, José Gomes da
Otimização de sistemas de abastecimento de água
considerando variáveis as condições de contorno do projeto
/ José Gomes da Silva - Campina Grande: UFCEG, 2003.
252 p. il.

Tese (Doutorado em Recursos Naturais - Recursos
Hídricos). UFCEG/CCT.

Inclui Bibliografia

1. Redes de abastecimento de água 2. Projetos de
sistemas de abastecimento 3. Otimização I. Título

CDU: 628.144.22

JOSÉ GOMES DA SILVA

**OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE
ÁGUA CONSIDERANDO VARIÁVEIS AS CONDIÇÕES DE
CONTORNO DO PROJETO**

Tese apresentada à Universidade
Federal de Campina Grande - UFCG,
em cumprimento dos requisitos
necessários para a obtenção do grau de
Doutor em Recursos Naturais, área de
Recursos Hídricos.

Aprovada em: 16 de dezembro de 2003.

COMISSÃO EXAMINADORA

HEBER PIMENTEL GOMES, Dr. Ing. (UFPB)
(Orientador)

VAJAPEYAM S. SRINIVASAN, Ph.D. (UFCG)
(Examinador interno)

CARLOS DE OLIVEIRA GALVÃO, Dr. (UFCG)
(Examinador Interno)

ANTONIO MAROZZI RIGHETTO, Dr. (UFRN)
(Examinador Externo)

LUISA F. R. REIS, Dr. (EESC/USP/S. CARLOS)
(Examinador Externo)

DEDICATÓRIA
(in memoriam)

À Bento Gomes da Silva,
meu pai,
sua presença: o exemplo,
sua ausência: a saudade.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por estar presente em todos os momentos de minha vida, sempre mostrando os caminhos certos.

Ao professor Heber Pimentel, pela orientação eficiente, determinada e amigável.

À minha esposa Márcia, pela paciência, dedicação e compreensão, sendo companheira presente em todos os momentos.

À minha mãe, Josefa Gomes da Silva, pelo exemplo de perseverança e luta para alcançar os objetivos.

Aos meus filhos, Eva Christianne, Alessandra e Eduardo José, e às minhas netas Maria Luiza e Maria Eduarda, complementos da minha vida e motivação para lutar por dias melhores.

Aos meus parentes e amigos por de uma forma indireta também contribuírem para a realização deste trabalho.

Às professoras Bernardete Feitosa Cavalcanti e Paula Frassinetti Cavalcanti, pela colaboração espontânea, sempre que foram solicitadas.

Ao chefe do Departamento de Engenharia Civil, professor Carlos Fernandes, pelo apoio que nos foi dado.

Aos professores da área de Estruturas, particularmente Marcos Aurélio e Luciano Gomes, pela compreensão e coleguismo.

Ao curso de Pós-Graduação em Recursos Naturais pelo acolhimento, e em especial aos professores da Área de Recursos Hídricos.

A Gustavo Sousa pela realização dos módulos e código fonte do programa computacional desenvolvido.

A Saulo de Tarso M. Bezerra por sua participação na revisão e diagramação desta tese.

À Alrezinha, Raul e demais funcionários do Laboratório de Hidráulica.

RESUMO

Durante décadas, o dimensionamento de redes de distribuição dos sistemas de abastecimento de água foi feito pelos métodos tradicionais de Hardy-Cross e do Seccionamento Fictício. Somente a partir do final da década de sessenta, com o uso de microcomputadores, foi possível a aplicação das técnicas de otimização matemática no dimensionamento econômico de sistemas de distribuição de água, visando à obtenção do custo mínimo total. Surgiram vários métodos de otimização de redes de distribuição de água, baseados nestas técnicas. No entanto, em todos eles, os parâmetros das condições de contorno do projeto são considerados invariáveis durante todo o seu alcance, ou seja, não se leva em consideração as variações que podem ocorrer na população, na rugosidade das paredes internas das tubulações, no consumo diário de água, na vazão média de projeto, no número de horas de bombeamento e nos fatores econômicos, desde o instante de implantação até o final do período de exploração do projeto. Verificou-se, também, que nestes métodos não são considerados os efeitos dos custos do concreto estrutural do reservatório elevado necessário para a distribuição da água. Portanto, constatou-se a necessidade de se estudar as variações destes parâmetros e incorporá-los no processo de dimensionamento econômico dos projetos de sistemas de abastecimento de água. Desta forma, neste trabalho, realizaram-se estudos aprofundados sobre as variações desses parâmetros ao longo do tempo, sendo desenvolvidas ou adaptadas fórmulas para o cálculo da rugosidade, perda de carga, população, vazão média de projeto, número anual de horas de bombeamento e fatores econômicos. Estes estudos foram incorporados ao método de otimização de redes desenvolvido com base no modelo matemático da programação não linear, onde se consideraram as variações destes parâmetros durante todo o alcance do projeto. Também foi estudado o efeito dos custos do reservatório elevado no processo de otimização. A solução deste método foi feita através de um programa computacional desenvolvido neste trabalho e capaz de realizar a otimização do sistema. Aplicou-se o método no dimensionamento econômico das redes do bairro do Bessa (João Pessoa-PB) e da cidade de Itororó (Bahia). Constatou-se que o método e o programa computacional desenvolvidos neste trabalho se mostraram eficientes na determinação do custo ótimo total do projeto como também que devem ser considerados os efeitos das variações dos parâmetros das condições de contorno dos projetos na otimização de sistemas de abastecimento de água, tendo em vista que os mesmos têm influência significativa nos resultados do dimensionamento. Observou-se, também, que o custo do concreto do reservatório elevado pode ser incluído diretamente no processo de otimização.

ABSTRACT

For decades, the water supply system design was held by the traditional methods of Hardy-Cross and Fictitious Sectioning. Only since the end of the sixty decade, with the use of microcomputers it was possible the application of the mathematics optimization techniques in the economical design of the water supply systems, in order to obtain the minimal total cost. Based on these techniques, many methods of optimisation in the water supply system appeared. However, in all of them the parameters of the project's boundary conditions are considered invariable during all its range. It does not take into account the variation that can occur in the following aspects: population, internal roughness pipe walls, daily water consumption, project's average demand, number of pumping hours and in the economical factors, since the moment of the project's implantation until the end of its exploration period. It was also verified that in these methods the costs effects of the structural concrete of the elevated reservoir necessary for the water supply are not taking in account. Therefore, it was proved the necessity of studying these parameters variation and incorporating them in the process of the economical water supply system projects. In this work, deeper studies about the variation of these parameters along the time were carried out, in which some formulas were developed or adapted for roughness calculation, head loss, population, project average demand, annual number of pumping hours and economical factors. These studies were incorporated to the method of systems optimization developed with base on the mathematics model of the non-linear programming, in which the variation of these parameters are considered during all the project range. The costs effects of the elevated reservoir were also studied in the optimisation process. The solution of this method was held by a computation program developed in this work, which is able to carry out the system optimization. The method was applied in the networks economical system design in the Bessa district (João Pessoa -PB) and in the city of Itotoró (Bahia). It was proved that the method and the computation program developed in this work were efficient in the determination of the total optimum cost of the project. It was possible to conclude that the variation effects of the parameters of the project's boundary conditions should be considered in the optimization of the water supply system, taking into account that they have meaningful influence in the design. Finally, it was observed that the concrete cost of the elevated reservoir can be included in the optimization process.

Key-words: Water Supply System. Design. Optimization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Corrosão e incrustação (Extraída de Netto, 1998)	5
Figura 2.2 - Coeficiente de variação no dimensionamento das partes do sistema	29
Figura 2.3 - Variação do custo do sistema de abastecimento com a cota da alimentação .	40
Figura 4.1 - Diagrama modificado de Caldwell-Lawrence - A linha A representa o equilíbrio do CO ₂ com o ar	52
Figura 4.2 - Exemplo Ilustrativo 4.1: Caldwell-Lawrence	54
Figura 4.3 Curva de ajuste da População do Brasil versus Tempo	69
Figura 5.1 - Custos fixos e custos variáveis (com início na data t_1)	76
Figura 5.2 - Custos fixos e custos variáveis (com início na data $t_1 = 1$)	77
Figura 5.3 - Valores presentes dos custos variáveis	78
Figura 5.4 - Valores futuros dos custos do projeto	83
Figura 5.5 - Custos anuais de investimento e de operação	86
Figura 5.6 - Anuidades dos custos de investimento	87
Figura 5.7 - Transformação dos custos de operação em anuidades	90
Figura 5.8 - Pagamentos em anuidades	92
Figura 6.1 – Fluxograma esquemático do método desenvolvido neste trabalho	95
Figura 6.2 – Fluxograma esquemático dos módulos e códigos fonte do programa computacional desenvolvido neste trabalho	110
Figura 7.1 - Esquema do grande setor	113
Figura 7.2 - Curva de ajuste do custo de implantação das tubulações versus os diâmetros	114
Figura 7.3 - Esquema da rede de distribuição, sentidos das vazões e numeração dos nós e dos trechos	143
Figura 7.4 - Curva de ajuste do custo de implantação versus diâmetros dos tubos	145
Figura 1 – Curva de ajuste da altura do pilar versus volume de concreto estrutural	185
Figura 2 – Seção de vala trapezoidal (Extraída de Gomes, 2002)	186

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Valores da magnitude absoluta (ε) em metros	6
Tabela 2.2 - Coeficiente de crescimento da magnitude para vários tipos de água	8
Tabela 2.3 - Valores de f na fórmula de Darcy_Weisbach, para tubos novos de ferro fundido e aço	13
Tabela 2.4 - Consumos médios diários dos nós	24
Tabela 7.1 - Vazões demandadas e cotas dos nós	113
Tabela 7.2 - Comprimentos dos trechos	113
Tabela 7.3 - Preço de implantação dos tubos	114
Tabela 7.4 - Populações dos censos 1991 e 2000	116
Tabela 7.5 - Diâmetros comerciais, vazões e velocidades na 2ª etapa - Exemplo 7.1	124
Tabela 7.6 - Diâmetros comerciais, vazões e velocidades na 2ª etapa - Exemplo 7.2	136
Tabela 7.7 - Vazões e cotas dos nós da rede de distribuição	144
Tabela 7.8 - Comprimentos dos trechos	144
Tabela 7.9 - Diâmetros nominais internos, custos dos tubos e custos de instalação	144
Tabela 7.10 - Diâmetros comerciais, vazões e velocidades na 2ª etapa - Exemplo 7.2 ...	156
Tabela A.1 - Censo Demográfico do ano de 1991 - Média de moradores por domicílio e por situação (urbana e rural), segundo as unidades territoriais	245
Tabela A.2 - Censo Demográfico de 2000 - População residente, por situação do domicílio e sexo, segundo as Grandes Regiões e as Unidades da Federação - Brasil - Grandes Regiões	246
Tabela A.3 - Estimativas das populações residentes, em 1º de julho de 2001 e 2002, segundo o Brasil, Grandes Regiões e Unidades da Federação	247

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 - Valor do Coeficiente C para a fórmula de Hazen-Williams	14
Quadro 2.2 - Estimativa média dos consumos comerciais e industriais	23
Quadro 1 - Volume do concreto da estrutura x altura do pilar	185
Quadro 2 – Composição dos custos de instalação das tubulações	187

LISTA DE PLANILHAS

Planilha 7.1 - Exemplo 7.1 - 1ª Etapa - Dimensionamento Inicial	122
Planilha 7.2 - Exemplo 7.1 - 1ª Etapa - Dimensionamento Otimizado	123
Planilha 7.3 - Exemplo 7.1 - 2ª Etapa - Dimensionamento Inicial	128
Planilha 7.4 - Exemplo 7.1 - 2ª Etapa - Dimensionamento Definitivo	129
Planilha 7.5 - Exemplo 7.2 - 1ª Etapa - Dimensionamento Inicial	134
Planilha 7.6 - Exemplo 7.2 - 1ª Etapa - Dimensionamento Otimizado	135
Planilha 7.7 - Exemplo 7.2 - 2ª Etapa - Dimensionamento Inicial	139
Planilha 7.8 - Exemplo 7.2 - 2ª Etapa - Dimensionamento Definitivo	140
Planilha 7.9 - Relatório do Exemplo 7.2	141
Planilha 7.10 - Exemplo 7.3 - 1ª Etapa - Dimensionamento Inicial - Sem Reservatório	152
Planilha 7.11 - Exemplo 7.3 - 1ª Etapa - Dimensionamento Otimizado - Sem Reservatório	153
Planilha 7.12 - Exemplo 7.3 - 1ª Etapa - Dimensionamento Inicial - Com Reservatório	154
Planilha 7.13 - Exemplo 7.3 - 1ª Etapa - Dimensionamento Otimizado - Com Reservatório	155
Planilha 7.14 - Exemplo 7.3 - 2ª Etapa - Dimensionamento Inicial - Sem Reservatório	161
Planilha 7.15 - Exemplo 7.3 - 2ª Etapa - Dimensionamento Definitivo - Sem Reservatório	163
Planilha 7.16 - Relatório do Exemplo 7.3 - Sem Reservatório	165
Planilha 7.17 - Exemplo 7.3 - 2ª Etapa - Dimensionamento Inicial - Com Reservatório	166
Planilha 7.18 - Exemplo 7.3 - 2ª Etapa - Dimensionamento Definitivo - Com Reservatório	168
Planilha 7.19 - Relatório do Exemplo 7.3 - Com Reservatório	170
 Planilha B.1 - 1ª Etapa - Solução Inicial	 249
Planilha B.2 - 1ª Etapa - Solução Definitiva	250
Planilha B.3 - 2ª Etapa - Solução Inicial	251
Planilha B.4 - 2ª Etapa - Solução Definitiva	252

SUMÁRIO

Capítulo 1 - Introdução	1
Capítulo 2 - Revisão da Literatura	4
2.1. Rugosidade	4
2.2. Precipitação de CaCO_3 da Água (Incrustação)	8
2.3. Perdas de Carga	9
2.3.1. Fórmula de Darcy-Weisbach (Fórmula Universal)	9
2.3.1.1. Valores do Coeficiente de Atrito	10
2.3.2. Fórmula de Hazen-Williams	14
2.4. Determinação da Demanda de Água do Projeto	15
2.4.1. Preliminares	15
2.4.2. Previsão da População.....	15
2.4.3. Consumos de água	22
2.4.4. Vazão de projeto	25
2.5. Materiais Empregados nas tubulações.....	31
2.5.1. Tubos de PVC e de Ferro Fundido	31
2.6. Análise Econômica dos Projetos de Redes de Distribuição de Água	31
2.6.1. Custos Fixos e Custos Variáveis	31
2.7. Métodos de Otimização de Redes de Distribuição de Água	35
2.7.1. Introdução	35
2.7.2. Técnicas de Enumeração Exaustiva	37
2.7.3. Programação Linear	38
2.7.4. Programação Não Linear	38
2.7.5. Programação Dinâmica	40
2.7.6. Algoritmo Genético	40
2.7.7. Considerações Finais a Respeito da Escolha do Método Usado	42

Capítulo 3 - Metodologia	43
---------------------------------------	-----------

Capítulo 4 - Estudo da Variação dos Parâmetros que Determinam as Condições de Contorno de um projeto de Abastecimento de Água	46
--	-----------

4.1. Qualidade da água - Estados de Saturação - Índices de Saturação - Diagrama Modificado de Caldwell-Lawrence	46
4.1.1. Qualidade da Água	46
4.1.2. Estados de Saturação	48
4.1.3. Índices de Saturação	50
4.1.4. Diagrama Modificado de Caldwell-Lawrence	51
4.2. Variação da Rugosidade	56
4.2.1. Preliminares	56
4.2.2. Determinação do Aumento da Rugosidade	57
4.3. Variação da Perda de Carga	58
4.3.1. Fórmula de Darcy-Weisbach Considerando-se os Parâmetros Variáveis	59
4.3.2. Fórmula de Hazen-Williams Considerando-se os Parâmetros Variáveis	61
4.4. Estimativa do Crescimento da População	67
4.4.1. Preliminares	67
4.4.2. Estimativas do Crescimento da População	68
4.5. Variação da Vazão do Projeto	69
4.5.1. Variação da Vazão	70
4.6. Variação do Custo Unitário da Energia (kWh)	71
4.6.1. Preliminares	71
4.6.2. Valor Presente dos Custos Anuais do kWh	72
4.6.3. Valor Futuro dos Custos Anuais do kWh	73
4.7. Custo Unitário de Operação da Estação de Bombeamento	73

Capítulo 5 - Aspectos Econômicos - Custos dos Projetos	76
---	-----------

5.1. Aspectos Econômicos	76
5.1.1. Custos Fixos e Custos Variáveis	76

5.2. Custos do Projeto	77
5.2.1. Análise Econômica do Projeto Através do Valor Presente.....	78
5.2.1.1. Valores Presentes dos Custos Unitários da Operação de Bombeamento	79
5.2.1.2. Valor Presente (C_T') dos Custos Totais do Projeto	81
5.2.1.3. Caso Particular do Valor Presente dos Custos Unitários de Operação da Estação de Bombeamento	81
5.2.1.4. Caso Particular do Valor Presente dos Custos Totais do Projeto	82
5.2.2. Análise Econômica do Projeto Através do Valor Futuro (Montante)	82
5.2.2.1. Valores Futuros dos Custos Unitários de Operação da Estação de Bombeamento	83
5.2.2.2. Valor Futuro dos Custos de Investimento	84
5.2.2.3. Valor Futuro dos Custos Totais do Projeto	84
5.2.2.4. Caso Particular do Valor Futuro dos Custos Unitários de Operação	85
5.2.2.5. Caso Particular do Valor Futuro dos Custos Totais do Projeto	86
5.2.3. Análise Econômica do Projeto Através de Pagamentos Anuais	86
5.2.3.1. Cálculo dos Pagamentos Anuais Devido aos Custos de Investimento e de Operação	87
5.2.3.2. Cálculo dos Pagamentos em Anuidades Devido aos Custos de Investimento e de Operação	89
5.2.3.3. Caso Particular das Anuidades	92

Capítulo 6 - Desenvolvimento do Método de Otimização de Sistemas de Abastecimento de Água Considerando Variáveis as Condições de Contorno do Projeto. Desenvolvimento do Programa Computacional

6.1. Preliminares	94
6.2. Desenvolvimento do Método	94
6.2.1. Primeira Etapa: Dimensionamento Inicial.....	96
6.2.1.1. Função Objetivo	96
6.2.1.2. Restrições	98
6.2.1.3. Resolução da Primeira Etapa do Método	103
6.2.2. Segunda Etapa: Dimensionamento Definitivo	103
6.2.2.1. Preliminares	103
6.2.2.2. Função Objetivo	103
6.2.2.3. Restrições	104
6.2.2.4. – Resolução da Segunda Etapa do Método	107
6.3. Desenvolvimento do Programa Computacional e Análise dos Resultados	107

Capítulo 7 - Aplicações do Método Desenvolvido e Análise dos Resultados	111
7.1 . Preliminares	111
7.2. Exemplo 7.1 - Resolução do Exemplo 5.3.1 : Rede Malhada com cota de Alimentação Variável (Extraído de Gomes, 2002)	112
7.2.1. Resolução pelo PLN2000	114
7.2.2. Resolução pelo Método Proposto neste Trabalho	115
7.3. Exemplo 7.2	131
7.4. Exemplo 7.3	143
Capítulo 8 - Conclusões e Recomendações	173
Referências Bibliográficas	178
Apêndices	183
Apêndice A - Verificação do efeito do custo da estrutura da caixa d'água, dos pilares e das fundações no dimensionamento econômico da rede	184
Apêndice B - Cálculo dos custos unitários de instalação das tubulações do Exemplo 7.3	186
Apêndice C - Módulos e código fonte do programa computacional desenvolvido neste trabalho	188
Anexos	243
Anexo A - Tabelas de Censos Demográficos do Brasil	244
Anexo B - Planilhas do Exemplo 5.3.1 - Extraídas de Gomes (2002)	248

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O dimensionamento das redes de distribuição dos Sistemas de Abastecimento de Água foi feito, durante décadas, com o suporte dos métodos tradicionais de Hardy-Cross¹ e do Seccionamento fictício, que levam em consideração apenas o dimensionamento hidráulico das redes. A partir do final da década de sessenta, quando o uso de microcomputadores tornou-se acessível, foi possível a aplicação de técnicas de otimização matemática no dimensionamento de sistemas de distribuição de água, visando a minimização do custo conjunto rede/instalação de recalque. Surgiram, então, os métodos de otimização de projetos de redes, baseados em técnicas de busca, ou no emprego da programação linear e da programação dinâmica (Walski *et al.*, 1987).

No dimensionamento econômico de redes de distribuição de água são usadas várias técnicas de otimização, dentre as principais pode-se destacar: enumeração exaustiva, programação linear, programação não linear, programação dinâmica (método de gradiente) e algoritmo genético.

Segundo Lopes (2002), Lai e Schaake (1969) apresentaram o primeiro modelo para a determinação dos diâmetros de uma rede malhada a um custo mínimo, o qual foi desenvolvido através da Programação Linear, e Alperovits e Shamir (1977) desenvolveram o método Linear Programming Gradient, que foi o primeiro método a incorporar o cálculo da rede no processo de otimização

Baseados nas técnicas de otimização surgiram vários métodos de dimensionamento econômico de redes de distribuição de água, tais como Granados, WADISO, PNL2000, dentre outros. Estes métodos têm uma característica em comum: a determinação do custo ótimo do conjunto implantação da rede de distribuição e operação do sistema, sem levar em consideração a variação de certos parâmetros que, na operação do sistema poderão variar, desde o início de sua entrada em operação até atingir o alcance

¹ Hardy Cross (1885 – 1959): criador do conhecido método matemático iterativo conhecido como *método Hardy-Cross*, fundamental para simplificação de cálculos estruturais e que foi adaptado para cálculos de vazão em tubulações sob pressões em redes de distribuição de água. Foi professor de engenharia estrutural na University of Illinois e professor titular em Yale.

previsto para o projeto, tais como, rugosidade das paredes internas das tubulações, diâmetro interno e vazão. Estas variáveis influenciam diretamente as perdas de carga e, por conseguinte, o cálculo das tubulações e das alturas manométricas requeridas pelo projeto, que, por sua vez, irão refletir em mudança no dimensionamento ótimo do sistema de distribuição de água.

Os métodos de dimensionamento econômico de redes de distribuição de água, conhecidos atualmente, procuram determinar os diâmetros das tubulações da rede e a respectiva altura de elevação do reservatório de abastecimento (altura manométrica) de forma a se obter uma solução econômica ótima, ou seja, que o custo da rede de distribuição mais a manutenção e operação do sistema tenham, durante o período previsto para seu funcionamento (alcance do projeto), um valor ótimo.

No desenvolvimento destes métodos considera-se para todo o período de operação do projeto (alcance), que: a vazão média de projeto é constante; no cálculo da perda de carga, seja qual for a fórmula adotada, usam-se coeficientes constantes; a população considerada é a que a comunidade a ser abastecida terá ao final do alcance do projeto; no cálculo dos custos de manutenção e operação do sistema são adotados vazão e número de horas de bombeamento constantes.

Verifica-se que os métodos adotados atualmente, fornecem uma solução econômica ótima considerando constantes os fatores acima citados, durante todo o alcance do projeto, não levando em consideração as variações que podem ocorrer na população, na rugosidade das tubulações, no consumo de água e no número de horas de bombeamento, desde o instante da implantação até o final do período de execução do mesmo, não sendo, portanto, a solução obtida, talvez a realmente mais econômica e a que melhor represente as condições reais de operação do projeto.

Verifica-se, também, que o valor presente dos custos de operação do projeto determinado através dos métodos existentes, onde são considerados constantes a vazão e o número de horas de bombeamento, é relativamente mais elevado do que aquele que se teria caso fossem levadas em consideração as variações destes parâmetros.

Constata-se, ainda, que nos métodos de dimensionamento econômico de sistemas de abastecimento de água existentes, não são sequer discutidas as necessidades de se considerar ou não os custos do concreto estrutural do reservatório elevado necessário para a distribuição da água aos diversos pontos da rede, principalmente verificando-se os efeitos da variação destes custos com a variação da altura dos pilares.

Verifica-se, portanto, que há a necessidade de se estudar as variações destes parâmetros durante todo o alcance do projeto e se determinar os seus efeitos no dimensionamento e operação dos sistemas de abastecimento de água, sendo este um dos principais objetivos deste trabalho.

O objetivo geral desta pesquisa é se estudar as variações dos parâmetros das condições de contorno do projeto e determinar um método de otimização de sistemas de abastecimento de água considerando-se estes parâmetros variáveis. Os objetivos específicos são:

- estudo da variação dos parâmetros: rugosidade, perdas de carga, população, consumo de água, vazão e fatores econômicos, ao longo do alcance do projeto;
- desenvolvimento de um método de dimensionamento econômico de redes de distribuição de água, considerando-se variáveis os parâmetros das condições de contorno do projeto. Também foi verificado o efeito do custo da estrutura do reservatório elevado, variando-se a altura dos pilares, no dimensionamento econômico do projeto;
- resolução do método proposto através de uma ferramenta computacional auxiliar, tendo sido desenvolvido um programa que realiza a otimização do sistema.

Este trabalho é constituído de oito capítulos. No Capítulo 1 é feita a introdução, onde é mostrada a necessidade de se realizar esse estudo e são apresentados os objetivos nele alcançados. No segundo capítulo se faz a Revisão da Literatura existente, pertinente aos assuntos em questão. O terceiro capítulo trata da metodologia adotada no desenvolvimento deste trabalho, visando alcançar os objetivos propostos. No quarto capítulo é feito um estudo da variação dos parâmetros das condições de contorno de um projeto de abastecimento de água. No quinto capítulo fez-se uma análise dos aspectos econômicos e custos dos projetos através de seus valores presentes, futuros e anuidades. O sexto capítulo trata do desenvolvimento de um método de otimização de sistemas de redes de abastecimento de água, considerando-se variáveis as condições de contorno do projeto e de um programa computacional para resolvê-lo. No sétimo são feitas aplicações do método proposto e a análise dos resultados. No oitavo capítulo são feitas as conclusões sobre os estudos desenvolvidos e as sugestões para aplicações e desenvolvimento de trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo são apresentados os fundamentos teóricos dos tópicos básicos necessários ao desenvolvimento deste trabalho, com relação ao dimensionamento otimizado de sistemas de distribuição de água: rugosidade, perdas de carga, crescimento populacional, demanda de água, vazão e análise econômica. São abordados também os processos e métodos de otimização disponíveis na literatura específica.

2.1 - RUGOSIDADE

As redes de distribuição de água são constituídas de tubulações, conexões, etc., onde a água se desloca em regime forçado, estando submetida à pressão superior à atmosférica. O movimento da água em uma tubulação pode se verificar em regime laminar, turbulento ou transitório.

Um dos critérios mais usados para se determinar o tipo de movimento de um líquido em uma canalização é através do número de Reynolds de diâmetro, usualmente chamado apenas de número de Reynolds, dado por:

$$R_e = \frac{vD}{\nu} \quad (2.1)$$

sendo:

R_e – número de Reynolds;

D – diâmetro da tubulação, em m;

v – velocidade média do fluido, em m/s;

ν – viscosidade cinemática do fluido, em m^2/s .

Na prática, a maioria dos casos de escoamento da água em tubulações se verifica em regime turbulento.

As paredes internas dos tubos usados nas redes de distribuição de água apresentam rugosidades, que dependem do material empregado, do processo de fabricação dos tubos, das juntas existentes na tubulação, da técnica de assentamento, do estado de conservação, do emprego de revestimentos internos especiais e de medidas protetoras durante o funcionamento (Azevedo Netto, 1998).

Os tubos de ferro fundido ou de aço, com o passar do tempo, são atacados pelo fenômeno da corrosão, havendo o surgimento de tubérculos ou reentrâncias. Um outro fenômeno que pode ocorrer nas tubulações em uso é a deposição progressiva de substâncias contidas na água, com a conseqüente formação de incrustações, que reduzem o diâmetro dos tubos e alteram a sua rugosidade, conforme a Figura 2.1 (Azevedo Netto, 1998).

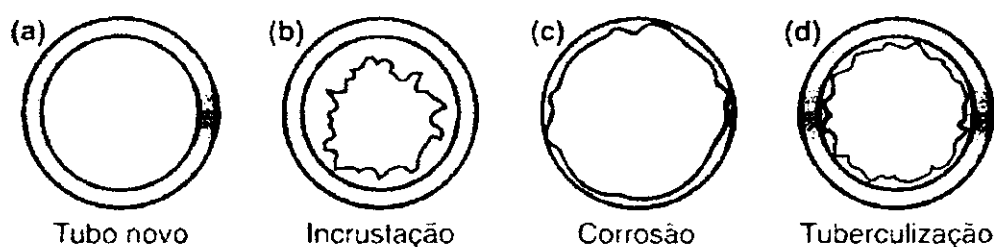


Figura 2.1 – Corrosão e incrustação (Extraída de Azevedo Netto, 1998)

Verifica-se que, com o passar do tempo há uma redução no diâmetro interno das tubulações, principalmente nas de ferro fundido e de aço. A capacidade da tubulação de transportar água vai diminuindo, havendo redução no seu diâmetro e a conseqüente redução da área da sua secção transversal, ocorre o chamado envelhecimento do tubo.

O envelhecimento dos tubos, principalmente os de ferro fundido e de aço, é um fenômeno que acarreta um aumento da rugosidade de suas paredes internas, devido em grande parte a corrosão e as incrustações.

Segundo Azevedo Netto (1998), os tubos não metálicos costumam apresentar capacidade de transporte de água constante ao longo do tempo, desde que não haja o fenômeno da incrustação.

Os tubos de ferro fundido com revestimento interno de argamassa de cimento centrifugado apresentam uma superfície lisa e regular, apresentando valores bastante

reduzidos da rugosidade (são valores muito próximos dos apresentados por tubos de plásticos).

Um dos grandes problemas para os projetistas de redes de distribuição de água é a determinação da rugosidade (ϵ) para as tubulações. Existe uma gama enorme de valores de ϵ dados para os materiais, variando com as características, composição, de fabricante para fabricante, isto para os materiais novos. Mais complicada ainda é a determinação da variação da rugosidade com o tempo, devido as alterações na superfície da parede interna da tubulação.

A tabela 2.1, extraída de Azevedo Netto (1998), apresenta valores da rugosidade absoluta (ϵ) para vários materiais utilizados em projetos de redes de distribuição de água (são valores médios indicativos de rugosidades equivalentes), para tubos novos e velhos.

Tabela 2.1- Valores da rugosidade absoluta (ϵ), em metros*

(Extraída de Azevedo Netto, 1998)

Material	Tubos novos	Tubos velhos
Aço galvanizado	0,00015 a 0,00020	0,0046
Aço rebitado	0,0010 a 0,0030	0,0060
Aço revestido	0,0004	0,0005 a 0,0012
Aço soldado	0,00004 a 0,00006	0,0024
Chumbo	lisos	lisos
Cimento-amianto	0,000025	
Cobre ou latão	lisos	lisos
Concreto bem acabado	0,0003 a 0,0010	
Concreto ordinário	0,0010 a 0,0020	
Ferro forjado	0,0004 a 0,0006	0,0024
Ferro fundido	0,00025 a 0,00050	0,0030 a 0,0050
Ferro fundido com revestimento asfáltico	0,00012	0,0021
Madeira em aduelas	0,0002 a 0,0010	
Manilhas cerâmicas	0,0006	
Vidro	lisos***	lisos***
Plástico	lisos	lisos

* Para tubos lisos, o valor de ϵ é 0,00001 ou menos

** Dados indicados por R. W. Powell

*** Correspondem aos maiores valores de D/ϵ

Estudos de Colebrook e White (1935) sugeriram que o aumento da rugosidade com o passar do tempo teria uma variação aproximadamente linear.

Streeter (1971), *apud* Sharp & Walski (1998), efetuou pequenas modificações na equação sugerida por Colebrook e White (1935) e apresentou a seguinte fórmula para o

cálculo da variação linear da rugosidade com o tempo, para tubos de ferro fundido:

$$\varepsilon_t = \varepsilon_o + \alpha t \quad (2.2)$$

sendo:

ε_t – altura da rugosidade no tubo após t anos, em mm;

ε_o – altura da rugosidade no tubo novo, no tempo zero, em mm;

α – taxa de crescimento das asperezas ou coeficiente de crescimento da rugosidade, em mm/ano;

t – tempo, em ano.

A rugosidade inicial (ε_o) depende do tipo de material da tubulação (geralmente é fornecida pelo fabricante da tubulação), na falta deste dado, Sharp & Walski (1998) sugeriram, para tubos metálicos novos, que se adotasse 0,18 mm, valor que eles consideraram bastante razoável.

O coeficiente de crescimento da rugosidade (α) pode ser determinado através de vários métodos que levam em consideração a qualidade da água a ser conduzida pela tubulação. Colebrook e White (1937) apresentaram a seguinte fórmula:

$$\alpha = 2,54 \exp.(1,9 - 0,5\text{pH}) \quad (2.3)$$

sendo:

α em mm/ano;

pH – pH da água, adimensional.

O intervalo de variação do coeficiente de crescimento da rugosidade calculado pela equação 2.3, segundo Colebrook e White, é de 0,066 mm/ano a 0,63 mm/ano.

De acordo com a experiência de projetistas ingleses, o envelhecimento dos tubos de ferro fundido pode ser estimado para as condições médias através da expressão (Netto, 1998):

$$\alpha = 10^{(3,3 - 0,5\text{pH})} \quad (2.4)$$

$$\alpha = 10^{(3,3 - 0,5\text{pH})} \quad (2.4)$$

No entanto, segundo Sharp & Waski (1988), foi Lamont quem apresentou a mais completa relação de dados sobre o crescimento da rugosidade nas tubulações, tendo também uma orientação mais racional sobre os efeitos da água na rugosidade.

Lamont relacionou o Índice de Saturação de Langelier ou simplesmente Índice de Langelier (índice usado com indicador da saturação da água com relação ao carbonato de cálcio), com o coeficiente de crescimento da rugosidade, através da seguinte fórmula:

$$\alpha = 3,05 \times 10^{-(2,08 + 0,28/IL)} \quad (2.5)$$

sendo:

IL - Índice de Langelier, adimensional.

A equação 2.5 é válida apenas para valores de IL menores que zero, não podendo ser aplicada para água com IL positivo ou com outros problemas pós-precipitação.

Sharp & Walski (1988), apresentaram alguns valores do coeficiente de crescimento da rugosidade em função do Índice de Langelier, conforme a Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Coeficiente de crescimento da rugosidade, para vários tipos de água.
(Extraída de Sharp e Walski, 1988)

Descrição	Coeficiente de crescimento (mm/ano)	Índice de Saturação de Langelier
Ataque leve	0,025	0,0
Ataque moderado	0,076	-1,3
Ataque apreciável	0,250	-2,6
Ataque severo	0,760	-3,9

As equações 2.3, 2.4 e 2.5 mostram a importância do pH e do IL da água na determinação do coeficiente α .

2.2 - PRECIPITAÇÕES DE CaCO_3 DA ÁGUA (INCRUSTAÇÕES)

A água distribuída para consumo às comunidades contém quantidades de carbonato de cálcio (CaCO_3) que podem ser dissolvidas ou precipitadas nas tubulações. Diz-se que a água pode estar sub-saturada, supersaturada ou saturada, em relação à

precipitar o carbonato de cálcio; águas sub-saturadas tendem a dissolver o CaCO_3 e águas saturadas não têm tendências para precipitar nem para dissolver o CaCO_3 .

O CaCO_3 precipitado nas paredes das tubulações pode se acumular de tal forma que cause uma redução no diâmetro do tubo, são as chamadas **incrustações**.

Segundo a American Public Health Association (1995), existem índices, chamados de Índices de Saturação de carbonato de cálcio, que são usados para se estimar as tendências da água precipitar ou dissolver o CaCO_3 . Dentre os índices existentes, o mais usado é o Índice de Saturação de Langelier ou simplesmente Índice de Langelier (IL). Também podem ser usados diagramas, como o Diagrama Modificado de Caldwell-Lawrence.

2.3 - PERDAS DE CARGA

As perdas de carga podem ocorrer nas tubulações e nos acessórios como válvulas, registros, curvas, derivações, bombas e conexões.

Um dos problemas de hidráulica que tem merecido grande atenção dos estudiosos (engenheiros e pesquisadores) é o que trata das perdas de carga ao longo das canalizações. Até o presente têm sido grandes as dificuldades de se chegar a uma solução analítica definitiva do problema, o que tem levado os pesquisadores a adotarem e aperfeiçoarem as várias soluções obtidas através de investigações experimentais, tendo-se chegado a um grande número de fórmulas experimentais, desde a primeira apresentada por Chézy (1775).

As perdas nos acessórios (perdas localizadas) podem ser calculadas por meio de fórmulas ou através do “método dos comprimentos equivalentes”, onde à tubulação é adicionado um “comprimento equivalente” à perda de carga que causaria cada acessório.

Dentre as várias fórmulas existentes para o cálculo das perdas de carga nas tubulações, neste trabalho foram empregadas as de Darcy-Weisbach e de Hazen-Williams, por serem as que melhor se adaptaram às aplicações práticas, sendo as mais usadas atualmente por pesquisadores e engenheiros.

2.3.1 – Fórmula de Darcy-Weisbach (Fórmula Universal)

A fórmula de Darcy-Weisbach pode ser apresentada na forma:

$$h_f = 0,0827 f L \frac{Q^2}{D^5} \quad (2.6)$$

sendo:

h_f – perda de carga, em m;

f – coeficiente de atrito, adimensional;

L – comprimento da tubulação, em m;

D – diâmetro da tubulação, em m;

Q – vazão (m^3/s).

2.3.1.1 - Valores do Coeficiente de Atrito

- Escoamento laminar

No escoamento laminar o coeficiente de atrito não depende da rugosidade interna da tubulação, só dependendo do número de Reynolds:

$$f = \frac{64}{R_e} \quad (2.7)$$

sendo:

R_e – número de Reynolds de diâmetro.

A equação 2.7 é válida para $R_e < 2000$.

- Escoamento turbulento em tubos lisos

Para escoamentos turbulentos em tubos lisos, o coeficiente de atrito pode ser determinado pela fórmula experimental de Theodore von Kármán (1930):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log(R_e \sqrt{f}) - 0,8 \quad (2.8)$$

Esta equação é válida para: $R_e \sqrt{f} \frac{\varepsilon}{D} < 14,14$

- Escoamento turbulento em tubos rugosos

No caso de escoamento turbulento em tubos rugosos funcionando na zona de turbulência completa, o efeito do atrito é muito influenciado pelo tamanho e configuração da aspereza da parede interna da tubulação, tendo Nikuradse encontrado a seguinte fórmula experimental:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log \frac{D}{2\varepsilon} + 1,74 \quad (2.9)$$

Esta equação é válida para: $Re \sqrt{f} \frac{\varepsilon}{D} > 198$

- Escoamento turbulento hidraulicamente de transição

No caso de escoamento turbulento na região de transição compreendida entre os escoamentos hidraulicamente liso e rugoso, Colebrook e White (1938) apresentaram a equação semi-empírica seguinte:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon / D}{3,71} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (2.10)$$

Esta equação é indicada para a faixa de transição entre os escoamentos turbulentos, liso e rugoso, sendo válida, segundo Porto (1998) para números de Reynolds de rugosidade no intervalo:

$$14,14 < Re \sqrt{f} \frac{\varepsilon}{D} < 198$$

A equação de Colebrook e White (equação 2.10) foi representada através de diagramas por Rouse, Moody e Stanton.

A equação 2.10 não permite a determinação direta do valor de f , podendo o cálculo ser feito por processos iterativos, o que causa dificuldades para ser empregada diretamente nos cálculos computacionais. Segundo Sharp e Walski (1988), como alternativa pode ser usada uma forma simplificada da fórmula de Colebrook e White

(equação 2.9), atribuída a von Kármán e Prandl e aplicável a escoamentos totalmente rugosos, seguinte:

$$f = [1,14 - 2 \log(\varepsilon/D)]^{-2} \quad (2.11)$$

Swamee-Jain (1976), *apud* Porto (1998), apresentaram a fórmula explícita e aproximada para o cálculo do coeficiente de atrito, em escoamentos turbulento liso, de transição e rugoso, seguinte:

$$f = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{\varepsilon/D}{3,7} + \frac{5,74}{R_e^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (2.12a)$$

$$\text{ou, } f = 0,25 \{ \log[(0,27\varepsilon/D) + (5,74/R_e^{0,9})] \}^{-2} \quad (2.12b)$$

Válida para: $5 \times 10^3 \leq R_e \leq 10^8$

Segundo Vianna (1997), Churchill apresentou uma fórmula para o cálculo do coeficiente de atrito para escoamentos em condutos, que tem apresentado bons resultados:

$$f = 8 \left[\left(\frac{8}{R_e} \right)^{12} + \frac{1}{(A+B)^{3/2}} \right]^{\frac{1}{12}} \quad (2.13)$$

sendo:

$$A = \left[2,457 \ln \frac{1}{\left(\frac{7}{R_e} \right)^{0,9} + \frac{0,27\varepsilon}{D}} \right]^{16}$$

$$B = \left(\frac{37530}{R_e} \right)^{16}$$

Swamee (1993), *apud* Porto (1998), apresentou uma equação geral para o cálculo do fator de atrito, que é válida para escoamentos laminar e turbulento (liso, de transição e rugoso), na forma:

$$f = \left\{ \left(\frac{64}{R_e} \right)^8 + 9,5 \left[\ln \left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{R_e^{0,9}} \right) - \left(\frac{2500}{R_e} \right)^6 \right]^{-16} \right\}^{0,125} \quad (2.14)$$

A tabela 2.3, extraída de Azevedo Netto (1998), apresenta os valores do coeficiente de atrito da fórmula de Darcy-Weisbach para tubos novos de ferro fundido e de aço, em função da velocidade de escoamento da água ao longo da tubulação.

Tabela 2.3 - Valores de f na fórmula de Darcy-Weisbach, para tubos novos de ferro fundido e de aço (extraída de Azevedo Netto, 1998)

Diâmetro nominal (mm)	Velocidade média em m/s							
	0,20	0,40	0,60	0,80	1,00	1,50	2,00	3,00
13	0,041	0,037	0,034	0,032	0,031	0,029	0,028	0,027
19	0,040	0,036	0,033	0,031	0,030	0,028	0,027	0,026
25	0,039	0,034	0,032	0,030	0,029	0,027	0,026	0,025
38	0,037	0,033	0,031	0,029	0,029	0,027	0,026	0,025
50	0,035	0,032	0,030	0,028	0,027	0,026	0,026	0,024
75	0,034	0,031	0,029	0,027	0,026	0,025	0,025	0,024
100	0,033	0,030	0,028	0,026	0,026	0,025	0,025	0,023
150	0,031	0,028	0,026	0,025	0,025	0,024	0,024	0,022
200	0,030	0,027	0,025	0,024	0,024	0,023	0,023	0,021
250	0,028	0,026	0,024	0,023	0,023	0,022	0,022	0,020
300	0,027	0,025	0,023	0,022	0,022	0,021	0,021	0,019
350	0,026	0,024	0,022	0,022	0,022	0,021	0,021	0,018
400	0,024	0,023	0,022	0,021	0,021	0,020	0,020	0,018
450	0,024	0,022	0,021	0,020	0,020	0,020	0,020	0,017
500	0,023	0,022	0,020	0,020	0,019	0,019	0,019	0,017
550	0,023	0,021	0,019	0,019	0,018	0,018	0,018	0,016
600	0,022	0,020	0,019	0,018	0,018	0,017	0,017	0,015

2.3.2 - Fórmula de Hazen-Williams

A fórmula de Hazen-Williams, para o cálculo das perdas de carga, pode ser apresentada na forma:

$$h_f = 10,65 \frac{L}{D^{4,87}} \left(\frac{Q}{C} \right)^{1,852} \quad (2.15)$$

sendo:

C – coeficiente de rugosidade ou de Hazen-Williams.

A fórmula de Hazen-Williams pode ser aplicada para condutos de qualquer tipo e material, com diâmetros entre 50 e 3500 mm e velocidade máxima de 3 m/s, segundo Azevedo Netto (1998). No Quadro 2.1, extraído de Azevedo Netto (1998), encontram-se valores do coeficiente C da fórmula de Hazen-Williams para tubos novos e usados com ± 10 e ± 20 anos.

Quadro 2.1 - Valor do coeficiente C para a fórmula de Hazen-Williams

(Extraído de Azevedo Netto, 1998)

Tubos	Novos	Usados ± 10 anos	Usados ± 20 anos
Aço corrugado (chapa ondulada)	60	–	–
Aço galvanizado roscado	125	100	–
Aço rebitado, novos	110	90	80
Aço soldado comum (revestimento betuminoso)	125	110	90
Aço soldado com revestimento epóxico	140	130	115
Chumbo	130	120	120
Cimento-amianto	140	130	120
Cobre	140	135	130
Concreto, bom acabamento	130	–	–
Concreto, acabamento comum	130	120	110
Ferro fundido, revestimento epóxico	140	130	120
Ferro fundido, revestimento de argamassa de cimento	130	120	105
Grés cerâmico, vidrado (manilhas)	110	110	110
Latão	130	130	130
Madeira, em aduelas	120	120	110
Tijolos, condutos bem executados	100	95	90
Vidro	140	–	–
Plástico (PVC)	140	135	130

Obs.: o engenheiro projetista ao adotar um coeficiente C deve se precaver contra valores acima daqueles aqui indicados, mesmo que indicado nos catálogos dos fabricantes de tubulações. Ocorre que os valores indicados nos catálogos são normalmente obtidos em condições de laboratório e na prática influenciam também outros fatores, tais como o efeito das juntas, falta de alinhamento na montagem, irregularidades ou recalques no terreno, qualidade da água, etc.

2.4 - DETERMINAÇÃO DA DEMANDA DE ÁGUA DO PROJETO

2.4.1 - Preliminares

Um sistema de abastecimento de água tem por finalidade distribuir água suficiente para atender à demanda de determinada comunidade. Nos primeiros anos da instalação do sistema ele tem condições de fornecer água em volume superior ao que é consumido, no entanto, com o passar do tempo, há o aumento da população e, conseqüentemente, o aumento do consumo, chegando-se a uma situação em que a demanda se iguala à capacidade máxima de adução, tendo, portanto, o sistema atingido seu limite de eficiência.

Projeta-se um sistema de abastecimento de água para atender à comunidade durante um certo período, chamado de **alcance do projeto**, que varia entre 10 e 40 anos.

Pode acontecer de a comunidade abastecida ter a sua demanda aumentada de forma inesperada, devido a fatores imprevisíveis como um aumento da população além do previsto, a instalação de uma grande indústria com alto consumo de água, etc. Nestes casos, a demanda prevista no projeto é atingida antes do seu alcance, no entanto estas são situações atípicas, que devem ser resolvidas pelos órgãos competentes responsáveis pelo abastecimento da comunidade, à medida que surjam.

Um sistema de abastecimento de água para uma comunidade deve ser projetado de modo a ter condições de atender à demanda dessa comunidade durante todo o período do alcance do projeto. Para isto é necessário que seja feito um estudo prévio dos parâmetros básicos para a determinação da quantidade de água requerida pelo sistema (demanda). Os seguintes parâmetros devem ser estudados, segundo Gomes (2002):

- previsão da população;
- estimativa dos consumos de água;
- estimativa das perdas de água;
- variação dos consumos de água.

2.4.2 - Previsão da População

A previsão da população futura de uma comunidade a ser abastecida deve ser feita de forma criteriosa, baseada em fatores econômicos, sociais e políticos.

Para a determinação do crescimento populacional de determinada comunidade são empregados métodos de estimativa baseados em dados estatísticos de desenvolvimento demográfico disponíveis à época da elaboração do projeto. Estabelece-se uma função ou um modelo matemático que se ajuste à variação da população ao longo dos anos de registro de dados e estima-se a população futura para o horizonte de alcance do plano (Gomes, 2002).

A projeção da população de uma comunidade após um certo período t_0 a t pode ser feita através da **equação compensadora** ou **equação de equilíbrio populacional**, seguinte:

$$P_t = P_{t_0} + N_t - M_t + I_t - E_t \quad (2.16)$$

sendo:

t_0 – data inicial do período;

t – data final do período;

P_t – população na data t ;

P_{t_0} – população na data t_0 ;

N_t – nascimentos ocorridos no período t_0, t ;

M_t – óbitos ocorridos no período t_0, t ;

I_t – imigrantes no período t_0, t ;

E_t – emigrantes no período t_0, t .

Existem vários métodos de cálculo do crescimento populacional de uma comunidade, destacando-se os seguintes:

- Métodos gráficos:

processo do prolongamento da curva de crescimento;

processo das curvas de crescimento de outras cidades.

- Métodos matemáticos:

método aritmético;

método geométrico;

método do ajustamento linear;
método baseado na equação da curva de potência;
método baseado na equação exponencial;
método baseado na equação logarítmica;
método das componentes demográficas;
método de tendência de crescimento demográfico.

Verifica-se, na prática, que essa variedade de métodos conduz a uma grande variação nos valores obtidos para a previsão de uma população, o que, segundo Gomes (2002), indica a magnitude das incertezas envolvidas e, assim, oferece melhor orientação para a escolha criteriosa dos valores a serem adotados.

- Processo do prolongamento da curva de crescimento

Segundo Dacach (1975), num sistema de eixos ortogonais marcam-se nas abscissas os anos para os quais se dispõe de valores populacionais e estes nos eixos das ordenadas, marcam-se os diversos pontos correspondentes aos pares de valores ano-população, pelos quais faz-se passar uma curva. Esta curva caracteriza o desenvolvimento populacional da cidade no período considerado. Prolonga-se essa curva em observância a sua tendência natural de crescimento, daí tira-se a população para um determinado ano.

- Processo das curvas de crescimento de outras cidades

É um processo comparativo que procura exprimir o crescimento de uma cidade em função do crescimento de outras, que devem ter características análogas e possuir população superior à da cidade em estudo, supondo-se que esta deve desenvolver-se de forma semelhante ao que as outras tiveram quando possuíam população de mesma grandeza que a sua atual.

- Método aritmético

No método aritmético se pressupõe que a variação da população da cidade ocorreu segundo uma progressão aritmética.

Sendo conhecidas as populações P_1 e P_2 correspondentes aos anos t_1 e t_2 , calcula-se a razão de crescimento (r) por:

$$r = \frac{P_2 - P_1}{t_2 - t_1}$$

Sendo P_0 a população inicial, a previsão de população P para uma data futura t anos após, será:

$$P = P_0 + r (t - t_0) \quad (2.17)$$

- Método geométrico

O método geométrico admite que nos últimos anos a variação da população da cidade ocorreu segundo uma progressão geométrica e que nos próximos anos se processará segundo a mesma progressão geométrica, tem-se:

$$P = P_0 q^{(t-t_0)} \quad (2.18)$$

sendo:

$$q = \sqrt[t_2 - t_1]{\frac{P_2}{P_1}}$$

- Método do ajustamento linear

No método do ajustamento linear, a variação da população de uma cidade se processa por uma equação matemática de primeira ordem, da forma:

$$P = a + bx \quad (2.19)$$

sendo:

P – população estimada;

a, b – parâmetros a serem determinados;

$x = (t - t_0)$ – número de anos.

- Método baseado na equação da curva de potência

Neste método, a variação populacional de uma cidade se processa segundo uma equação de potência dada pela fórmula:

$$P = a x^b \quad (2.20)$$

sendo:

$$a > 0; x > 0 \text{ e } P > 0$$

- Método baseado na equação exponencial

Neste caso, a variação da população é dada pela fórmula:

$$P = ae^{bx} \quad (2.21)$$

sendo:

e – base do logaritmo neperiano;

$$a > 0; P > 0.$$

- Método baseado na equação logarítmica

É um método onde a variação da população é representada por uma equação logarítmica, da seguinte forma:

$$P = a + b.lnx \quad (2.22)$$

sendo:

lnx – logaritmo neperiano de x.

- Método das componentes demográficas

O método das componentes demográficas é utilizado para se realizar estimativas populacionais. Ele incorpora informações sobre tendências de mortalidade, de fecundidade e da migração para a área considerada como um todo (por exemplo o Brasil).

Trata-se de um método onde interagem as variáveis demográficas, sendo, portanto, necessário que se produzam estimativas dos níveis e padrões de cada uma destas componentes.

Conforme Oliveira e Fernandes (1996), *apud* IBGE (2002), esta se constitui na mais delicada etapa do processo como um todo, pois a formulação das hipóteses sobre as perspectivas da fecundidade, da mortalidade, e da migração requer o empreendimento de um esforço cuidadoso no sentido de garantir a coerência entre os parâmetros disponíveis, descritivos das tendências passadas, e aqueles que resultarão da projeção.

O método dos componentes demográficas teve sua origem na “equação compensadora” ou “equação de equilíbrio populacional” (equação 2.16), que relaciona os componentes da dinâmica demográfica que interferem na composição da população futura:

- *fecundidade*: gera entradas de pessoas através dos nascimentos;
- *mortalidade*: produz saídas de pessoas pelos óbitos;
- *migração*: estabelece entradas ou saídas de indivíduos, caso o balanço entre imigrantes e emigrantes seja positivo ou negativo, respectivamente.

Uma característica que o IBGE considerou importante no seu trabalho de estimativas da população brasileira foi a utilização de fontes de dados combinados, como as Estatísticas Vitais por Amostras de Domicílio das décadas de 1970, 1980, e 1990, para derivar níveis e padrões de fecundidade e mortalidade.

- Método de tendência de crescimento demográfico

Segundo Madeira e Simões (1972): o Método de Tendência de Crescimento Demográfico tem como princípio fundamental a subdivisão de um área maior, cuja estimativa já se conhece, em “n” áreas menores, de tal forma que seja assegurada ao final das estimativas das áreas menores a reprodução da estimativa, pré-conhecida, da área maior, através da soma das estimativas das áreas menores.

No Método de Tendência considera-se uma área maior cuja população estimada em um momento “t” é $P(t)$. Subdivide-se a área maior em “n” áreas menores, cuja população de uma determinada área “i”, na época “t” é: $P_i(t)$, sendo $i = 1, 2, 3, \dots, n$. Tem-se:

$$P(t) = \sum_{i=1}^n P_i(t) \quad (2.23)$$

A população da área “i” pode ser, por hipótese, decomposta em dois termos, conforme a equação seguinte:

$$P_i(t) = a_i P(t) + b_i \quad (2.24)$$

sendo:

$a_i P(t)$ – termo que depende do crescimento da população;

a_i – coeficiente de proporcionalidade do incremento da população da área menor “i” em relação ao incremento da área maior;

b_i – coeficiente linear de correção.

Os coeficientes a_i e b_i são determinados utilizando-se o período delimitado por dois Censos Demográficos. Considerem-se as datas t_0 e t_1 dos dois Censos Demográficos, tem-se:

$$P_i(t_0) = a_i P(t_0) + b_i$$

$$P_i(t_1) = a_i P(t_1) + b_i$$

Resolvendo-se este sistema de equações, encontra-se:

$$a_i = \frac{P_i(t_1) - P_i(t_0)}{P(t_1) - P(t_0)} \quad (2.25)$$

$$b_i = P_i(t_0) - a_i P(t_0) \quad (2.26)$$

Segundo o IBGE (2002), deve-se considerar:

- . época t_0 : 01 de setembro de 1991, Censo Demográfico de 1991, Tabela A.1;
- . época t_1 : 01 de agosto do ano 2000, Censo Demográfico de 2000, Tabela A.2;
- . época t : 01 de julho do ano t (ano estimado).

Na Tabela A.1 do Anexo A, encontram-se os resultados do Censo Demográfico do ano de 1991, realizado pelo IBGE, e na Tabela A.2 do Censo Demográfico de 2000. Na Tabela A.3 do Anexo A, encontram-se as estimativas das populações residentes, em primeiro de julho de 2001 e 2002, segundo o Brasil, Grandes Regiões e Unidades da Federação.

Este foi o método adotado pelo IBGE para o censo de 2000, juntamente com o método das componentes demográficas.

2.4.3 - Consumos de água

Segundo Gomes (2002), o consumo de água de uma população varia de região para região, de cidade para cidade e dentro de uma mesma cidade pode variar muito de um setor de distribuição para outro. Vários fatores têm influência no consumo de água de uma cidade, tais como: clima, padrão de vida, hábitos da população, qualidade da água fornecida, custo da água, pressão na rede de distribuição, extensão do serviço de esgotos, etc. A água distribuída às comunidades através dos sistemas de abastecimento deve atender às necessidades domésticas e públicas, comerciais e industriais, podendo ser classificada nas seguintes classes de consumo ou de destino: uso doméstico, uso comercial, uso industrial, uso público, e perdas e fugas.

a) Água para uso doméstico

É toda água consumida nas habitações, através dos usos destinados a: asseio corporal, cozinha, bebida, descarga das bacias sanitárias, lavagem de roupas, rega de jardins e quintais, lavagem de automóveis e limpeza geral. Esses consumos domésticos variam com o nível de vida da população, sendo que níveis de vida mais elevados apresentam consumos maiores. Atualmente o consumo diário recomendado varia entre 100 – 200 l/hab.dia.

b) Água para uso comercial

É a água consumida por restaurantes, bares, hotéis, lojas, postos de gasolina e garagens. O consumo de água para uso comercial é bem maior que para uso doméstico. No

Quadro 2.2 (extraído de Gomes, 2002), encontra-se uma estimativa média dos consumos comerciais.

c) Água para uso industrial

O consumo relativo ao uso industrial da água é aquele das indústrias que utilizam a água como matéria em processos industriais, em lavagens e refrigeração. São consumos mais elevados do que os domésticos e os comerciais.

No Quadro 2.2 encontram-se estimativas médias dos consumos industriais.

Quadro 2.2 – Estimativa média dos consumos comerciais e industriais.
(Extraído de Gomes, 2002)

Natureza	Consumo
Escritórios comerciais	50 l/pessoa/dia
Restaurantes	25 l/refeição
Hotéis, pensões	10 l/hóspede/dia
Lavanderias	30 l/kg/roupa
Hospitais	250 l/leito/dia
Garagens	50 l/automóvel/dia
Postos de serviços para veículos	150 l/veículo/dia
Indústrias (uso sanitário)	70 l/operário/dia
Matadouros – animais de grande porte	300 l/cabeça abatida
Matadouros – animais de pequeno porte	150 l/cabeça abatida
Laticínios	1 - 5 l/kg de produto
Curtumes	50 - 60 l/kg de couro
Fábrica de papel	100 - 400 l/kg de papel
Tecelagem (sem alvejamento)	10 - 20 l/kg de tecido
Laminação do aço	85 l/kg de aço
Indústria têxtil	1000 l/kg de tecido
Saboarias	2 l/kg de sabão
Usinas de açúcar	75 l/kg de sabão
Fábrica de conservas	20 l/kg de conserva
Cervejarias	20 l/litro de cerveja

Na tabela 2.5 é apresentada uma relação dos consumos diários em litros, para vários tipos de usos e de usuários. Esta tabela foi extraída de Tomaz (2000).

Tabela 2.4 – Consumos médios diários, em litros.

(Extraída de Tomaz, 2000)

Usos e Usuários	Consumo
Aeroportos, por passageiros	12
Alojamentos provisórios, por pessoa	80
Bares, por m ²	40
Camping, por freqüentador	70 a 100
Canteiros de obras, por operário	60 a 100
Centro de convenções, por assento	8
Cinemas, por lugar	2 a 10
Comércio, por m ²	1 a 3
Creches, por criança	60 a 80
Distritos industriais, por m ²	4 a 8
Escolas, por aluno (de um turno)	10 a 30
Escritórios, por ocupante efetivo	30 a 50
Escritórios, por m ²	10
Estabelecimentos comerciais, por m ²	6 a 10
Estação ferroviária e rodoviária, por passageiro	15 a 40
Hospital, por leito	300 a 600
Hotéis, por hóspede	250 a 500
Igrejas e templos, por freqüentador	2
Indústrias, para fins higiênicos, por operário	50 a 70
Irrigação de áreas, por hectares (l/s)	1 a 2
Irrigação de áreas, por sprinkler (l/h)	300
Jardins, rega com mangueira (l/s)	300 a 600
Lavagem de pátios e calçadas, por m ²	1 a 2
Lava rápido automático, de carros, por veículo	250
Lavanderias, por Kg de roupa	1 a 2
Lojas, por m ²	6 a 10
Lanchonete, por assento	4 a 8
Matadouros, por cabeça grande abatida	300
Matadouros, por cabeça pequena abatida	150
Mercados, por m ²	5 a 10
Motéis, por apartamento	300 a 600
Parques e áreas verdes, por m ²	2
Piscinas públicas, por usuário	30 a 50
Piscinas públicas, por m ²	500
Quartéis, por soldado	100 a 200
Residência, por dormitório	200 a 400
Restaurantes nas rodovias, por assento	75 a 250
Restaurantes urbanos, por refeição servida	20 a 30
Restaurantes urbanos, por assento	80 a 120
Teatros, por assento	5 a 10
Templos religiosos, por freqüentador	2

d) Água para uso público

É a água utilizada na limpeza de logradouros públicos, irrigação de jardins públicos, fontes e bebedouros públicos, edifícios e sanitários públicos, recreação e piscinas públicas.

- Perdas de água

Nas redes de distribuição de água ocorrem perdas devido a vários fatores. As perdas em um sistema de abastecimento de água podem ocorrer desde a barragem até o usuário final. Segundo Coelho (2001), as perdas podem ocorrer nas seguintes partes de um sistema de abastecimento de água:

- perdas no manancial (barragem);
- perdas na adução;
- perdas na Estação de Tratamento de Água (ETA);
- perdas na reservação;
- perdas na distribuição;
- perdas nos usuários finais.

As perdas em um sistema de abastecimento podem se classificadas em: perdas físicas (ocorrem em todo o sistema de abastecimento) e perdas não físicas (correspondem ao volume de água que é consumido e que é não é medido).

2.4.4 - Vazões de Projeto

Na elaboração do projeto de um sistema de abastecimento de água, há a necessidade de se definir a “vazão máxima de projeto”, tendo em vista que o mesmo deve ser dimensionado para as condições mais desfavoráveis.

Para se determinar a vazão máxima de projeto, também denominada vazão nominal, além da população que será abastecida, deve-se conhecer o consumo per capita, a variação do consumo, a vazão média anual, a vazão dos dias de maior consumo, e na hora de maior demanda e a variação espacial da demanda.

- Consumo per Capita

O consumo per capita é a quantidade de água usada por dia, em média, por habitante. É expresso em litros/habitante.dia. Representa o consumo médio diário de água de um habitante para a realização de todas as suas atividades em um dia. O consumo per capita no Brasil, em cidades com sistemas de abastecimento, é de 100 a 200 litros, sendo que nas capitais este valor é ultrapassado, em São Paulo (capital) em 1990 foi de 300 litros.

Vários fatores afetam o consumo de água nas comunidades: tamanho da cidade e suas características, tipo e quantidade de indústrias, o clima, hábitos higiênicos, destino dos dejetos, etc. O consumo per capita é muito influenciado pelo nível econômico das populações, as que dispõem de mais recursos têm consumos mais elevados. O consumo médio per capita é utilizado na avaliação da demanda hídrica, para o consumo humano.

Atualmente existem outros processos para se determinar o consumo de água, que diferem do **consumo per capita** tradicionalmente conhecido. Billings & Agthe (1988), sugerem um modelo para a determinação da demanda mensal que considera o efeito de vários fatores, tais como: temperatura, precipitação, preço da água e renda mensal per capita. Já Dziegielewski & Boland (1989), sugeriram que a determinação da demanda depende também de fatores individuais em cada grupo de usuários da água. Por exemplo, no setor residencial os fatores que afetam a intensidade do uso de água devem incluir: renda (que mede a capacidade do consumidor de pagar pela água), comportamento conservador (que reflete a boa vontade ou não do consumidor para substituir inconveniências e aceitar inovações tecnológicas para a água), preço (que determina a quantidade de água que o consumidor está em condições de pagar). Segundo estes autores, uma previsão aproximada que divide o uso urbano da água em um grande número de categorias e considera os fatores que determinam a necessidade e a intensidade do uso da água em cada categoria foi incorporada em um modelo computadorizado chamado IWR-MAIN (Institute for Water Resources-Municipal And Industrial Needs), desenvolvido em 1969 pela Hittman Associates, Inc.

- Variação de Consumo

Em uma cidade abastecida por um sistema público de abastecimento de água, a quantidade de água consumida varia continuamente em função do tempo, das condições

climáticas, dos hábitos da população, etc. Estas variações podem ser classificadas em anuais, mensais, diárias, horárias e instantâneas.

variação anual: devido ao aumento da população e do consumo per capita, o consumo anual de água tende a crescer com o passar do tempo;

variação mensal: durante o ano há alguns meses em que o consumo supera a média anual e outros em que o consumo é menor;

variação diária no ano: durante o dia a vazão varia continuamente e atinge valores máximos em torno do meio dia. Há dias em que o consumo diário de água numa cidade supera o consumo médio anual, estes dias ocorrem mais no verão;

variação horária: o consumo de água varia, também, continuamente ao longo do dia, sendo que o maior consumo ocorre em torno do meio dia e os menores nas primeiras horas da madrugada;

variação instantânea: ocorre nos extremos da rede devido a abertura e fechamento simultâneo de torneiras e aparelhos sanitários.

Tendo em vista essas variações de consumo citadas, há a necessidade de se estabelecerem parâmetros que as representem, quando do dimensionamento das várias unidades de um sistema público de abastecimento. Definem-se, então, os seguintes coeficientes:

coeficiente do dia de maior consumo (k_1): é a relação entre o consumo máximo diário ocorrido em um ano e o consumo médio diário desse ano. Os valores de k_1 recomendáveis para projeto variam de 1,1 a 1,4;

coeficiente da hora de maior consumo (k_2): é a relação entre a maior vazão horária e a vazão média do dia de maior consumo. Os valores de k_2 recomendáveis para projeto variam de 1,5 a 2,3. Nos projetos de redes de abastecimento urbano, normalmente adota-se 1,5;

coeficiente de reforço (K): é o produto do coeficiente do dia de maior consumo (k_1) e o coeficiente da hora de maior consumo (k_2), tem-se:

$$K = k_1 \times k_2 \quad (2.27)$$

- Vazão média anual

A vazão média anual é dada pela fórmula:

$$Q = \frac{Pq}{86.400} \quad (2.28)$$

sendo:

Q – vazão média anual (l/s);

P – população a ser abastecida considerada no projeto (habitante);

q – taxa de consumo per capita (l/hab.dia);

- Vazão dos dias de maior consumo

A vazão dos dias de maior consumo (vazão máxima diária) é calculada pela fórmula:

$$Q_1 = \frac{Pk_1q}{86.400} \quad (2.29)$$

sendo:

Q₁ – vazão dos dias de maior consumo, em l/s;

- Vazão dos dias de maior consumo e na hora de maior demanda

Esta vazão é dada pela fórmula:

$$Q_2 = \frac{Pk_1k_2q}{86.400} \quad (2.30)$$

sendo:

Q₂ – vazão dos dias de maior consumo e na hora de maior demanda, em l/s;

A aplicação desses coeficientes de variação no dimensionamento das partes de um sistema de abastecimento de água se dá de acordo com a Fig 2.2 (extraída de Azevedo Netto, 1998).

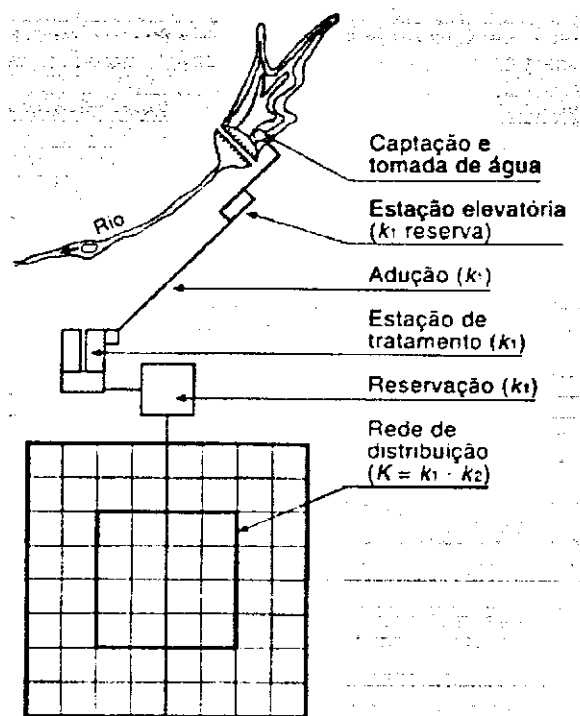


Figura 2.2 – Coeficientes de variação no dimensionamento das partes do sistema.
(Extraída de Azevedo Netto, 1998)

- Variação Espacial da Demanda

Nas grandes cidades as demandas de água nos sistemas de abastecimento variam espacialmente, havendo zonas (bairros) com demanda maior do que a média e também zonas com consumo menor. Nos bairros de classe média o consumo doméstico é maior do que nos bairros menos desenvolvidos, também há diferenças quanto a densidade demográfica destes bairros. Segundo Fernandes (1997), a **densidade demográfica** é definida como sendo a intensidade de ocupação de uma área urbana, geralmente, é expressa em hab./ha. A tendência é que a densidade demográfica apresente valores crescentes das áreas periféricas para as centrais, nas cidades de maiores portes. O conhecimento da densidade demográfica é importante na determinação da vazão necessária a abastecer áreas urbanas, sendo necessário se ter conhecimento de como as populações futuras serão distribuídas sobre as áreas que serão abastecidas pelo projeto. Pode-se, também, calcular a chamada **densidade demográfica linear**, que é a relação entre a

Na determinação das demandas que serão destinadas aos vários pontos de distribuição das redes a serem projetadas, deve-se levar em consideração o consumo diferenciado por área de influência do sistema de abastecimento. Esta demanda será adotada no projeto de setores que serão abastecidos pelos pontos ou nós de distribuição das redes. Têm-se duas formas de calcular esta demanda: pela área de atendimento e por metro de canalização.

As vazões calculadas pela área de atendimento (l/s.ha) são usadas no cálculo dos grandes anéis das redes de distribuição e as vazões calculadas por metro de canalização (l/s.m) são usadas no cálculo das tubulações que abastecem diretamente as ligações domiciliares. Quando se adota a vazão calculada pela área de atendimento, tem-se:

$$Q_{\text{área}} = \frac{qk_1k_2d_A}{86400} \text{ (l/s.ha)} \quad (2.31)$$

sendo:

$Q_{\text{área}}$ – vazão dos dias de maior consumo e na hora de maior demanda por área de atendimento;

d_A – densidade demográfica (hab/ha).

Quando se adota a vazão calculada por metro de canalização, denominada de vazão em marcha, tem-se:

$$Q_{\text{marcha}} = \frac{qk_1k_2d_l}{86400} \text{ (l/s.m)} \quad (2.32)$$

sendo:

Q_{marcha} – vazão do dia de maior consumo e na hora de maior demanda por metro de canalização;

d_l – densidade demográfica linear (hab/m).

2.5 – MATERIAIS EMPREGADOS NAS TUBULAÇÕES

2.5.1 - Tubos de PVC e de Ferro Fundido

No mercado brasileiro encontram-se à disposição dos projetistas, tubulações de diversos materiais, como: ferro dúctil, ferro fundido, ferro forjado, ferro preto, ferro vermelho, latão, aço, aço inoxidável, alumínio, borracha, chumbo, cimento-amianto, cobre, manilhas cerâmicas, plásticos, etc.

Atualmente, os tubos mais usados nos sistemas de distribuição de água são os de plástico (PVC) e os de ferro fundido (FoFo) com revestimento interno.

Para a aplicação em redes de distribuição de água são fabricados tubos de PVC com os seguintes diâmetros nominais: 50, 60, 75, 100, 150, 200, 250, 300 400 e 500 mm.

Os tubos de ferro fundido (FoFo) fabricados no Brasil são classificados em dois tipos: ferro fundido cinzento e ferro fundido dúctil, sendo que atualmente são fabricados apenas tubos do tipo dúctil com junta elástica, revestidos internamente com argamassa de cimento e externamente com pintura betuminosa, com os seguintes diâmetros nominais: 50, 75, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000 e 1200 mm.

Os revestimentos internos dos tubos de ferro fundido têm as funções de garantir a manutenção do desempenho hidráulico da canalização ao longo do tempo, evitar riscos de ataques à parede interna pelas águas transportadas e manter a qualidade da água.

Dependendo do fabricante, podem ser usados revestimentos internos com argamassa de cimento de alto forno ou revestimentos reforçados com cimento aluminoso. Os tubos novos de ferro fundido revestidos têm rugosidade inicial muito pequena e , também, menor variação da rugosidade com o tempo.

2.6 – ANÁLISE ECONÔMICA DOS PROJETOS DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

2.6.1 - Custos Fixos e Custos Variáveis

Os projetos de recursos hídricos são, em sua maioria, financiados por órgãos públicos. Nos países em desenvolvimento, como o Brasil, os recursos disponíveis para financiamento destes projetos são escassos, havendo, portanto, a necessidade de se elaborar

projetos onde se consiga maior eficiência econômica dos recursos. O projeto de um sistema de abastecimento de água envolve custos elevados, desde os **custos fixos** ou de **investimentos** para a sua implantação, até os **custos variáveis** com a operação e manutenção do sistema, que ocorre ao longo do alcance do projeto.

Os custos de investimentos (ou fixos) são os realizados na fase de implantação do projeto com a aquisição dos equipamentos das instalações hidráulicas: tubulações, válvulas, etc., mais os gastos com a instalação do sistema e montagem desses equipamentos. Os custos variáveis são aqueles realizados na operação e manutenção das instalações, que ocorrem durante todo o alcance do projeto e correspondem à conservação das instalações, reparação de avarias nas tubulações, nas peças especiais de controle, reposição de equipamentos, etc. As despesas com operação nos projetos de abastecimento com sistemas de bombeamento são, de maneira predominante, relativas aos gastos com energia das estações elevatórias. Estes gastos com energia chegam, muitas vezes, a ultrapassar os custos de investimento das instalações (Gomes, 2002).

O custo total do projeto é a soma dos custos de investimento com os de operação. Acontece que estes gastos ocorrem em tempos diferentes, devendo-se converter os gastos variáveis em fixos ou os gastos fixos em variáveis, ou seja, converter as despesas anuais de exploração em valores fixos atualizados ou os gastos fixos em anuidades. Escolhendo-se uma dessas formas (a que melhor se adapte às condições do projeto em estudo) faz-se a análise das várias alternativas de projeto e escolhe-se a que apresentar o menor custo total (custos de investimento mais os custos de operação).

Sejam:

VP – valor presente;

E – custo operacional;

I – custo fixo de investimento das instalações do sistema;

A – anuidade;

i – taxa de juro anual, em decimal;

n – número de anos, correspondente ao alcance do projeto;

e – taxa de inflação ou de aumento da energia, em decimal.

Têm-se os seguintes casos, segundo Gomes (2002):

- Converter financeiramente um custo fixo (ou de investimento das instalações), em amortizações anuais do capital:

$$A = VP.a \quad (2.33)$$

sendo:

$$a = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (2.34)$$

a - fator de amortização anual do capital.

- Converter uma série de custos anuais, sujeita a uma taxa de juros (i) e de inflação ou de aumento de energia (e), em um valor fixo atualizado:

$$P = AF_a \quad (2.35)$$

sendo:

$$F_a = \left[\frac{(1+e)^n - (1+i)^n}{(1+e)^n - (1+i)^n} \right] \left[\frac{1}{(1+i)^n} \right] \quad (2.36)$$

F_a – fator de atualização.

- Obter a anuidade equivalente e uniforme (A_E) de um custo operacional (E) sujeito a uma taxa de juros (i) e a uma taxa de inflação ou aumento de energia (e):

$$A_E = EC_a \quad (2.37)$$

sendo:

$$C_a = \left[\frac{(1+e)^n - (1+i)^n}{(1+e)^n - (1+i)^n} \right] \times \left[\frac{i}{(1+i)^n - 1} \right] \quad (2.38)$$

C_a - coeficiente de equivalência.

Uma análise econômica de um projeto de abastecimento de água pode ser feita através da determinação do seu valor presente, do seu valor futuro ou dos pagamentos anuais (correspondentes às despesas de investimentos e de operação). Segundo Gomes (2002), quando os parâmetros do projeto são constantes, têm-se as fórmulas a seguir.

Sejam:

$C_{en.}$ – valor calculado para o custo operacional anual do sistema de abastecimento (relativo à energia de bombeamento);

I – custo fixo de investimento das instalações do sistema (tubulações, acessórios e montagem).

Tem-se:

- O valor presente do custo operacional energético ($P_{en.}$), é :

$$P_{en.} = C_{en.} \cdot F_a \quad (2.39)$$

- O custo operacional energético (E_n) anual equivalente e uniforme é:

$$E_n = C_{en.} \cdot C_a \quad (2.40)$$

- O custo fixo de amortização anual do investimento (A_I) do sistema, é:

$$A_I = I \cdot a \quad (2.41)$$

- O custo fixo anual da energia de bombeamento de água ($C_{en.}$) é calculado por:

$$C_{en.} = P n_b p_o \quad (2.42)$$

sendo:

$$P = \frac{9,81QH}{\eta} \quad (2.43)$$

P – potência requerida do conjunto elevatório (kW);

n_b – número anual de horas de bombeamento;

p_o – preço do kWh;

Q – vazão máxima horária requerida (m^3/s);

η – rendimento global do conjunto elevatório;

H – altura manométrica (m), corresponde à altura geométrica (H_g) mais as perdas de carga (h_f).

As concessionárias de energia elétrica cobram dois tipos de tarifas: uma correspondente a energia realmente consumida, é a tarifa de consumo, e outra que é um valor cobrado mensalmente pela potência instalada, é a tarifa de demanda (é cobrada mesmo que não haja o consumo da energia).

Segundo Tsutiya (2001), os gastos com energia elétrica nas empresas de saneamento básico se constituem em um dos itens mais importantes no orçamento das despesas de exploração, sendo que nos sistemas de distribuição de água, a energia consumida pelas elevatórias representa cerca de 90% do custo total de energia elétrica consumida pelo sistema.

2.7 - MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

2.7.1 - Introdução

Os métodos clássicos usados tradicionalmente no dimensionamento de redes de distribuição de água, como o de Hardy-Cross e o do Seccionamento Fictício, consideram apenas o balanceamento hidráulico da rede, atendendo às condições de conservação de massa nos nós e conservação de energia nos anéis. No entanto, não consideram a busca de uma solução otimizada, que minimize o custo global, que compreende o custo de investimento do sistema (tubulações, equipamentos e instalação), mais as despesas realizadas com a operação e manutenção do sistema.

Essa solução mais econômica global pode ser obtida através da pesquisa operacional, onde para resolver os problemas se lança mão de ferramentas matemáticas que procuram maximizar ou minimizar uma função numérica de uma ou mais variáveis, estando estas sujeitas a certas restrições, são os chamados **problemas de otimização** (Fritzche, 1978, *apud* Melo, 2000).

Segundo Mateus e Luna (1986), *apud* Formiga (1999), o objetivo da otimização é encontrar a melhor solução, entre todas as soluções, em potencial, de um determinado problema. De acordo com Lopes (2002), em um problema de otimização é fundamental o conhecimento das características matemáticas do conjunto das soluções possíveis, delimitado pelas restrições, e do comportamento da função objetivo. Conforme Morgan(1985), *apud* Melo (2000), a pesquisa de metodologias para otimização de redes de distribuição de água tem recebido considerável atenção há aproximadamente 30 anos, com

os primeiros trabalhos realizados por Karmeli *et al.* (1968), Alperovits e Shamir (1977), entre outros. Para Martinez *et al.* (1995), *apud* Lopes, 2002, embora o problema de otimização de redes ramificadas esteja resolvido, o método de solução definitivo que garanta o ótimo global para o caso de redes malhadas não existe ainda. Existem também problemas causados pela existência de certos elementos no sistema, como válvulas, bombas, diâmetros comerciais, etc.

As tubulações disponíveis no comércio têm os seus diâmetros com valores especificados (não variam continuamente) e como se considera um só diâmetro por trecho a ser escolhido entre vários disponíveis, haverá um número elevado de combinações, o que impõe uma grande dificuldade aos modelos de otimização. Esta dificuldade tem sido contornada com a substituição de um diâmetro por dois diâmetros comerciais para cada trecho, desde que sejam preservadas as características hidráulicas do trecho.

Segundo Lopes (2002), Shamir (1974) apresentou uma revisão dos trabalhos existentes até 1974 sobre o problema do dimensionamento, onde os diâmetros são variáveis de decisão e a soma dos custos de implantação e operação é a função objetivo. Os modelos de otimização são baseados em técnicas de gradiente, gradientes aproximados da função objetivo para a sua avaliação em pontos próximos, busca aleatória de diâmetros com penalidades nas restrições, processos iterativos aplicados a redes ramificadas, conceito de diâmetro equivalente, etc. Segundo ainda Lopes (2002), Fujiwara e Khang (1990) desenvolveram um modelo de decomposição do problema em duas fases, seguindo as metodologias de decomposição. Na primeira fase é formulado o problema de minimização não linear convexo com restrições lineares, sendo fixadas as vazões e determinadas as perdas de carga globalmente ótimas; a seguir as vazões são alteradas com base nos gradientes da função objetivo obtidos por multiplicadores de Lagrange e fixadas de modo a se obter novas perdas de carga. Na segunda fase são fixadas as perdas de carga e é formulado um problema de minimização não linear côncavo com restrições lineares, visando a obtenção de vazões globalmente ótimas para essas perdas de carga. As vazões obtidas na segunda fase são usadas para reiniciar a primeira fase e assim sucessivamente. Este método não garante a obtenção do ótimo global, mas permite uma movimentação de um ótimo local para outro melhor. O método foi aplicado à rede da cidade de Nova York e à da cidade de Hanói, tendo sido, segundo os autores, obtidos os melhores resultados disponíveis até então.

Ainda de acordo com Lopes (2002), Costa *et al.* (2001) apresentaram uma formulação do problema de otimização de redes de água, utilizando os conceitos da metodologia de otimização global, tendo obtido melhores resultados em termos de convergência. Por outro lado, Sherali *et al.* (2001) testaram aprimoramentos na relaxação das restrições não lineares e na escolha das variáveis de partição, reduzindo o número de nós enumerados e atingindo ótimos resultados, particularmente em redes de maior porte.

Com o desenvolvimento de várias técnicas numéricas para a solução de problemas através de modelos computacionais houve, nas últimas décadas, uma grande evolução no campo da pesquisa operacional, com a sofisticação dos algoritmos e o desenvolvimento de novas técnicas de otimização. Entre essas técnicas destacam-se: **Enumeração Exaustiva, Programação Linear, Programação Não Linear, Programação Dinâmica e Algoritmo Genético.**

2.7.2 - Técnicas de Enumeração Exaustiva

Segundo Lanna (1997), o procedimento mais imediato de otimização é a utilização de um modelo de simulação para enumerar exaustivamente as alternativas decisórias, de modo a ser possível a identificação do ótimo. Esta enumeração pode ser aleatória ou utilizar técnicas iterativas de otimização. Quando aplicada a projetos de rede de distribuição de água a **técnica de enumeração exaustiva** simula todas as combinações possíveis para os diâmetros comerciais dos tubos e faz a seleção do menor custo da rede de modo que sejam satisfeitas as restrições de pressões nos nós. Uma grande desvantagem desta técnica é que ela envolve um elevado número de cálculos, o que acarreta também uma grande duração de tempo computacional. Devido a este inconveniente, Loubser e Gessler (1990), *apud* Formiga (1999), sugeriram algumas diretrizes para a redução da quantidade de cálculo efetuado pelo computador.

A técnica de Enumeração Exaustiva foi aplicada no Método WADISO (Gessler e Walski, 1985), onde se tenta alcançar a solução de menor custo para um sistema de distribuição de água e também fornecer um grupo de soluções que estão bem próximas da ótima, o que permite ao projetista uma maior flexibilidade e segurança na escolha de uma solução mais viável para o sistema em estudo.

O método WADISO foi empregado por Leal (1995), na otimização de um sistema de distribuição de água na cidade de João Pessoa - PB.

2.7.3 - Programação Linear

Existem diversas técnicas de programação linear que podem ser aplicadas na otimização de sistemas de redes de distribuição de água. Segundo Formiga (1999), dentre essas técnicas, o Gradiente de Programação Linear (GPL), proposto por Alperovits e Shamir (1977), é considerado como o que teve maior avanço. No GPL o problema de otimização é dividido em duas etapas: na primeira etapa algumas variáveis são consideradas fixas e as outras são otimizadas pelo modelo matemático da programação linear; na segunda etapa é utilizada uma técnica de pesquisa para se determinar como as variáveis consideradas fixas na primeira etapa, serão modificadas de forma a melhorar a solução obtida. Repetem-se as duas etapas até que não haja redução nos custos da rede.

Para Barbosa *et al.* (2000), *apud* Santos (2002), no contexto das técnicas de otimização disponíveis, propõe-se a utilização de um modelo que faz uso da Programação Linear com alguns artifícios para contornar o problema da não linearidade, permitindo que as limitações quanto ao emprego da PL nos problemas sejam superadas.

Venturini (1997), segundo Lopes (2002), aplicou a Programação Linear na resolução do problema de operação de redes de distribuição, mostrando a possibilidade de se formular diferentes funções objetivo, como minimizar a vazão bombeada, maximizar o fornecimento em pontos específicos e minimizar a perda de carga em anéis específicos.

2.7.4 - Programação não Linear

Grande parte dos problemas abordados na engenharia (e em vários outros campos de atividade) não apresenta linearidade nas funções matemáticas que representam os processos físicos envolvidos (as equações que representam as funções objetivo e as inequações das restrições são não lineares). Visando resolver problemas deste tipo, de forma a se chegar a uma solução ótima, nas últimas três décadas tem sido usada a Programação Não Linear (PNL). Uma das características da Programação Não Linear é que ela compreende um conjunto de técnicas para a resolução de problemas onde a equação da função objetivo e/ou pelo menos uma das inequações das restrições são expressões não lineares. Segundo Yeh (1985), *apud* Santos (2002), mesmo tendo uma maior complexidade, quando comparada à Programação Linear, a Programação Não Linear

oferece uma formulação matemática mais geral, podendo-se criar ou prover bases através de diversos métodos.

Um grande número de programas computacionais para a solução de problemas de programação não linear está à disposição de engenheiros e pesquisadores. Melo (2000) cita alguns deles: o GAMS (Brooke *et al.* 1988), MINOS (Murtagh and Saunders, 1987), GINO (Liebman *et al.* 1986), etc.

Segundo Formiga (1999), El-Baharawi and Smith (1985) aplicaram o MINOS no dimensionamento de sistemas de coleta e distribuição de água, SU *et al.* (1987) usaram a programação não linear para otimizar redes malhadas, Lansey and Mays (1989) aplicaram a PNL para fazer o dimensionamento ótimo, inclusive do layout, de redes de distribuição de água, e Silva (1997) aplicou a programação não linear na otimização de redes ramificadas, resolvendo o problema em duas etapas: na primeira etapa a cota de cabeceira e os diâmetros contínuos são as variáveis de decisão e na segunda etapa são adotados diâmetros discretos, dentre os comercialmente disponíveis e considera-se a cota de cabeceira e os comprimentos dos trechos como variáveis de decisão.

O Método do Gradiente Reduzido (MGR), desenvolvido por Wolfe (1963), tem a finalidade de resolver um problema de programação não linear com restrições lineares por um método parecido com o Método Simplex da programação linear. Posteriormente, Abadie e Carpentier (1969) generalizaram o método para considerar restrições não lineares.

De acordo com Cirilo (1997), encontra-se disponível na planilha Excel[®] da Microsoft, um sub-programa específico (“macro”) para otimização denominado de Solver.

O Solver do Excel[®] utiliza para programação não linear o algoritmo de otimização GRG2, baseado na técnica dos Gradientes Reduzidos Generalizados, desenvolvida por Lasdon *et al.* (1984).

Segundo Bazaraa (1999), *apud* Melo (2000), o Método do Gradiente Reduzido Generalizado é uma extensão do MGR para manusear restrições não lineares.

Gomes (2002) utilizou o método do Gradiente Reduzido Generalizado (GRG2) através do sub-programa Solver do Excel na otimização de projetos de redes de distribuição de água, tendo apresentado o Método PNL2000. O PNL2000 é um método de dimensionamento econômico de redes malhadas de distribuição, que visa a obtenção da solução que proporcione o custo mínimo global do sistema. Este método, que também pode ser aplicado às redes ramificadas consta de duas etapas: primeira etapa: solução

inicial e segunda etapa: dimensionamento definitivo. Na primeira etapa é feito um pré-dimensionamento do sistema, onde o custo a ser minimizado (função objetivo) é uma função não linear dos diâmetros (variáveis de decisão) e das vazões de cada trecho, mais os custos de operação (energia), submetida às restrições de continuidade nos nós, conservação da energia nos anéis, limites de velocidades, pressões e diâmetros. Na segunda etapa, com os resultados obtidos no pré-dimensionamento, realiza-se um ajuste da solução inicialmente obtida (primeira etapa). O diâmetro teórico (variável contínua) calculado inicialmente, para um determinado trecho, é substituído por dois diâmetros comerciais consecutivos, o imediatamente inferior e o imediatamente superior ao calculado, sendo considerados como incógnitas (variáveis de decisão) os comprimentos de cada sub-trecho, pertencentes ao trecho em questão. O objetivo do método é minimizar o custo total do projeto, que é a soma dos custos de implantação (tubos, peças, etc) e de operação (representado pelo custo da energia de bombeamento).

A figura 2.3, extraída de Gomes (1999) apresenta a variação do custo do sistema de abastecimento com a cota de alimentação e mostra o ponto de custo ótimo total que corresponde à uma cota ótima de alimentação ($Z_{\text{ótimo}}$).

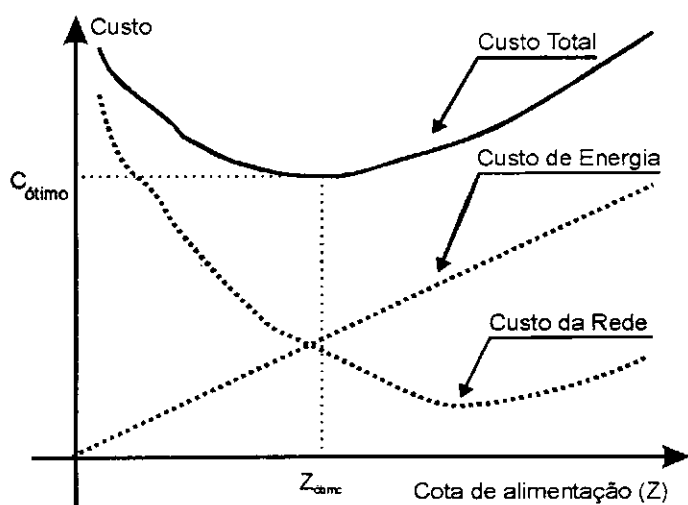


Figura 2.3 – Variação do custo do sistema de abastecimento com a cota de alimentação.

(Extraída de Gomes, 1999)

2.7.5 - Programação Dinâmica

A **Programação Dinâmica** é uma técnica de otimização que se aplica a problemas com decisões sequenciais, isto é, problemas que podem ser considerados como

processo de decisão seqüencial em vários estágios. Estes estágios são pontos do processo no qual deve ser tomada uma decisão. Para cada estágio em que o problema é dividido, é determinado um ótimo, relacionando-se o ótimo de um estágio a outro, através de uma função recursiva e percorrendo todos os estágios, determina-se o ótimo global. Segundo Bellman (1957), *apud* Santos (2002), na Programação Dinâmica cada etapa da seqüência deve considerar somente os resultados das alternativas da etapa anterior.

A Programação Dinâmica foi aplicada no Método Granados (1970), conforme Gomes (1999), no dimensionamento econômico de redes ramificadas. Trata-se de um algoritmo iterativo que fornece o menor custo de uma rede ramificada pressurizada, em função de sua cota piezométrica da cabeceira da rede. No processo de otimização este método considera que os preços das tubulações variam em função dos seus tipos, diâmetros e classes, enquanto são constantes a vazão, a rugosidade do tubo, a taxa de juros e o aumento da energia. O Método Granados foi adaptado para ser aplicado em redes malhadas de distribuição de água por Leal (1995), o qual fez uma junção com o método dos anéis de Hardy-Cross.

2.7.6 - Algoritmo Genético

A técnica do algoritmo genético (AG) é relativamente nova. Dentre as técnicas citadas é a mais recente, sendo, portanto, ainda reduzida a quantidade de publicações que utilizam essa ferramenta para a otimização de sistemas de abastecimento de água. Segundo Holland (1975) e Goldberg (1989), *apud* Formiga (1999), o AG é um algoritmo de busca baseado na seleção natural e nos mecanismos da genética das populações.

Para Savic e Walters (1997), *apud* Formiga (1999), o AG tem por fundamento o processo biológico de sobrevivência e adaptação, sendo um algoritmo eficiente e flexível que permite a solução de problemas complexos, como a otimização de redes malhadas. Eles desenvolveram um modelo computacional denominado GENET, que é aplicado na solução de problemas de determinação do menor custo de uma rede. Este programa utiliza basicamente os mesmos operadores empregados por Simpson *et al.* (1994) e é mais eficiente do que as técnicas tradicionais de balanceamento de rede, o que implica em uma quantidade menor de tempo de máquina do que a utilizada por Simpson *et al.* (1994).

Já para Lourenço (2000), *apud* Santos (2002), os algoritmos genéticos constituem uma parte da computação evolutiva, a qual está rapidamente crescendo como uma

subdivisão da Inteligência Artificial. Ilab (2001), *apud* Santos (2002), afirma que, em contraste com outros processos de otimização, os algoritmos genéticos focam uma otimização local, entretanto, a evolução é controlada para tentar percorrer todo o espaço de busca, o que pode tornar a otimização global.

2.7.7 - Considerações Finais a Respeito da Escolha do Método Usado

Todos os processos de otimização apresentados anteriormente apresentam vantagens e desvantagens quando comparados entre si. Já foram desenvolvidos diversos métodos de solução de problemas de otimização de redes de abastecimento baseados em diferentes teorias, no entanto, nenhum deles assegura a convergência ótima para todos os problemas, devido às suas limitações matemáticas. Para Barbosa (2000), *apud* Santos, 2002, quando se trata de redes ramificadas, mesmo de maiores dimensões, a otimização não linear é viável, não havendo neste caso exigência do fechamento das cargas nos anéis.

Nesta Revisão da Literatura foi feita uma análise sobre vários métodos de dimensionamento econômico de redes de distribuição de água já desenvolvidos, e verificou-se que todos eles consideram constantes os parâmetros das condições de contorno do projeto, não levando, portanto, em consideração as variações que estes parâmetros possam sofrer durante todo o período de operação do projeto. Verificou-se, também, que dentre as técnicas de otimização utilizadas, a Programação Não Linear apresentou bons resultados quando aplicada na solução de problemas de otimização de redes de abastecimento de água. Portanto, tendo em vista estas observações e considerando também os resultados obtidos por Gomes (2002) e outros autores, neste trabalho optou-se por empregar um método de otimização baseado na Programação Não Linear, tendo sido desenvolvido um programa computacional em ambiente de programação Borland Delphi 6, com base no algoritmo de minimização GRG2 (Gradiente Generalizado), disponível na ferramenta Solver da planilha Excel®.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho é dirigida, conforme consta dos objetivos, para a realização de um estudo aprofundado da variação dos parâmetros das condições de contorno do projeto e a verificação do impacto sobre projetos de dimensionamento econômico de redes de distribuição de água, quando se consideram variáveis estes parâmetros, ou sejam: rugosidade, perda de carga, população, consumo de água, vazão e coeficientes econômicos (em função das taxas de juros, da inflação ou do aumento da energia), que são considerados constantes nos métodos existentes de dimensionamento econômico de redes de abastecimento de água.

Portanto, foi feita uma Revisão da Literatura de forma a se ter os fundamentos teóricos dirigidos para o estudo desses parâmetros, visando se obter um embasamento sólido para realizar as fases seguintes: estudo das variações dos referidos parâmetros, desenvolvimento de um método de dimensionamento econômico de redes de abastecimento de água considerando essas variações e também, o desenvolvimento de um programa computacional para resolvê-lo.

Desta forma, foram inicialmente estudadas as variações dos parâmetros das condições de contorno do projeto, procurando-se encontrar funções que as representassem e, se tentou, sempre que foi possível, transformá-las em funções que variassem em função do tempo, visando se obter uma uniformização das variações destas funções e, conseqüentemente, a redução da quantidade de variáveis envolvidas no dimensionamento.

Em seguida, realizou-se o desenvolvimento do método de dimensionamento econômico, considerando-se as variações dos referidos parâmetros. No desenvolvimento deste método foi adotada a Programação Não Linear, tendo-se formulado o problema através de uma Função Objetivo: minimizar os custos totais do projeto (custos de implantação mais custos de operação), e das Restrições: da continuidade nos nós, da

conservação da energia nos anéis, das velocidades, das pressões e dos diâmetros. O método foi desenvolvido em duas etapas: primeira etapa – dimensionamento inicial: é feita a otimização da função objetivo com os diâmetros contínuos (variáveis de decisão), variando as vazões nos trechos, os diâmetros e a altura manométrica de bombeamento; segunda etapa – dimensionamento final: partiu-se dos resultados obtidos na otimização da primeira etapa e considerou-se que cada trecho da rede seria ocupado por dois sub-trechos de diâmetros imediatamente inferior e imediatamente superior ao diâmetro encontrado para o trecho na 1ª etapa. Partindo-se destas alterações foram formuladas nova função objetivo e novas restrições. Os efeitos das variações dos parâmetros foram levados em consideração nas duas etapas do método. No desenvolvimento do método considerou-se que:

- o coeficiente de rugosidade de tubulações de ferro fundido varia linearmente com o tempo, conforme estudos de Colebrook e White ;
- as perdas de carga podem ser calculadas pelas fórmulas empíricas existentes, tendo-se optado pelo emprego das fórmulas de Hazen-Williams e/ou de Darcy-Weisbach, por serem as que, possivelmente, apresentem melhores resultados práticos e científicos, respectivamente;
- os coeficientes de atrito são variáveis, podendo ser calculados pelas fórmulas de Colebrook e White ou de Swamee & Jain;
- a população a ser abastecida variará com o tempo, podendo a sua estimativa de crescimento ser feita pelo método das componentes demográficas, associado ao método de tendência de crescimento demográfico, por serem os métodos adotados pelo IBGE, e se ter maior disponibilidade de dados;
- a variação da vazão do projeto foi calculada em função da variação da população que será abastecida a cada ano, durante todo o alcance do projeto;
- a análise econômica do projeto foi feita através do seu valor presente, considerando-se a variação do número de horas de bombeamento, da vazão do projeto e do custo energético;
- por se tratar de um problema de otimização e como já foi justificado, ter-se optado por adotar a Programação Não Linear, o desenvolvimento deste método teve características baseadas no método PNL2000, desenvolvido por Gomes (2001).

Para se verificar a viabilidade do emprego deste método no dimensionamento econômico de redes malhadas de abastecimento de água, usando-se a programação não linear, poderia ter sido usada a ferramenta de otimização Solver da planilha eletrônica Excel® ou qualquer um dos pacotes de programação não linear disponíveis, como GINOS, LINOS, GAMS, MATLAB, etc. No entanto, preferiu-se optar pelo desenvolvimento de um programa computacional em ambiente de programação Borland Delphi 6, tendo sido utilizada neste sistema uma função de minimização da ferramenta Solver, que está implementada em uma DLL (Biblioteca de Vínculo Dinâmico);

O método e programa computacional desenvolvidos foram testados através da resolução de três exemplos, que possibilitaram a verificação de suas eficácias quando aplicado no dimensionamento econômico de projetos de redes de abastecimento de água, como também um dos exemplos permitiu a comparação dos resultados com os obtidos por Gomes (2002) através do método PNL2000.

Portanto, a metodologia adotada na realização desta pesquisa foi calcada no embasamento teórico visto na Revisão da Literatura e nos estudos realizados e desenvolvidos no Capítulo 4 (Estudo da Variação dos Parâmetros que Determinam as Condições de Contorno de um Projeto de Abastecimento de Água), no Capítulo 5 (Aspectos Econômicos. Custos dos Projetos), no Capítulo 6 (Desenvolvimento do Método de Otimização de Sistemas de Abastecimento de Água, Considerando-se Variáveis as Condições de Contorno do Projeto. Desenvolvimento do Programa Computacional) e no Capítulo 7 (Aplicação do Método e Análise dos Resultados)

Acrescentou-se a este estudo, em um dos exemplos apresentados, uma análise dos efeitos sobre o dimensionamento de redes de distribuição de água, quando se considera a variação do custo do concreto do reservatório elevado, em função da variação da altura dos pilares.

CAPÍTULO 4

ESTUDO DA VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS QUE DETERMINAM AS CONDIÇÕES DE CONTORNO DE UM PROJETO DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

Neste capítulo é feito um estudo sobre os parâmetros que determinam as condições de contorno de um projeto de abastecimento de água, quando os mesmos são considerados variáveis. Inicialmente foram estudados alguns índices característicos da qualidade da água para abastecimento e que podem causar danos ou perturbações às tubulações. Em seguida foram estudadas as variações dos parâmetros: rugosidade dos tubos, perda de carga, estimativa do crescimento da população, vazão de projeto e fatores econômicos que incidem nos custos do projeto durante todo o seu alcance.

4.1 - QUALIDADE DA ÁGUA - ESTADOS DE SATURAÇÃO - ÍNDICES DE SATURAÇÃO - DIAGRAMA MODIFICADO DE CALDWELL-LAURENCE.

4.1.1 - Qualidade da Água

A água a ser distribuída às comunidades, através dos sistemas de abastecimento, deve ser tratada e atender a certos requisitos mínimos de qualidade, pré-estabelecidos pelos órgãos responsáveis pelo controle de qualidade da água destinada ao consumo humano.

No seu estado natural (rios, barragens, poços, etc), geralmente, a água não atende aos requisitos exigidos. Existem águas que não apresentam nenhum sólido dissolvido e têm baixos pH e alcalinidade. Outras águas têm altas concentrações de sólidos dissolvidos, tais como íons de: cálcio, magnésio, sódio, cloreto e sulfato, e apresentam alta alcalinidade e pH variável, e, onde não há a presença de oxigênio, alta concentração de ferro dissolvido,

manganês e, possivelmente, dióxido de carbono. Portanto, a maioria das águas necessita de alguma forma de tratamento, antes de estarem disponíveis para o consumo humano.

Segundo Lowenthal *et al.* (1986), as propriedades químicas da água sempre causam algum impacto no sistema de distribuição, variando de negligenciável a severo. Águas com propriedades químicas apropriadas causam impacto muito reduzido e os sistemas de distribuição têm longa expectativa de durabilidade. Por outro lado, as águas com propriedades químicas inadequadas podem causar maior impacto e reduzir bastante a expectativa de durabilidade dos sistemas de distribuição. O impacto destas águas no sistema de distribuição pode se classificado em três tipos:

- a) a água pode causar grande precipitação de minerais de cálcio e ferro nas paredes da tubulação, podendo reduzir bastante a sua capacidade de condução, é o efeito chamado de **incrustação**;
- b) a água pode dissolver a matriz de cimento em tubos de cimento-amianto e concreto, causando destruição da integridade do material, é o efeito chamado de **agressão**;
- c) reações eletroquímicas entre a água e os metais das tubulações do sistema podem causar o aumento da dissolução do metal e precipitação de cloretos de sódio do metal, criando erosão, formação de nódulos, água vermelha etc, causando a perda das funções e até a destruição das tubulações, é o efeito chamado de **corrosão**.

Estes efeitos podem ser minimizados ou até mesmo eliminados por meio de simples pré-tratamentos químicos corretivos da água. No entanto, o tratamento apropriado exige conhecimento da química básica da água e das interações entre a água e o material da tubulação. De acordo com Lowenthal *et al.* (1986), foram realizadas várias pesquisas químicas no tratamento das águas de abastecimento, no entanto, talvez a mais importante tenha sido a realizada por Langelier em 1936. Langelier reconheceu a importância do sistema de carbonato no estabelecimento do pH da água, e a solubilidade do mineral carbonato de cálcio no estabelecimento do estado de sub-saturação ou supersaturação da água. Langelier também propôs que a água deveria ser tratada até um estado de supersaturação, o qual causaria o aparecimento de uma camada de carbonato de cálcio que seria precipitada nas paredes das tubulações criando uma película isolante protetora. Para

assegurar o estado de saturação ele desenvolveu um índice chamado de Índice de Saturação de Langelier (já citado na Revisão da Literatura), o qual é baseado no equilíbrio químico das concentrações de cálcio e pH. Ele também propôs critérios em termos do índice para evitar a agressão e a corrosão.

Após estes estudos de Langelier, até o presente, foram desenvolvidas várias pesquisas na química dos sistemas de carbonatos e da água em contato com ferro e cimento. No entanto, os critérios sugeridos por Langelier para proteção dos sistemas de distribuição ainda são aplicados com sucesso até hoje. Segundo Lowenthal et al. (1986), outros fatores também têm importância, como íons de sulfato, concentração de sais dissolvidos, concentração de oxigênio dissolvido, velocidade do escoamento, etc, mas seus efeitos precisam ser melhores definidos, principalmente em relação à corrosão.

Conforme Lowenthal *et al.* (1986), a **agressão** é a designação dada ao fenômeno que ocorre quando a água ataca a matriz do cimento contida nas tubulações de cimento e de concreto. São identificados dois processos de agressão:

- a água tem características químicas que causam a dissolução de alguns dos minerais na matriz do cimento;
- a água contém espécies de sulfatos que podem reagir quimicamente com alguns dos minerais na matriz do cimento para formar produtos que causam a destruição física da matriz.

As trocas volumétricas, juntas com o enfraquecimento dos silicatos hidratados, podem ter um efeito muito adverso na integridade e resistência do cimento. Para anular esses efeitos devem ser usados tipos especiais de cimento e concreto de alta densidade.

4.1.2 - Estados de Saturação

Tendo em vista a quantidade de carbonato de cálcio existente na água, esta pode ser classificada nos estados químicos: subsaturada, supersaturada e saturada:

água subsaturada: dissolve o carbonato de cálcio sólido;

água supersaturada: precipita o carbonato de cálcio sólido;

água saturada: não precipita nem dissolve o carbonato de cálcio.

Estes três estados são identificados teoricamente através da comparação do “produto de atividade” de cálcio (C_a^{2+}) e carbonato (CO_3^{2-}) com a constante do “produto de solubilidade” do carbonato de cálcio (K_{sp}). O “produto de atividade” é igual ao produto da atividade molar das concentrações de cálcio (C_a^{2+}) e de carbonato (CO_3^{2-}), ou seja:

$$\text{produto de atividade} = (C_a^{2+}) \cdot (CO_3^{2-})$$

sendo:

() – concentração molar ativa, também chamada de concentração, em moles/l.

Seja:

K_{sp} o produto de solubilidade termodinâmica do carbonato de cálcio.

Tem-se:

água subsaturada: $(C_a^{2+}) (CO_3^{2-}) < K_{sp}$;

água supersaturada: $(C_a^{2+}) (CO_3^{2-}) > K_{sp}$;

água saturada: $(C_a^{2+}) (CO_3^{2-}) = K_{sp}$.

O valor de K_{sp} do carbonato de cálcio depende da temperatura, da pressão e do tipo do mineral carbonato de cálcio precipitado (calcita, aragonita, etc.), sendo que este depende da constituição iônica da água (isto é, concentrações e tipos de sais presentes na solução), estado de saturação, temperatura e pressão. Para águas com baixa resistência iônica submetidas à temperaturas entre 0°C e 60°C, com baixos grau de supersaturação e pressão atmosférica, o mineral de carbonato de cálcio que normalmente mais irá precipitar é a **calcita**. Nos sistemas de abastecimento de água, a calcita é o material que irá precipitar, enquanto a água estiver supersaturada.

Segundo Lowenthal and Marais (1976), *apud* Lowenthal *et al.* (1986), o “produto de solubilidade” da calcita é função da temperatura, e pode ser calculado pela fórmula:

$$pK_{sp} = 8,03 + 0,01183T \quad (4.1)$$

sendo:

$$pK_{sp} = -\log_{10} K_{sp};$$

T = temperatura, em graus Celsius.

Langelier também propôs critérios para se evitar a agressão e a corrosão, tendo sugerido que seja feito um tratamento químico para regular a água a um estado desejado de não agressividade e não corrosividade, chamado de **estabilização**.

Problemas de estabilização envolvem cálculos de dosagens químicas para regular o estado químico da água e satisfazer as normas, tais como:.

- concentrações de alcalinidade e/ou cálcio exceder aproximadamente 50 mg/l como CaCO_3 ;
- pH da água variar no intervalo: $6,5 < \text{pH} < 9,5$;
- a água ser levemente supersaturada com relação ao carbonato de cálcio, com uma precipitação potencial de aproximadamente 4 mg/l CaCO_3 ;
- a concentração de tipos de sulfatos ser menor que cerca de 350 mg SO_4^{2-} ;
- a dissolução de oxigênio ser maior que 4 mg/l.

4.1.3 - Índices de Saturação

Os índices de saturação são usados para se estimar a tendência de dissolução ou precipitação de CaCO_3 de uma água, ou seja, definem quando uma água é subsaturada, supersaturada ou saturada. Os índices mais usados são: o Índice de Saturação de Langelier, o Índice de Saturação Relativa (ISR) e o Índice de Ryznar (IR). Dentre estes, o Índice de Saturação de Langelier é o que tem melhor aceitação.

O Índice de Saturação de Langelier ou simplesmente Índice de Langelier (IL) pode ser determinado pela fórmula:

$$\text{IL} = \text{pH} - \text{pH}_s \quad (4.2)$$

sendo:

pH – pH medido da água, é um indicador da concentração de hidrogênio na solução;

pH_s – pH da água se ela está em equilíbrio com CaCO_3 .

Têm-se as três situações a seguir:

se $\text{IL} < 0$: a água é subsaturada;

se $\text{IL} > 0$: a água é supersaturada;

Têm-se as três situações a seguir:

se $IL < 0$: a água é subsaturada;

se $IL > 0$: a água é supersaturada;

se $IL = 0$: a água é saturada.

A determinação de pH_s pode ser feita analiticamente pela fórmula:

$$pH_s = pK_2 - pK_s + p[Ca^{2+}] + p[HCO_3^-] + 5pf_m \quad (4.3)$$

sendo:

K_2 – segunda constante de separação de ácido carbônico, à temperatura da água;

K_s – constante do “produto de solubilidade” do $CaCO_3$, à temperatura da água;

$[Ca^{2+}]$ – concentração de íon de cálcio, em g-moles/l;

$[HCO_3^-]$ – concentração de íon de bicarbonato, em g-moles/l;

f_m – coeficiente de atividade para classes monovalentes, à temperatura especificada.

Na equação 4.3, a letra “p” precedendo uma variável significa $-\log_{10}$ daquela variável.

A determinação de pH_s pela equação 4.3 é relativamente complicada, tendo em vista a dificuldade de se determinar todos os parâmetros nela envolvidos. A American Public Health Association (1995), publicou tabelas contendo fórmulas e valores de pH_s para determinadas temperaturas que facilitam o cálculo de pH_s através da equação 4.3 (estas tabelas não se encontram reproduzidas neste trabalho).

4.1.4 - Diagrama Modificado de Caldwell-Lawrence

Segundo Lowenthal *et al.* (1986), os métodos numéricos são quase impraticáveis na determinação da precipitação potencial e na dosagem química requeridas para a estabilização da água. No entanto, foram desenvolvidas aproximações práticas que permitem a solução rápida destes problemas através de diagramas. Dentre os diagramas existentes o mais usado é o Diagrama Modificado de Caldwell-Lawrence (DMCL). O DMCL é um diagrama de equilíbrio multi-fase para tipos de carbonatos no meio aquoso, sólido ($CaCO_3$) e gás (óxido de carbono). As coordenadas do diagrama têm por parâmetros

a Acidez (ordenadas) e a Alcalinidade – Cálcio (abscissa), e é constituído de uma família de curvas que representam o pH e a alcalinidade, e os valores de Ca^{2+} na saturação com relação ao CaCO_3 , conforme a figura 4.1.

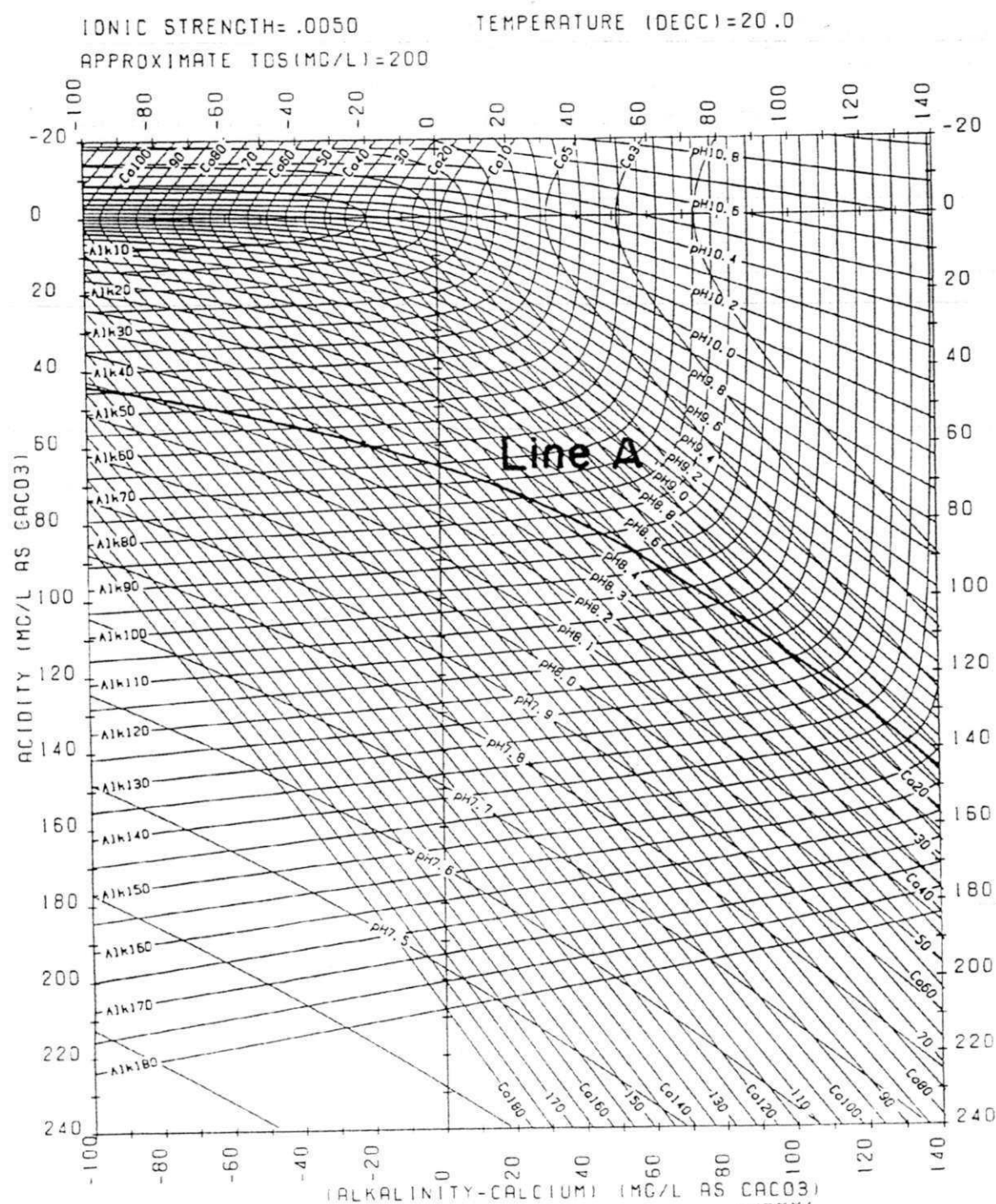


Figura 4.1- Diagrama Modificado de Caldwell-Lawrence.

A linha A representa o equilíbrio de CO_2 com o ar.

(Extraída de Lownethal et al.1986)

(T). O uso do DMCL pode ser mostrado através do Exemplo Ilustrativo 4.1, extraído de Lowenthal *et al.* (1986).

Exemplo Ilustrativo 4.1

A análise de uma água forneceu: alcalinidade 80 mg/l (como CaCO_3), $\text{Ca}^{2+} = 100$ mg/l (como CaCO_3), pH = 8,6, resistência iônica $\mu = 0,005$, TDS = 200 mg/l e temperatura $T = 20^\circ\text{C}$. Determinar o estado de saturação da água e a concentração da massa de CaCO_3 que pode precipitar da água.

Resolução:

- Seleção do DMCL:

Com: $\mu = 0,005$, TDS = 200mg/l e $T = 20^\circ\text{C}$, foi selecionado o DMCL da Figura 4.2, extraída de Lowenthal *et al* (1986).

- **Determinação da Acidez da Água:**

O ponto de equilíbrio do meio aquoso é dado pelo ponto de intersecção das linhas que representam o pH = 8,6 e a alcalinidade = 80mg/l, ou seja, é o ponto 1 na Figura 5.2. A acidez correspondente ao ponto 1 define a acidez inicial da água: 77 mg/l como CaCO_3 .

- **Estado de saturação de CaCO_3 :**

Para haver a saturação correspondente à alcalinidade de 80 mg/l e pH de 8,6, ou seja, o ponto 1, o valor de Ca^{2+} é 30 mg/l. Como o valor medido de Ca^{2+} é 100 mg/l, maior que o valor de Ca^{2+} necessário para a saturação (30 mg/l como CaCO_3), a água está supersaturada.

quando ela se tornar saturada. No entanto não se conhecem os locais onde ela começa e termina e qual é o comprimento da tubulação atingido pelas incrustações. Em tubulações de pequenos comprimentos pode-se garantir que não há precipitações? Em tubulação longa a precipitação atinge uma parte apenas do seu comprimento? Qual seria esta parte?

Neste trabalho não foi possível responder a estes questionamentos. No entanto, isto não deve invalidar o valor deste estudo, pois sendo a ocorrência das incrustações um fenômeno que causa redução do diâmetro da tubulação, mesmo não se conhecendo o seu valor exato em um determinado ano de operação do projeto, pode-se considerar este efeito supondo-se uma redução percentual do diâmetro da tubulação.

Para se reduzir o efeito das precipitações de CaCO_3 que causam aumentos exagerados das incrustações, sugere-se um controle mais adequado da saturação da água, ou, se possível, se fazer uma devida limpeza da tubulação (como já se faz em várias regiões dos EUA).

4.2 - VARIAÇÃO DA RUGOSIDADE

4.2.1 - Preliminares

A **rugosidade interna** das tubulações é um parâmetro que tem efeito acentuado na maioria dos cálculos que envolvem o dimensionamento e a análise de projetos de redes de distribuição de água, principalmente nas de ferro fundido sem revestimentos. Seu valor varia muito, dependendo do tipo do material, da idade e do fabricante da tubulação.

Segundo Sharp & Walski (1988), nas tubulações revestidas de argamassa de cimento e nas de PVC, a rugosidade interna varia pouco durante a vida útil da tubulação. No caso de se usar água supersaturada com alto grau de precipitação há o aparecimento de incrustações que causam redução do diâmetro da tubulação. Enquanto que nas tubulações de ferro fundido e metal, sem revestimentos especiais, as variações das rugosidades, podem ser bastante significativas.

Há várias formas de se estimar o valor da rugosidade interna de uma tubulação, dentre elas pode-se citar as três seguintes:

- se usar os valores das rugosidades das tubulações já conhecidos na literatura, os quais variam muito, dependendo do tipo de material, do fabricante e do método usado para as suas determinações;

- determinar a rugosidade interna de tubulações existentes, pelo cálculo da rugosidade interna da tubulação, obtida através de um modelo computacional da rede de distribuição, calibrado para um grande número de condições;
- medir a real rugosidade da tubulação no campo através de testes de perda de carga. Este é o método que fornece melhores resultados, mas é bastante oneroso.

Na realidade, nenhum destes métodos usados para se determinar a rugosidade interna da tubulação fornece condições de se prever o valor da rugosidade em um tempo futuro.

4.2.2 - Determinação do Aumento da Rugosidade

Segundo Sharp & Walski (1998), Colebrook e White (1935) estudaram o problema da variação da rugosidade interna em tubulações de ferro fundido, ao longo do tempo, tendo obtido bons resultados. Baseados em seus próprios dados e em dados do Comitê da New England Water Works Association, eles lançaram a hipótese de que a rugosidade interna das tubulações aumenta de forma aproximadamente linear com o passar do tempo, conforme a equação 2.2 vista na Revisão da Literatura. Eles também verificaram que o coeficiente de crescimento da rugosidade depende muito do pH da água. Adotando-se a hipótese de variação linear do coeficiente de crescimento da rugosidade (equação 2.2), a rugosidade de tubulações de ferro fundido, em um trecho “i” da rede e no tempo “t”, pode ser calculada pela fórmula:

$$\varepsilon_{it} = \varepsilon_{oi} + \alpha_i t \quad (4.4)$$

sendo:

ε_{it} – função da rugosidade interna da tubulação do trecho “i”, no tempo t, em mm;

ε_{oi} – altura da rugosidade absoluta da tubulação do trecho “i”, no tempo $t = 0$ (rugosidade inicial), em mm;

α_i – coeficiente de crescimento da rugosidade da tubulação do trecho “i”, em mm/ano;

t – tempo, em ano.

A equação 4.4 possibilita o cálculo da rugosidade da tubulação de ferro fundido do trecho “i” em um tempo t qualquer, sendo conhecidas as constantes: rugosidade inicial (ϵ_{oi}) e coeficiente de crescimento da rugosidade (α_i). Estas duas constantes podem ser determinadas empiricamente.

A rugosidade inicial é um parâmetro cujo valor depende de vários fatores: tipo de material, processo de fabricação, tratamentos específicos, etc., geralmente são fornecidos pelos fabricantes das tubulações.

O coeficiente de crescimento da rugosidade de tubos de ferro fundido pode ser determinado por vários métodos que levam em consideração a qualidade da água, podendo ser calculado pela fórmula de Colebrook e White (equação 2.3), pela fórmula sugerida por projetistas ingleses (equação 2.4) ou pela fórmula de Lamont (equação 2.5).

- Comentários

Verifica-se que a variação da rugosidade nas tubulações é um assunto delicado que ainda precisa ser mais estudado, principalmente quando se trata de tubos de ferro fundido revestido com argamassa de cimento, que têm coeficientes de rugosidades iniciais bastante reduzidos, mas, como o cimento da argamassa pode ser atacado por agentes químicos da água, estes coeficientes de rugosidade podem variar com o passar do tempo. No entanto, para as tubulações usadas atualmente, pode-se fazer adaptações das fórmulas existentes, adotando-se os coeficientes de rugosidade inicial e para tubos velhos sugeridos pelo fabricante e se determinando um coeficiente de variação da rugosidade adaptado para o material do tubo e para o tipo de revestimento.

4.3 - VARIAÇÃO DA PERDA DE CARGA

Neste trabalho foram empregadas as fórmulas de Darcy-Weisbach e de Hazen-Williams, por serem as mais usadas por engenheiros e pesquisadores e, provavelmente, as que têm apresentado resultados mais compatíveis com os obtidos na prática através de

testes realizados em redes de distribuição de água. Na Revisão da Literatura foram apresentadas as formas tradicionais das fórmulas de Darcy-Weisbach e de Hazen-Williams, no entanto, nestas fórmulas não foram considerados os efeitos da rugosidade e da vazão. Estes efeitos são levados em consideração neste item.

4.3.1 - Fórmula de Darcy-Weisbach Considerando-se os Parâmetros Variáveis

Vários autores, brasileiros e estrangeiros, concordam com a afirmativa de que a fórmula de Darcy-Weisbach, também conhecida como “Fórmula Universal”, é, possivelmente, a mais recomendável para o cálculo de perda de carga nas tubulações das redes de distribuição de água. Conforme foi visto na Revisão da Literatura, a fórmula de Darcy-Weisbach para o cálculo da perda de carga, pode ser dada pela equação 2.6.

Uma das dificuldades para o emprego da equação 2.6 está na determinação do coeficiente de atrito, que é uma função do diâmetro da tubulação, da rugosidade da parede interna da tubulação, da velocidade do escoamento, e da viscosidade do fluido.

Quando são considerados variáveis os parâmetros coeficiente de atrito e a vazão, em um determinado trecho “i” da rede de distribuição, no tempo “t”, a fórmula de Darcy-Weisbach, dada pela equação 2.6, passa a ser a seguinte:

$$h_{fi} = 0,0827 f_{it} \cdot L_i \cdot \frac{Q_i^2}{D_i^5} \quad (4.5)$$

sendo:

h_{fi} – função da perda de carga do trecho i, no tempo t, em m;

f_{it} – função do coeficiente de atrito do trecho i, no tempo “t”, adimensional;

D_i – diâmetro interno da tubulação do trecho i, em m;

Q_{it} – função da vazão do trecho “i”, no tempo “t”, em m³/s.

Na equação 4.5 os parâmetros f_{it} são funções que variam com o tempo e podem ser determinadas a partir das equações 2.11, 2.12, 2.13, 2.14 e 2.30. Considerando que as tubulações das redes de distribuição de água estão submetidas, na maioria dos casos, à escoamentos turbulentos, no cálculo do coeficiente de atrito optou-se pelo uso das fórmulas de Colebrook e White adaptado por von Kármán & Prandl (equação 2.11) e

Swamee & Jain (equação 2.12), por serem as que melhor se adaptam aos cálculos computacionais.

- Fórmula de Colebrook e White adaptada por von Kármán & Prandl

Quando se considera o coeficiente de atrito variável com o tempo, a fórmula de Colebrook e White adaptada por von Kármán Prandl, equação 2.11, passa a ser a seguinte:

$$f_{it} = [1,14 - 2\log(\epsilon_{it}/D_i)]^{-2} \quad (4.6)$$

sendo:

ϵ_{it} – função da rugosidade interna da tubulação no trecho i, no ano t, em m;

Para o cálculo da rugosidade variável da tubulação de ferro fundido, pode-se aplicar a fórmula da variação linear, equação 4.1, e o coeficiente de crescimento da rugosidade pode ser calculado pela fórmula de Colebrook e White (equação 2.3), pela fórmula sugerida por projetistas ingleses (equação 2.4) ou pela fórmula de Lamont (equação 2.5).

- Fórmula de Swamee & Jain:

No caso de se usar a fórmula de Swamee & Jain (equação 2.12b), para se levar em consideração a variação do coeficiente de atrito, tem-se:

$$f_{it} = 0,25 \{ \log[(0,27\epsilon_{it}/D_i) + (5,74/R_{eit}^{0,9})] \}^{-2} \quad (4.7)$$

sendo:

$R_{eit} = \frac{v_{it} D_i}{\nu}$ – função do número de Reynolds para o trecho i, no tempo t,

adimensional;

v_{it} – função da velocidade da água no trecho i, no tempo t, em m/s;

ν – viscosidade cinemática da água, em m²/s.

Para escoamento turbulento rugoso que tem alto valor do número de Reynolds, o termo $5,74/R_{eff}^{0,9}$ é muito pequeno e pode ser desprezado, então, tem-se a fórmula de Swamee & Jain Simplificada para o cálculo de f_{it} :

$$f_{it} = 0,25[\log(0,27\varepsilon_{it}/D_i)]^{-2} \quad (4.8)$$

4.3.2 - Fórmula de Hazen-Williams Considerando-se os Parâmetros Variáveis

A fórmula de Hazen-Williams tem sido bastante empregada por engenheiros projetistas, principalmente nos EUA, no cálculo das perdas de carga nos escoamentos em tubulações de redes de distribuição de água. Na realidade, a sua aplicação é mais eficiente em escoamentos nos quais a rugosidade nas paredes da tubulação não ultrapassa a camada limite laminar (isto é, nos escoamentos hidraulicamente lisos), sendo pouco imprecisa para escoamentos de transição e ainda um pouco mais imprecisa para escoamento completamente rugoso (é o caso de tubos velhos não revestidos). No entanto, segundo Sharp & Walski (1988), a equação de Hazen-Williams ainda é usada no cálculo das perdas de carga em escoamentos rugosos, devido ao fato de o erro que ocorre não ser significativo, exceto para tubulações longas com escoamentos submetidos a altas velocidades. Para a maioria dos problemas de dimensionamento de redes de distribuição de água, a fórmula de Hazen-Williams pode ser empregada com precisão suficiente. A fórmula de Hazen-Williams, vista na Revisão da Literatura, pode ser calculada pela equação 2.15.

Quando são considerados variáveis os parâmetros: coeficiente de atrito e vazão, a fórmula de Hazen-Williams dada pela equação 2.15 passa a ser:

$$h_{fit} = 10,65 \frac{L_i}{D_i^{4,87}} \left(\frac{Q_{it}}{C_{it}} \right)^{1,852} \quad (4.9)$$

sendo:

C_{it} – função do coeficiente de atrito ou coeficiente de Hazen-Williams do trecho i , no ano t , adimensional.

Neste caso, uma das dificuldades para o emprego da equação 4.9 está na determinação do coeficiente de atrito ou coeficiente de Hazen-Williams do trecho “ i ” no

tempo "t". Uma das formas de se determinar este coeficiente, adotada por Sharp & Walski (1988), é igualando-se as perdas de carga calculadas pela fórmula de Darcy-Weisbach (equação 4.5) e de Hazen-Williams (equação 4.9), obtém-se:

$$C_{it} = \frac{14,05}{f_{it}^{0,54} \cdot v_{it}^{0,081} \cdot D_i^{0,0891}} \quad (4.10)$$

O coeficiente de atrito da tubulação do trecho i, no ano t (f_{it}), pode ser calculado pelas equações 4.6, 4.7 ou 4.8. Pode-se determinar o coeficiente C_{it} das seguintes formas, conforme a fórmula adotada para o cálculo do coeficiente de atrito (f_{it}):

- adotando-se para o cálculo de f_{it} a fórmula de von Kármán & Prandl (equação 4.6), tem-se:

$$C_{it} = \frac{[13,17 - 23,11 \log(\varepsilon_{it} / D_i)]^{1,08}}{v_{it}^{0,081} \cdot D_i^{0,0891}} \quad (4.11)$$

- adotando-se para o cálculo de f_{it} a fórmula de Swamee & Jain (equação 4.7), tem-se:

$$C_{it} = \frac{29,7 \{ [\log(0,27 \varepsilon_{it} / D_i + 5,74 / R_{ei}^{0,9})]^2 \}^{0,54}}{D_i^{0,0891} \cdot v_{it}^{0,081}} \quad (4.12)$$

- adotando-se para f_{it} a fórmula de Swamee & Jain Simplificada (equação 4.8), tem-se:

$$C_{it} = \frac{29,7 \{ [\log(0,27 \varepsilon_{it} / D_i)]^2 \}^{0,54}}{D_i^{0,0891} \cdot v_{it}^{0,081}} \quad (4.13)$$

Sharp & Walski (1988), sugeriram que, calculando-se um valor de C_{it} para um determinado valor da velocidade, por exemplo: $v_{it} = 3 \text{ fps} = 0,9 \text{ m/s}$, e aplicando-se a fórmula de Swamee & Jain simplificada, se obterá uma fórmula mais simples para o cálculo de C_{it} :

$$C_{it} = 29,9 \{ [\log(0,27\epsilon_{it}/D_i)]^2 \}^{0,54} / D_i^{0,0891} \quad (4.14)$$

Ainda de acordo com Sharp & Walski (1988), conhecendo-se o coeficiente de Hazen-Williams para uma certa velocidade e mantendo-se as mesmas condições do projeto, pode-se calculá-lo para qualquer outra velocidade, pela fórmula seguinte:

$$C_{i2} = C_{i1} \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{0,081} \quad (4.15)$$

sendo:

C_{i2} – coeficiente de Hazen-Williams no ano t , para a velocidade v_2 ;

C_{i1} – coeficiente de Hazen-Williams no ano t , para a velocidade v_1 ;

v_1 – velocidade com a qual o coeficiente C é calculado inicialmente;

v_2 – velocidade para a qual se deseja calcular o coeficiente C .

Para se determinar o valor do coeficiente de atrito de Hazen-Williams em um tempo “ t ” qualquer, sendo conhecidos o coeficiente de rugosidade, o diâmetro e a velocidade do escoamento, pode-se usar uma das fórmulas das equações 4.11, 4.12, 4.13 ou 4.14. A fórmula da equação 4.14 é válida para um valor particular da velocidade do escoamento igual a 0,9 m/s. Caso se deseje calcular o coeficiente de Hazen-Williams para outros valores da velocidade do escoamento, sob as mesmas condições do problema, usa-se a fórmula da equação 4.15. Deve-se ressaltar que, ao se usar estes valores de C_{it} , as perdas de carga calculadas pela fórmula de Hazen-Williams são praticamente iguais as da fórmula de Darcy-Weisbach.

Um caso que pode ocorrer na prática, é quando são conhecidos os valores do coeficiente de Hazen-Williams em determinadas datas e se deseja determinar o seu valor em uma data futura. Para isto é necessário se calcular o valor da rugosidade da tubulação na data desejada, o que pode ser feito por meio das equações 4.11 a 4.14. Sharp & Walski (1988) sugeriram ainda que, para problemas práticos, se calculasse a rugosidade a partir da equação 4.13, obtendo-se a seguinte equação:

$$\varepsilon_{it} = 3,7D_i \cdot 10^{-0,0433(C_i^{0,926} \cdot D_i^{0,0825} \cdot v_i^{0,075})} \quad (4.16)$$

Aplicando-se a equação 4.16, determinam-se valores da rugosidade (ε_{it}) para vários valores do tempo (t), em seguida plotam-se os valores ε_{it} x t e determina-se a curva de variação de ε_{it} , que, como já se viu, é praticamente linear. O coeficiente de crescimento da rugosidade é igual à declividade desta reta assim obtida. Esta forma de procedimento fornece um valor aproximado do coeficiente de crescimento da rugosidade. No entanto, para fins práticos, conduz a resultados aceitáveis. A escolha da fórmula que deve ser usada depende do tipo de escoamento e da precisão que se deseja para o problema de dimensionamento da rede de distribuição de água em estudo. Para fins de comparação dos valores obtidos através do uso das várias fórmulas apresentadas neste item, será resolvido o Exemplo Ilustrativo 4.2.

Exemplo Ilustrativo 4.2

Para um certo trecho de uma rede de distribuição de água com 580 m de comprimento, têm-se os seguintes elementos:

- . água: $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$; $\text{pH} = 7,0$;
- . vazões: $Q_0 = 0,0636 \text{ m}^3/\text{s}$; $Q_{20} = 0,099 \text{ m}^3/\text{s}$;
- . tubulação: $D = 0,300 \text{ m}$; $\varepsilon_0 = 0,0003 \text{ m}$;
- . escoamento: $v_0 = 0,9 \text{ m/s}$; $v_{20} = 1,4 \text{ m/s}$.

Determinar os coeficientes de atrito f (Darcy-Weisbach) e C (Hazen-Williams) para o início ($t = 0$) e para o alcance do projeto ($t = 20$), usando todas as fórmulas disponíveis apresentadas neste capítulo.

Resolução:

- Cálculo da rugosidade para $t = 20$ anos: segundo Colebrook e White, equação 2.2:

$$\varepsilon_t = \varepsilon_0 + \alpha t$$

Para o cálculo de α , tem-se:

$$\text{pela equação 2.3: } \alpha = 2,54 e^{(1,9 - 0,5 \times 7,0)} \therefore \alpha = 0,513 \text{ mm/ano}$$

. pela equação 2.4: $\alpha = 10^{(3,3 - 0,5 \times 7,0)} \therefore \alpha = 0,631 \text{ mm/ano}$;

Nos cálculos seguintes será adotado: $\alpha = 0,631 \text{ mm/ano}$.

Tem-se: $\varepsilon_{20} = 0,300 + 0,631 \times 20 = 12,92 \text{ mm} = 0,01292 \text{ m}$.

- Cálculo do coeficiente de atrito (f):

. pela fórmula de von Kármán & Prandl, equação 4.6:

$$f_0 = [1,14 - 2\log(0,0003/0,300)]^{-2} \therefore f_0 = 0,0196$$

$$f_{20} = [1,14 - 2\log(0,1292/0,300)]^{-2} \therefore f_{20} = 0,0667$$

. pela fórmula de Swamee & Jain, equação 4.7:

$$R_{\infty} = \frac{0,9 \times 0,300}{10^{-6}} = 270000$$

$$R_{\varepsilon 20} = \frac{1,4 \times 0,300}{10^{-6}} = 420000$$

$$f_0 = 0,25 \{ \log[(0,27 \times 0,0003/0,300) + (5,74/270000^{0,9})] \}^{-2} = 0,0208$$

$$f_{20} = 0,25 \{ \log[(0,27 \times 0,0192/0,300) + (5,74/420000^{0,9})] \}^{-2} = 0,0669$$

. pela fórmula de Swamee & Jain Simplificada, equação 4.8:

$$f_0 = 0,25 [\log(0,27 \times 0,0003/0,300)]^{-2} = 0,0196$$

$$f_{20} = 0,25 [\log(0,27 \times 0,01292/0,300)]^{-2} = 0,0668$$

- Cálculo do coeficiente de Hazen-Williams (C):

. pela fórmula da equação 4.11 (f calculado pela fórmula de von Kármán & Prandl):

$$C_0 = \frac{[13,17 - 23,11 \log(0,0003/0,300)]^{1,08}}{0,9^{0,081} \cdot 0,300^{0,0891}} = 131,85$$

$$C_{20} = \frac{[13,17 - 23,11 \log(0,01292/0,300)]^{1,08}}{1,4^{0,081} \cdot 0,3^{0,0891}} = 65,69$$

pela fórmula da equação 4.12 (f calculado pela fórmula de Swamee & Jain):

$$C_o = \frac{29,7 \{ [\log(0,27 \times 0,0003 / 0,300) + (5,74 / 270000^{0,9})]^2 \}^{0,54}}{0,9^{0,081} \cdot 0,3^{0,0891}} = 127,55$$

$$C_{20} = \frac{29,7 \{ [\log(0,27 \times 0,01292 / 0,300) + (5,74 / 420000^{0,9})]^2 \}^{0,54}}{1,4^{0,081} \cdot 0,3^{0,0891}} = 65,55$$

pela fórmula da equação 4.13 (sendo f calculado pela fórmula de Swamee & Jain Simplificada):

$$C_o = \frac{29,7 [(\log 0,27 \times 0,0003 / 0,300)^2]^{0,54}}{0,9^{0,081} \cdot 0,3^{0,0891}} = 131,75$$

$$C_{20} = \frac{29,7 [(\log 0,27 \times 0,01292 / 0,300)^2]^{0,54}}{1,4^{0,081} \cdot 0,3^{0,0891}} = 65,61$$

- Comentários

Verifica-se que os valores dos coeficientes de crescimento da rugosidade (α) diferem um pouco entre si, isto deve ocorrer, possivelmente, por se tratarem de fórmulas empíricas desenvolvidas por pesquisadores em países distintos, usando águas que apesar de apresentarem o mesmo pH, podem não ter o mesmo comportamento quanto a agressão aos materiais das tubulações.

As fórmulas de von Kármán e Prandl, e Swamee & Jain, conduzem, praticamente, aos mesmos resultados, no cálculo do coeficiente de atrito f de Darcy-Weisbach.

O mesmo acontece com as fórmulas de von Kármán e Prandl, e Swamee & Jain Simplificada para o cálculo do coeficiente C de Hazen-Williams, havendo uma pequena diferença quando se usa a fórmula completa de Swamee e Jain.

Para tubos de ferro fundido novos, principalmente os de rugosidade inicial muito pequena, essas fórmulas do cálculo dos coeficientes de atrito podem se tornar impraticáveis, conduzindo a valores elevados para f e C, daí, Sharp e Walski (1988), sugerirem que se considere uma rugosidade inicial mínima de 0,3 mm;

Nos casos de tubos de PVC ou outros tubos lisos novos, sugere-se que, nos projetos, sejam adotados os valores dos coeficientes de atrito recomendados pelos fabricantes.

Após estas observações, verifica-se que, quando se considera a variação dos parâmetros das condições de contorno do projeto, o cálculo do coeficiente de atrito (f_R) ou do coeficiente de Hazen-Williams (C_R) pode ser feito pelas fórmulas de von Kármán & Prandl (Colebrook & White), Swamee & Jain ou Swamee & Jain Simplificada.

4.4 - ESTIMATIVA DO CRESCIMENTO DA POPULAÇÃO

4.4.1 - Preliminares

Dentre os vários métodos existentes para se fazer a estimativa do crescimento da população de uma comunidade, vistos na Revisão da Literatura, neste trabalho optou-se pelo “Método das Componentes Demográficas” e pelo “Método de Tendências Demográficas”, devido ao fato de terem sido estes os métodos adotados pelo IBGE na realização do Censo Demográfico de 2000 e se ter disponíveis os dados referentes não só a este Censo como a outros anteriores, os quais servirão de base para a realização de projeções das populações futuras das comunidades. No entanto, isto não significa que estes sejam métodos completos e definitivos, na realidade são métodos relativamente simples, cuja aplicação à estimativa das populações de determinados estados, cidades, zonas de centros urbanos, etc, pode apresentar discrepâncias enormes, principalmente quando ocorrem mudanças imprevisíveis na variação da população, tais como: mudanças da política do governo, implantação de uma grande indústria, criação de um pólo turístico, etc. Entretanto, as falhas que podem ocorrer na estimativa de populações quando se adotam estes métodos, poderão também ocorrer quando se adota qualquer um dos métodos existentes, pois nenhum deles tem condições de prever essas alterações populacionais bruscas e inesperadas.

4.4.2 - Estimativa do Crescimento da População

Através do Método de Tendência de Crescimento Demográfico pode-se fazer a estimativa do crescimento da população de uma Região, de um Estado ou de um Município do Brasil. As estimativas das populações do Brasil, nos últimos anos (2001, 2002, etc.) foram feitas pelo IBGE através deste método. Dispondo-se dessas estimativas, para o maior número de anos possível, pode-se usar um programa computacional e se determinar, através de uma ferramenta de “ajuste de curva” (por exemplo, a “linha de tendência” do Excel), uma função que represente a variação da estimativa da população do Brasil, em função do tempo, ou seja:

$$P_{(t)}^B = f(t) \quad (4.17)$$

sendo:

$P_{(t)}^B$ – função da estimativa da população do Brasil, para um ano “t” qualquer do alcance do projeto.

Esta função (equação 4.17) será considerada como “função base” para se determinarem às estimativas de crescimento das populações dos Estados, Cidades, Municípios e Bairros das cidades do Brasil. Ela é obtida a partir das estimativas das populações do Brasil, estimadas pelo IBGE para os anos subseqüentes a 2000, por meio de uma “curva de ajuste” (a que melhor se adaptar). A função da estimativa da população do Brasil, $P_{(t)}^B$, pode ser obtida considerando-se as estimativas das populações residentes, em 1º de julho de 2001 e 2002, segundo o Brasil (dadas na Tabela 4.1) e a população do Brasil calculada pelo Censo de 2000.

Tabela 4.1 – Estimativas das populações residentes, em 1º de julho de 2001 e 2002, segundo o Brasil.

(Fonte: IBGE, DPE, DPIS, GEVEP/ESPUP)

Ano	2001	2002
População	172.385.826	174.632.960

A população do Brasil calculada pelo Censo de 2000 é de 169.799.172 habitantes. Por meio de um “ajuste de curva” feito através da ferramenta “linha de tendência” do

Excel, a partir dos dados da Tabela 4.1 e da população do ano 2000, obteve-se a curva da estimativa da população do Brasil para um ano “t” qualquer do alcance do projeto, a partir do ano 2000, conforme a Figura 4.3.

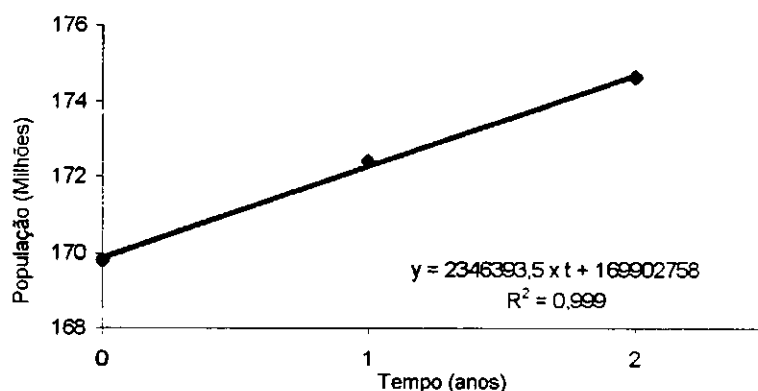


Figura 4.3 – Curva de ajuste População do Brasil versus Tempo

$$P_{(t)}^B = 169.902.758 + 2.346.393,5 t \quad (4.18)$$

sendo:

$P_{(t)}^B$ – função da estimativa da população do Brasil para um ano “t” qualquer do alcance do projeto.

Partindo-se da função da estimativa da população do Brasil (equação 4.18) e aplicando-se o Método de Tendência de Crescimento Demográfico, pode-se fazer a estimativa da população em um ano “t” do alcance do projeto, para qualquer Região, Estado, Cidade ou Bairro, do Brasil.

4.5 – VARIAÇÃO DA VAZÃO DO PROJETO

Nos projetos de redes de abastecimento de água a vazão de cálculo adotada é constante, ou seja, é considerada a vazão necessária para abastecer a comunidade ao final do alcance do projeto (conhecida como vazão nominal). Para se efetuar o dimensionamento da rede (cálculo dos diâmetros das tubulações) este procedimento é perfeitamente aceitável, pois os mesmos devem permitir o escoamento da água nas condições mais desfavoráveis possíveis, durante todo o alcance do projeto. Porém, desde o

início da fase de operação até o final do alcance do projeto, a vazão necessária varia bastante em relação àquela adotada no dimensionamento (vazão nominal). Uma avaliação mais precisa dos custos de operação do projeto tem, necessariamente, que considerar a variação da vazão, ao longo do período de operação do projeto.

4.5.1 - Variação da Vazão

No dimensionamento de projetos de abastecimento de água adota-se para “vazão de projeto” a vazão prevista para o dia de maior consumo e na hora de maior demanda, para se garantir o abastecimento à comunidade a qualquer hora do dia, durante todo o período de operação do projeto. Conforme foi visto na Revisão da Literatura, a vazão dos dias de maior consumo e na hora de maior demanda é dada pela equação 2.30. A taxa de consumo per capita pode ser determinada através de estimativas feitas levando-se em consideração vários fatores, tais como: classe de consumo (água para uso doméstico, comercial, etc), clima, padrão de vida da população, etc, de acordo com o que foi visto na Revisão da Literatura.

Na Tabela 2.4 foram apresentados valores dos consumos médios diários (consumo per capita) para vários tipos de uso e de usuários. Para fazer a estimativa da vazão nominal do projeto, o projetista pode adotar alguns daqueles valores, devendo considerar suas variações localizadas, por exemplo, variação do consumo de uma região para outra, de uma cidade para outra, numa mesma cidade pode haver variação de um bairro para outro, etc.

A variação do consumo per capita de um bairro para outro, em uma mesma cidade a ser abastecida, é muito importante na determinação da vazão necessária para o projeto.

Observa-se, portanto, que se dispõe atualmente de vários dados e fórmulas para se determinar o consumo per capita de determinada comunidade que deverá ser abastecida, porém, ressalte-se que, segundo se tem conhecimento, nenhum desses dados ou fórmulas disponíveis prevê ou determina uma forma de se estimar a variação do consumo per capita com o passar do tempo. Assim sendo, têm sido adotados valores constantes do consumo per capita durante todo o alcance do projeto.

A variação da população pode ser estimada de várias formas, conforme foi visto na Revisão da Literatura e no item 4.4 deste Capítulo. Foi mostrado que a estimativa da população pode ser feita por meio de fórmulas matemáticas que variam em função do

tempo. Desta forma, a vazão de projeto dada pela equação 2.30, quando se considera a variação da população em função do tempo, pode ser calculada pela fórmula:

$$Q_t = \frac{P_t \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot q}{86400} \quad (4.19)$$

sendo:

Q_t – função da vazão média do projeto no tempo t , em m^3/s ;

P_t – função da estimativa da população da comunidade a ser abastecida no ano t , em habitantes;

k_1 e k_2 – coeficientes (item 2.4.4), fixados pelo projetista;

q – taxa de consumo per capita, em $m^3/hab.dia$.

Verifica-se, pela equação 4.19, que a vazão média em um tempo t qualquer do alcance do projeto é uma função da população da comunidade a ser abastecida naquele tempo (P_t). Como esta população pode ser estimada em função do tempo t , conclui-se que a vazão também pode ser considerada como sendo uma função do tempo.

4.6 - VARIAÇÃO DO CUSTO UNITÁRIO DA ENERGIA (kWh)

4.6.1 - Preliminares

O custo da energia consumida na operação da estação de bombeamento deverá variar a cada ano, de acordo com a taxa de aumento anual da energia “ e ”. A análise da variação do custo de energia nos projetos de redes de abastecimento de água pode ser feita por meio da determinação do valor presente ou do valor futuro, correspondentes a todo o alcance do projeto. Quando se considera uma taxa de inflação ou de aumento anual de energia “ e ”, os valores dos custos unitários da energia que deverão ser pagos anualmente são dados por (juros compostos):

$$p_t = p_1(1 + e)^{(t - 1)} \quad (4.20)$$

sendo:

p_t – função do custo do kWh no ano t de operação do projeto;

p_1 – custo do kWh no primeiro ano de operação do projeto.

Neste caso, os valores de cada uma parcela dos custos anuais do kWh podem ser calculados pela equação 4.20, tem-se:

ano 1: p_1

ano 2: $p_2 = p_1(1 + e)$

ano 3: $p_3 = p_1(1 + e)^2$

$\vdots$ $\vdots$

ano $(t - 1)$: $p_{(t-1)} = p_1(1 + e)^{(t-2)}$

ano t : $p_t = p_1(1 + e)^{(t-1)}$

4.6.2 - Valor Presente dos custos anuais do kWh

O valor presente do custo do kWh, em um ano “t” de operação do projeto, em relação à data zero (início da entrada em operação do projeto), é calculado por:

$$p'_t = \frac{p_1(1 + e)^{(t-1)}}{(1 + i)^t} \quad (4.21)$$

sendo:

p'_t – função do valor presente do custo do kWh, em um ano “t” qualquer do alcance do projeto, em relação à data do início de operação do projeto;

i – taxa de juro real.

Os valores presentes de cada uma das parcelas dos custos anuais do kWh, em relação à data zero, são:

$$p'_1 = \frac{p_1}{(1 + i)}$$

$$p'_2 = \frac{p_1(1 + e)}{(1 + i)^2}$$

$\vdots$ $\vdots$

$$p'_{(t-1)} = \frac{p_1(1 + e)^{(t-2)}}{(1 + i)^{(t-1)}}$$

$$p_{(t-1)}^* = \frac{p_1(1+e)^{(t-2)}}{(1+i)^{(t-1)}}$$

$$p_t^* = \frac{p_1(1+e)^{(t-1)}}{(1+i)^t}$$

4.6.3 -Valor Futuro dos custos anuais do kWh

O valor futuro do custo do kWh , em um ano “t” de operação do projeto, em relação ao final do seu alcance, é dado por:

$$p_t^* = p_1(1+e)^{(t-1)}(1+i)^{(n-t)} \quad (4.22)$$

sendo:

p_t^* – função do valor futuro do custo do kWh em um ano “t”, em relação ao final do alcance do projeto;

n – alcance do projeto, em anos.

Os valores futuros de cada uma das parcelas dos custos anuais do kWh, a partir do primeiro ano de operação do projeto, em relação ao final do seu alcance, são:

$$p_1^* = p_1(1+i)^{(n-1)}$$

$$p_2^* = p_1(1+e)(1+i)^{(n-2)}$$

$$p_3^* = p_1(1+e)^2(1+i)^{(n-3)}$$

$$\vdots \quad \quad \quad \vdots$$

$$p_{(t-1)}^* = p_1(1+e)^{(t-2)}(1+i)$$

$$p_t^* = p_1(1+e)^{(t-1)}$$

4.7 - CUSTO UNITÁRIO DE OPERAÇÃO DA ESTAÇÃO DE BOMBEAMENTO

Nos projetos de abastecimento de água, quando são considerados variáveis os parâmetros das condições de contorno do projeto, o custo unitário anual de operação da estação de bombeamento é dado por:

$$C_{ht} = \frac{9,81}{\eta} n_{bt} p_t Q_t \quad (4.23)$$

sendo:

C_{ht} – função do custo unitário de operação da estação de bombeamento no ano t, em R\$/m.ano;

n_{bt} – função do número de horas de bombeamento no ano t, em horas;

η – rendimento esperado do conjunto motor-bomba, adimensional;

p_t – função do custo do kWh no ano “t”.

Q_t – função da vazão média de projeto do dia de maior consumo e na hora de maior demanda, no ano t, em m³/s.

A função do número de horas anual de bombeamento pode ser calculada pela fórmula:

$$n_{bt} = 365 n_{1t} \quad (4.24)$$

sendo:

n_{1t} – número de horas diárias de bombeamento no ano t.

O número de horas diárias de bombeamento (n_{1t}) pode ser considerado como sendo diretamente proporcional à vazão média do dia de maior consumo, no ano t, ou seja:

$$n_{1t} = K_B Q_t \quad (4.25)$$

sendo:

K_B – coeficiente de bombeamento, em h/(m³/s).

O coeficiente de bombeamento (K_B) é um parâmetro que corresponde ao número de horas de bombeamento que seria necessário para se manter o fornecimento de uma vazão de 1 m³/s. Portanto, a função que representa o número de horas anual de bombeamento (variando ano a ano com a vazão), é:

$$n_{bt} = 365 K_B Q_t \quad (4.26)$$

A função que representa o custo do kWh , no ano “t”, p_t , considerando-se uma taxa de aumento anual da energia “e”, é dada pela equação 4.20. A função que representa a vazão média de projeto, no ano “t”, Q_t , é obtida através da equação 4.19. Assim sendo, a função que representa o custo unitário anual de operação da estação de bombeamento, no ano “t” (equação 4.23), quando são considerados variáveis com o tempo os parâmetros número de horas de bombeamento (equação 4.26) e vazão média de projeto (equação 4.19) poderá ser escrita da seguinte forma:

$$C_{ht} = 3580,65 \cdot \frac{K_B}{\eta} \cdot Q_t^2 \cdot p_t (1 + e)^{(t-1)} \quad (4.27)$$

Sendo a vazão Q_t , calculada pela equação 4.19, uma função da população (P_t), e, como esta pode ser estimada através de uma função que varie só com o tempo, conclui-se que o custo unitário de operação da estação de bombeamento num tempo “t” qualquer do alcance do projeto (C_{ht}) pode ser representado por uma função cuja variável é o tempo de operação do projeto.

CAPÍTULO 5

ASPECTOS ECONÔMICOS - CUSTOS DOS PROJETOS

5.1 -ASPECTOS ECONÔMICOS

Nos projetos de redes de abastecimento de água, conforme já foi visto, têm-se os custos fixos, referentes à implantação das instalações do projeto (são os custos de investimento) e os custos variáveis, correspondentes à operação e manutenção da estação de bombeamento.

Os custos variáveis podem ser considerados como sendo as despesas efetuadas com o consumo de energia necessária para o bombeamento da água, requerida pelo consumo da população a ser atendida pelo projeto de abastecimento de água.

5.1.1 - Custos Fixos e Custos Variáveis

De uma forma geral, os custos fixos e os custos variáveis podem ser representados pelo diagrama de fluxo seguinte (Figura 5.1):

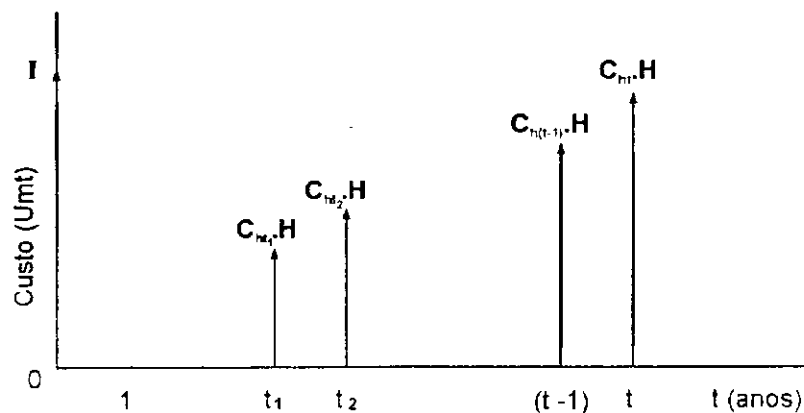


Figura 5.1 – Custos fixos e custos variáveis (com início na data t₁)

sendo:

I – custos fixos de investimento das instalações, realizados na data $t = 0$;

$C_{ht_1}, C_{ht_2}, \dots, C_{h(t-1)}, C_{ht}$ – custos unitários anuais de operação da estação de bombeamento, nos tempos $t_1, t_2, \dots, (t-1), t$;

H – altura manométrica de bombeamento.

No diagrama de fluxo da Figura 5.1, considerou-se que o início de operação do projeto ocorreu algum tempo após terem sido realizados os gastos de investimento (data $t = 0$). Caso não seja necessário fazer esta consideração, isto é, no caso de se considerar que as despesas com operação e manutenção comecem a ocorrer logo após a realização das despesas com investimento, pode-se ter o seguinte diagrama de fluxo (Figura 5.2):

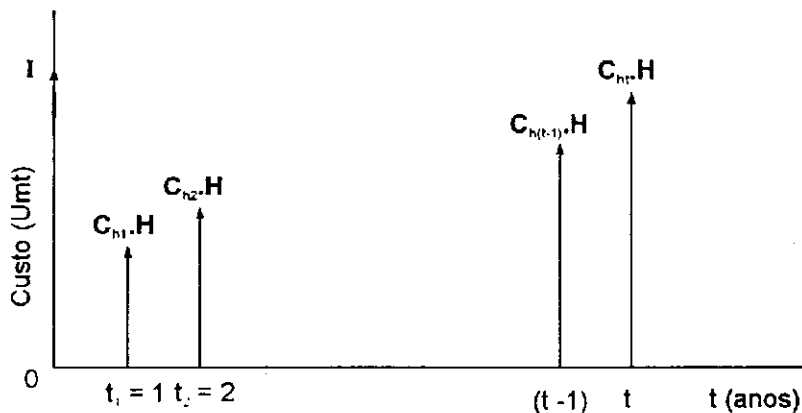


Figura 5.2 – Custos fixos e custos variáveis (com início na data $t_1 = 1$)

Onde: $C_{h1}, C_{h2}, \dots, C_{h(t-1)}, C_{ht}$ são custos unitários anuais com a operação da estação de bombeamento, nos anos 1, 2, ..., $(t-1), t$. Os valores de " C_{ht} " podem ser obtidos através das equações 4.23 e 4.27.

5.2 - CUSTOS DO PROJETO

Nos dimensionamentos dos projetos de redes de distribuição de água, quando se deseja obter uma solução que proporcione um custo mínimo global, que é um dos objetivos deste trabalho, a **função objetivo** a ser minimizada é constituída, geralmente, de duas parcelas: uma devido aos custos de investimento com a implantação das tubulações e a outra devido aos custos anuais de operação da estação de bombeamento. Podem surgir, em

alguns projetos, outros custos, mas nos projetos que foram analisados estes dois custos são os principais.

Os custos devido à implantação das tubulações são fixos (ocorrem no início da implantação do projeto), enquanto os custos com a operação da estação de bombeamento são variáveis (variam ano a ano, durante todo o período de operação do sistema de abastecimento). Como estes custos ocorrem em datas diferentes, para se fazer uma análise econômica do projeto é preciso transformá-los em uma forma de despesa unificada que permita a avaliação conjunta dos mesmos. Têm-se três formas clássicas de se analisar o custo de um projeto (considerando-se os custos fixos e variáveis):

- valor presente do projeto;
- valor futuro (montante) do projeto ao término do alcance;
- anuidades.

5.2.1 -Análise Econômica do Projeto Através do Valor Presente

Neste caso, considera-se que as despesas fixas com investimento (I), são realizadas na data $t = 0$, e a partir daí começam a ser realizadas as despesas variáveis com a operação da estação de bombeamento ($C_{ht} \cdot H$), as quais são anuais, devendo os seus valores serem convertidos à **valores presentes relativos à data $t = 0$** . Tem-se o seguinte diagrama de fluxo (Figura 5.3):

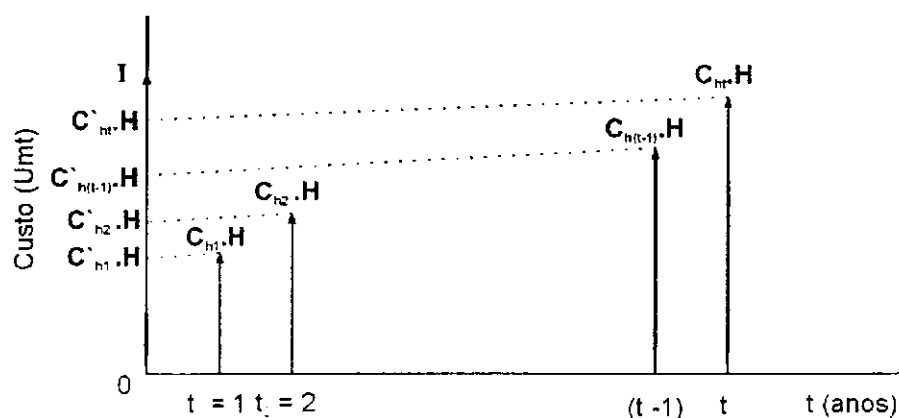


Figura 5.3 – Valores presentes dos custos variáveis

5.2.1.1 - Valores presentes dos custos unitários da operação de bombeamento

Considerando-se o efeito do aumento da energia segundo uma taxa “e”, os custos unitários anuais da operação da estação de bombeamento são obtidos da equação 4.23, tem-se:

$$\begin{aligned}
 C_{h1} &= \frac{9,81}{\eta} \cdot n_{b1} \cdot Q_1 \cdot p_1 \\
 C_{h2} &= \frac{9,81}{\eta} \cdot n_{b2} \cdot Q_2 \cdot p_1 (1+e) \\
 C_{h3} &= \frac{9,81}{\eta} \cdot n_{b3} \cdot Q_3 \cdot p_1 (1+e)^2 \\
 &\vdots \\
 C_{h(t-1)} &= \frac{9,81}{\eta} \cdot n_{b(t-1)} \cdot Q_{(t-1)} \cdot p_1 (1+e)^{(t-2)} \\
 C_{ht} &= \frac{9,81}{\eta} \cdot n_{bt} \cdot Q_t \cdot p_1 (1+e)^{(t-1)} \quad (5.1)
 \end{aligned}$$

Os valores presentes na data $t = 0$ (C'_{ht}) de cada uma das parcelas (C_{ht}) são:

$$\begin{aligned}
 C'_{h1} &= \frac{C_{h1}}{(1+i)} = \frac{9,81}{\eta} \cdot n_{b1} \cdot Q_1 \cdot \frac{p_1}{(1+i)} \\
 C'_{h2} &= \frac{C_{h2}}{(1+i)^2} = \frac{9,81}{\eta} \cdot n_{b2} \cdot Q_2 \cdot \frac{p_1(1+e)}{(1+i)^2} \\
 C'_{h3} &= \frac{C_{h3}}{(1+i)^3} = \frac{9,81}{\eta} \cdot n_{b3} \cdot Q_3 \cdot \frac{p_1(1+e)^2}{(1+i)^3} \\
 &\vdots \\
 C'_{h(t-1)} &= \frac{C_{h(t-1)}}{(1+i)^{(t-1)}} = \frac{9,81}{\eta} \cdot n_{b(t-1)} \cdot Q_{(t-1)} \cdot \frac{p_1(1+e)^{(t-2)}}{(1+i)^{(t-1)}} \\
 C'_{ht} &= \frac{C_{ht}}{(1+i)^t} = \frac{9,81}{\eta} \cdot n_{bt} \cdot Q_t \cdot \frac{p_1(1+e)^{(t-1)}}{(1+i)^t} \quad (5.2)
 \end{aligned}$$

- O valor presente (C'_{hT}) do custo unitário de operação da estação de bombeamento do projeto, na data $t = 0$, será:

$$C'_{hT} = \sum_{t=1}^n C'_{ht} = C'_{h1} + C'_{h2} + C'_{h3} + \dots + C'_{h(t-1)} + C'_{ht} \quad (5.3)$$

Substituindo-se os valores de C'_{ht} , tem-se:

$$C'_{hT} = \frac{9,81}{\eta} \cdot n_{b1} \cdot Q_1 \cdot \frac{p_1}{(1+i)} + \frac{9,81}{\eta} \cdot n_{b2} \cdot Q_2 \cdot \frac{p_1(1+e)}{(1+i)^2} + \frac{9,81}{\eta} \cdot n_{b3} \cdot Q_3 \cdot \frac{p_1(1+e)^2}{(1+i)^3} + \dots$$

$$+ \frac{9,81}{\eta} \cdot n_{b(t-1)} \cdot Q_{(t-1)} \cdot \frac{p_1(1+e)^{(t-2)}}{(1+i)^{(t-1)}} + \frac{9,81}{\eta} \cdot n_{bt} \cdot Q_t \cdot \frac{p_1(1+e)^{(t-1)}}{(1+i)^t} \quad \therefore \quad (5.4)$$

Para o alcance do projeto ($t = n$), a partir da equação 5.4 encontra-se:

$$C'_{hT} = \sum_{t=1}^n C'_{ht} = \frac{9,81}{\eta} \left[\sum_{t=1}^n (n_{bt} \cdot Q_t \cdot p'_t) \right] \quad (5.5)$$

sendo:

C'_{hT} – valor presente do custo unitário de operação do projeto, em R\$/m;

η – rendimento esperado do conjunto motor-bomba, adimensional;

n_{bt} – número de horas anual de bombeamento no ano t , equação 4.26;

Q_t – vazão do dia de maior consumo e na hora de maior demanda, no ano t , equação 4.19, em m^3/s ;

p'_t – valor presente do custo do kWh no ano t , equação 4.21, em R\$/kWh;

n – número de anos do alcance do projeto.

No caso, não muito comum e que apresenta maiores dificuldades de aplicação, de a taxa de energia não ser constante e variar durante os períodos do alcance do projeto, pode-se calcular o valor presente do custo unitário total pela equação 5.4, substituindo-se o valor de “e” (taxa constante do aumento de energia) por $e_1, e_2, e_3, \dots, e_t$ (valores variáveis das taxas de energia para cada ano do alcance do projeto).

5.2.1.2 - Valor presente (C'_T) dos custos totais do projeto

O valor presente dos custos totais do projeto (investimento mais operação da estação de bombeamento), será:

$$C'_T = I + \frac{9,81}{\eta} \left[\sum_{t=1}^n (n_{bt} \cdot Q_t \cdot p'_t) \right] H \quad (5.6)$$

Considerando-se que n_{bt} varie segundo a equação 4.26, a equação 5.6 passa a ser:

$$C'_T = I + 3580,65 \frac{K}{\eta} \left[\sum_{t=1}^n (Q_t^2 \cdot p'_t) \right] H \quad (5.7)$$

5.2.1.3 - Caso particular do valor presente dos custos unitários de operação da estação de bombeamento

Caso sejam constantes os parâmetros número de horas de bombeamento ($n_{bt} = n_b$) e vazão ($Q_1 = Q_2 = Q_3 = \dots = Q_t = Q$), o valor presente dos custos unitários de operação, durante todo o alcance do projeto ($t = n$), passará a ser (equação 5.4):

$$C'_{ht} = \frac{9,81}{\eta} \cdot n_b \cdot Q \cdot \frac{p_1}{(1+i)} + \frac{9,81}{\eta} \cdot n_b \cdot Q \cdot \frac{p_1(1+e)}{(1+i)^2} + \dots + \frac{9,81}{\eta} \cdot n_b \cdot Q \cdot \frac{(1+e)^{(n-1)}}{(1+i)^n}$$

Encontra-se:

$$C'_{hT} = \frac{9,81}{\eta} \cdot n_b \cdot Q \cdot p_1 \left[\frac{(1+i)^n - (1+e)^n}{(1+i) - (1+e)} \cdot \frac{1}{(1+i)^n} \right] \quad (5.8)$$

Considerando-se:

$$C_h = \frac{9,81}{\eta} \cdot n_b \cdot Q \cdot p_1$$

$$F_a = \frac{(1+i)^n - (1+e)^n}{(1+i) - (1+e)} \cdot \frac{1}{(1+i)^n}$$

sendo:

C_h – custo unitário anual de operação da estação de bombeamento, quando n_b e Q são constantes, em R\$/m.ano;

F_a – fator de atualização de energia, para o alcance (“t” anos) do projeto.

Verifica-se que este fator de atualização coincide com o apresentado na Revisão da Literatura, equação 2.36, logo, tem-se:

$$C'_{ht} = C_h.F_a \quad (5.9)$$

5.2.1.4 - Caso particular do valor presente dos custos totais do projeto

O valor presente dos custos totais do projeto, no caso particular de serem constantes o número de horas de bombeamento e a vazão, será:

$$C'_T = I + C_h.F_a.H \quad (5.10)$$

A equação 5.10 fornece o **valor presente dos custos totais** do projeto, ou seja, custos com investimento (I) e custos com energia ($C_h.F_a.H$), realizados durante todo o alcance do projeto, quando são considerados constantes os parâmetros horas de bombeamento e vazão. Esta é a equação usada por Gomes (2002), no método PNL2002. Verifica-se, portanto, que se trata de uma solução para um caso particular, considerando condições que dificilmente podem ocorrer em um projeto de abastecimento de água, durante toda a sua execução. De acordo com Gomes (2002) a equação 5.10 pode ser utilizada considerando valores de Q e de n_b , que representem, respectivamente, valores médios da vazão requerida pela rede e número anual de horas de bombeamento, ao longo do alcance do projeto.

5.2.2 - Análise Econômica do Projeto Através do Valor Futuro (Montante)

Neste caso, tanto os custos fixos como os variáveis são convertidos para a data do término do alcance do projeto, é o chamado **valor futuro ou montante** do projeto. Tem-se o diagrama de fluxo da Figura 5.4

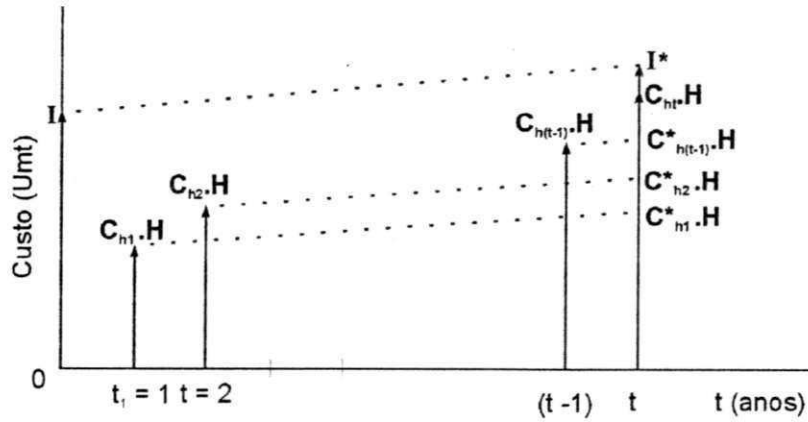


Figura 5.4 – Valores futuros dos custos do projeto

5.2.2.1 - Valores futuros dos custos unitários de operação da estação de bombeamento

Os valores dos custos unitários de operação da estação de bombeamento (C_{ht}) são os mesmos do item anterior (equações 5.1).

Os valores futuros na data “t” igual ao alcance do projeto “n”, de cada uma dos valores C_{ht} , são:

$$\begin{aligned}
 C_{h1}^* &= C_{h1}(1+i)^{(n-1)} = \frac{9,81}{\eta} \cdot n_{b1} \cdot Q_1 \cdot p_1 \cdot (1+i)^{(n-1)} \\
 C_{h2}^* &= C_{h2}(1+i)^{(n-2)} = \frac{9,81}{\eta} \cdot n_{b2} \cdot Q_2 \cdot p_1(1+e) \cdot (1+i)^{(n-2)} \\
 &\vdots \\
 C_{h(t-1)}^* &= C_{h(t-1)}(1+i) = \frac{9,81}{\eta} \cdot n_{b(t-1)} \cdot Q_{(t-1)} \cdot p_1(1+e)^{(t-2)} \cdot (1+i)^{[n-(t-1)]} \\
 C_{ht}^* &= C_{ht} = \frac{9,81}{\eta} \cdot n_{bt} \cdot Q_t \cdot p_1(1+e)^{(t-1)}(1+i)^{(n-t)}
 \end{aligned} \tag{5.11}$$

O valor futuro (C_{hT}^*) do custo unitário de operação do projeto, na data “t” igual ao alcance do projeto “n”, será:

$$C_{hT}^* = C_{h1}^* + C_{h2}^* + \dots + C_{h(t-1)}^* + C_{ht}^* \tag{5.12}$$

Substituindo-se os valores de C_{ht}^* (equações 5.11), tem-se:

$$C_{hT}^* = \frac{9,81}{\eta} \cdot n_{b1} \cdot Q_1 \cdot p_1 (1+i)^{(n-1)} + \frac{9,81}{\eta} \cdot n_{b2} \cdot Q_2 \cdot p_1 (1+e) \cdot (1+i)^{(n-2)} + \dots +$$

$$\frac{9,81}{\eta} \cdot n_{b(t-1)} \cdot Q_{(t-1)} \cdot p_1 (1+e)^{(t-2)} \cdot (1+i)^{[n-(t-1)]} +$$

$$\frac{9,81}{\eta} \cdot n_{bt} \cdot Q_t \cdot p_1 (1+e)^{(t-1)} (1+i)^{(n-t)} \quad \therefore \quad (5.13)$$

$$C_{hT}^* = \frac{9,81}{\eta} \left[\sum_{t=1}^n (n_{bt} \cdot Q_t \cdot p_t^*) \right] \quad (5.14)$$

sendo:

C_{ht}^* – valor futuro do custo unitário de operação do projeto na data t, em R\$/m;

Q_t – vazão do dia de maior consumo e na hora de maior demanda no ano t, equação 4.19, em m³/s;

p_t^* – valor futuro do custo do kWh no ano t, equação 4.22, em R\$/kWh.

5.2.2.2 - Valor Futuro dos Custos de Investimento

O valor futuro dos custos de investimento na data t igual ao alcance do projeto, é calculado diretamente por meio das fórmulas de juros compostos (considerando-se a taxa de juros i), tem-se :

$$I_t^* = i(1+i)^t \quad (5.15)$$

5.2.2.3 - Valor futuro dos custos totais do projeto

O valor futuro dos custos totais do projeto (C_T^*), no ano t, será:

$$C_T^* = I_t^* + C_{hT}^* H \quad \therefore \quad (5.16)$$

$$C_T^* = I(1+i)^t + \frac{9,81}{\eta} \left[\sum_{t=1}^n (n_{bt} \cdot Q_t \cdot p_t^*) \right] H \quad (5.17)$$

Caso seja considerado que n_{bt} varie com a vazão segundo a equação 4.26, a equação 5.17 passará a ser:

$$C_T^* = I(1+i)^t + 3580,65 \cdot \frac{K}{\eta} \left[\sum_{t=1}^n (Q_t^2 \cdot p_t^*) \right] H \quad (5.18)$$

5.2.2.4 - Caso particular do valor futuro dos custos unitários de operação

No caso de serem constantes o número de horas de bombeamento e a vazão do projeto ($n_{bt} = n_b$ e $Q_1 = Q_2 = \dots = Q_t$), o valor futuro dos custos unitários de operação, durante todo o alcance do projeto ($t = n$), passará a ser (equação 5.13):

$$\begin{aligned} C_{hT}^* &= \frac{9,81}{\eta} \cdot n_b \cdot Q \cdot p_1 (1+i)^{(n-1)} + \frac{9,81}{\eta} \cdot n_b \cdot Q \cdot p_1 (1+e) \cdot (1+i)^{(n-2)} + \dots + \\ &\frac{9,81}{\eta} \cdot n_b \cdot Q \cdot p_1 (1+e)^{(n-2)} (1+i) + \frac{9,81}{\eta} \cdot n_b \cdot Q \cdot p_1 (1+e)^{(n-1)} \quad \therefore \\ C_{hT}^* &= \frac{9,81}{\eta} \cdot n_b \cdot Q \cdot p_1 \left[\frac{(1+i)^n - (1+e)^n}{(1+i) - (1+e)} \right] \end{aligned} \quad (5.19)$$

Considerando-se:

$$C_h = \frac{9,81}{\eta} \cdot n_b \cdot Q \cdot p_1$$

$$F_a^* = \frac{(1+i)^n - (1+e)^n}{(1+i) - (1+e)}$$

sendo:

F_a^* – fator de correção da energia, para o alcance do projeto (n anos).

Tem-se:

$$C_{hT}^* = C_h \cdot F_a^* \quad (5.20)$$

5.2.2.5 - Caso particular do valor futuro dos custos totais do projeto

O valor futuro dos custos totais do projeto, no caso particular de serem constantes o número de hora de bombeamento e a vazão, será:

$$C_T^* = I(1+i)^t + C_h \cdot F_a^* \cdot H \quad (5.21)$$

Observa-se que:

- o termo $I(1+i)^t$ é o valor futuro dos custos de investimento (I);
- o termo $C_h F_a^* H$ é o valor futuro dos custos de operação da estação de bombeamento, para uma altura manométrica H;
- o coeficiente de correção (F_a^*) só deve ser empregado no caso particular de se desejar calcular o valor futuro de uma série de custos anuais sujeita às taxas constantes de juros (i) e de energia (e), quando também são constantes os parâmetros do projeto número de horas de bombeamento e vazão.

5.2.3 - Análise Econômica do Projeto Através de Pagamentos Anuais

A análise econômica do projeto através de pagamentos anuais (ou anuidades) pode ser representada no diagrama de fluxo da figura 5.5.

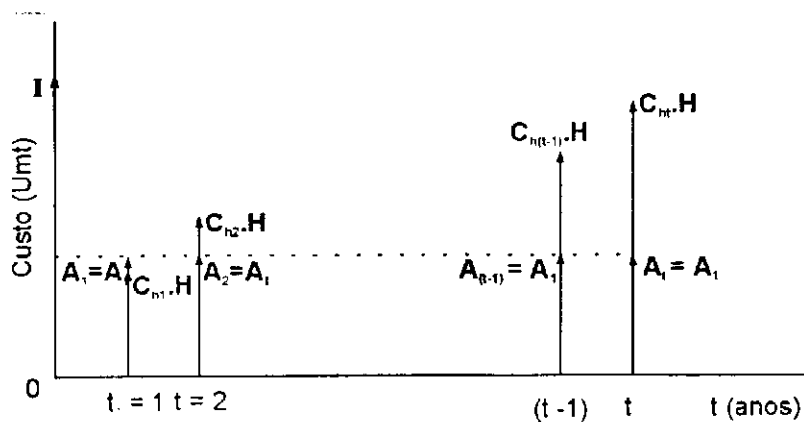


Figura 5.5 – Custos anuais de investimento e de operação

As despesas fixas com investimento (I) serão transformadas em uma série uniforme de pagamentos anuais (A_1) e as despesas variáveis com energia (C_{ht}) podem ser

calculadas diretamente, por meio de juros compostos (o efeito da inflação ou do aumento de energia também é considerado), sendo, posteriormente, transformadas em anuidades.

5.2.3.1 - Cálculo dos pagamentos anuais devido aos custos de investimento e de operação

Verifica-se pela Figura 5.5 que o custo anual para um ano “t” qualquer do alcance do projeto pode ser dado por:

$$C_{\text{anual}} = A_I + C_{\text{ht}} \cdot H \quad (5.22)$$

sendo:

A_I – anuidade devido aos custos de investimento ;

$C_{\text{ht}} \cdot H$ – custos de operação do projeto, no ano “t”.

- Determinação dos pagamentos anuais devido aos custos de investimentos (I):

Os pagamentos anuais constantes (anuidades: A_I) devido aos custos de investimento, podem ser determinados através dos seus valores futuros.

No diagrama de fluxo da Figura 5.6, estão indicados os valores futuros das anuidades (A_I^*) e o valor futuro dos custos de investimento (I^*).

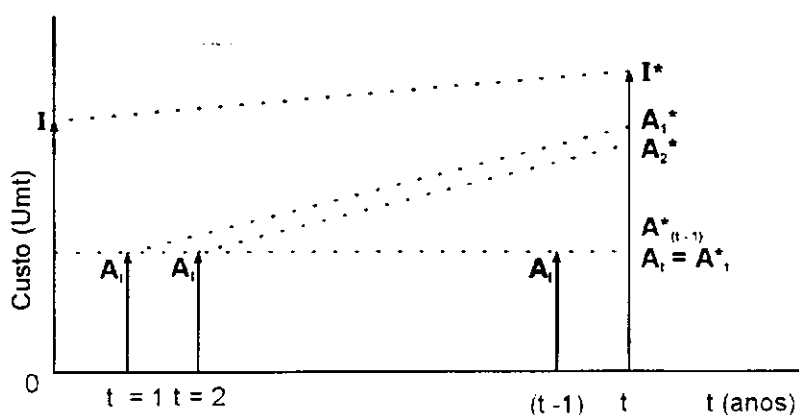


Fig. 5.6 – Anuidades dos custos de investimento

O valor futuro do custo de investimento na data “t”, é:

$$I^* = I(1+i)^t$$

Os valores futuros das anuidades, na data "t", são:

$$A_1^* = A_1(1+i)^{(t-1)}$$

$$A_2^* = A_1(1+i)^{(t-2)}$$

$$\vdots \quad \quad \vdots$$

$$A_{(t-1)}^* = A_1(1+i)$$

$$A_t^* = A_1$$

Sabe-se que o valor futuro dos custos de investimento (I^*) deve ser igual à soma dos valores futuros de suas respectivas anuidades, tem-se:

$$I^* = A_1^* + A_2^* + \dots + A_{(t-1)}^* + A_t^* \quad \therefore$$

$$I(1+i)^t = A_1(1+i)^{(t-1)} + A_1(1+i)^{(t-2)} + \dots + A_1(1+i) + A_1 \quad (5.23)$$

Para o alcance do projeto, $t = n$, tem-se:

$$I(1+i)^n = A_1(1+i)^{(n-1)} + A_1(1+i)^{(n-2)} + \dots + A_1(1+i) + A_1$$

Logo, encontra-se:

$$A_1 = I \cdot \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (5.24)$$

ou, $A_1 = I \cdot a$

sendo:

A_1 – custo fixo de amortização anual de investimento (anuidade correspondente aos custos de investimento);

I – custos de investimento do projeto (na data $t = 0$);

$a = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$ – fator de amortização anual do capital.

Observa-se que este fator de amortização anual do capital coincide com o apresentado na Revisão da Literatura, equação 2.34.

Verifica-se que, para se transformar as despesas efetuadas com investimento na data $t = 0$ em uma série uniforme de pagamentos A_I , basta multiplicar essas despesas com investimento (I) pelo fator de amortização anual de capital (a).

- Determinação dos pagamentos anuais devido aos custos de operação ($C_{ht} \cdot H$)

Os custos unitários anuais de operação (C_{ht}) indicados na Figura 5.5, conforme já se viu, são calculados pelas equações 5.1.

- Valor de cada pagamento anual:

Portanto, segundo a equação 5.5, o custo anual (C_{anual}) para um ano qualquer “t” do alcance do projeto, será:

$$C_{anual} = I \cdot \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} + \left[\frac{9,81}{\eta} \cdot n_{br} \cdot Q_t \cdot p_1 (1+e)^{(t-1)} \right] H \quad (5.25)$$

A equação 5.25 fornece o valor do pagamento anual a ser efetuado em um ano “t” qualquer do alcance do projeto ($t = 1, 2, 3, \dots, n$, sendo “n” o alcance do projeto). Na realidade este tipo de pagamento é o que aconteceria, caso o custo de investimento (I) fosse pago em n parcelas iguais à anuidade (A_I), e os custos com energia variassem a cada ano de acordo com a taxa de aumento da energia (e). Entretanto, quando se deseja determinar (para fins de comparação dos custos do projeto) os valores de pagamentos anuais constantes (anuidades) para todos os custos do projeto, os custos unitários com energia também devem ser transformados numa série uniforme de pagamentos equivalentes.

5.2.3.2 - Cálculo dos pagamentos em anuidades devido aos custos de investimento e de operação

Quando se pretende determinar o valor da parcela correspondente ao pagamento do projeto em parcelas anuais iguais (anuidades), tanto os custos com investimento quanto os custos com energia devem ser transformados em séries uniformes de pagamentos. A

No caso de se desejar calcular o custo anual constante de operação num ano qualquer “t”, os valores dos pagamentos anuais de energia ($C_{h1}H, C_{h2}H, \dots, C_{h(t-1)}H, C_{ht}H$) devem ser transformados em anuidades equivalentes (uma série uniforme de pagamentos).

Tem-se o seguinte diagrama de fluxo (figura 5.7):

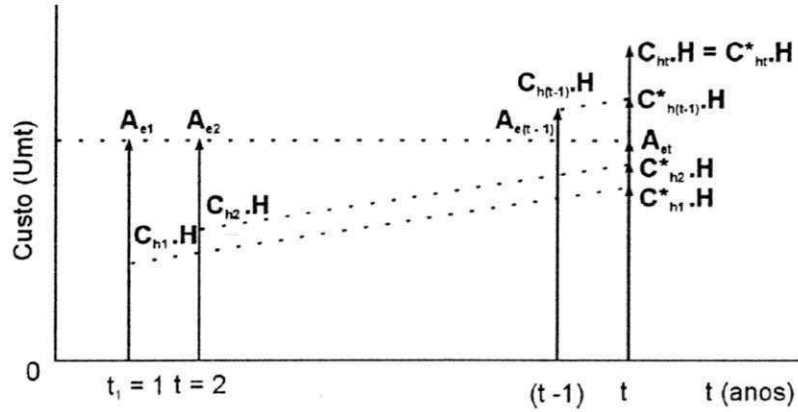


Figura 5.7 – Transformação dos custos de operação em anuidades

Considera-se, na Figura 5.7:

$A_{e1} = A_{e2} = \dots = A_{e(t-1)} = A_{et} = A_e =$ anuidades correspondentes aos custos de operação.

O valor futuro dos custos com a operação (C_e^*), é igual a soma dos valores futuros dos custos anuais de operação, tem-se:

$$C_e^* = [C_{h1}^* + C_{h2}^* + \dots + C_{h(t-1)}^* + C_{ht}^*]H \quad (5.26)$$

Como os valores futuros dos custos unitários de operação (C_{ht}^*) são dados pelas equações 5.11, substituindo-se seus valores na equação 5.26, obtém-se:

$$C_e^* = \left[\frac{9,81}{\eta} n_{b1} \cdot Q_1 \cdot p_1 (1+i)^{(t-1)} + \frac{9,81}{\eta} n_{b2} \cdot Q_2 \cdot p_1 (1+e) \cdot (1+i)^{(t-2)} + \dots + \frac{9,81}{\eta} n_b \cdot Q_t \cdot p_1 (1+e)^{(t-1)} \right] H$$

$$C_e^* = \frac{9,81}{\eta} \left[\sum_{t=1}^n (n_{bt} \cdot Q_t \cdot p_t^*) \right] H \quad (5.27)$$

Os valores futuros dos termos da série uniforme (A_{et}) correspondentes aos custos de operação, são:

$$A_{e1}^* = A_e (1+i)^{(n-1)}$$

$$A_{e2}^* = A_e (1+i)^{(n-2)}$$

$$\vdots \quad \vdots$$

$$A_{e(t-1)}^* = A_e (1+i)$$

$$A_{et}^* = A_e$$

Seja A_e^* o valor futuro total das anuidades dos custos de operação, tem-se:

$$A_e^* = \sum A_{et}^* = A_{e1}^* + A_{e2}^* + \dots + A_{e(t-1)}^* + A_{et}^* \therefore$$

$$A_e^* = A_e (1+i)^{(n-1)} + A_e (1+i)^{(n-2)} + \dots + A_e (1+i) + A_e \therefore$$

$$A_e^* = A_e \cdot \frac{(1+i)^n - 1}{i} \quad (5.28)$$

Deve-se ter: $A_e^* = C_e^*$, logo:

$$A_e \cdot \frac{(1+i)^n - 1}{i} = \frac{9,81}{\eta} \left[\sum_{t=1}^n (n_{bt} \cdot Q_t \cdot p_t^*) \right] H \quad \therefore$$

$$A_e = \frac{9,81}{\eta} \cdot \frac{i}{(1+i)^n - 1} \left[\sum_{t=1}^n (n_{bt} \cdot Q_t \cdot p_t^*) \right] H \quad (5.29)$$

A equação 5.29 representa o valor constante das anuidades equivalentes aos custos de operação quando a energia aumenta de acordo com uma taxa “e”.

Os valores constantes das anuidades devido ao pagamento das despesas de investimento e de operação podem ser representados através do diagrama de fluxo seguinte (Figura 5.8)

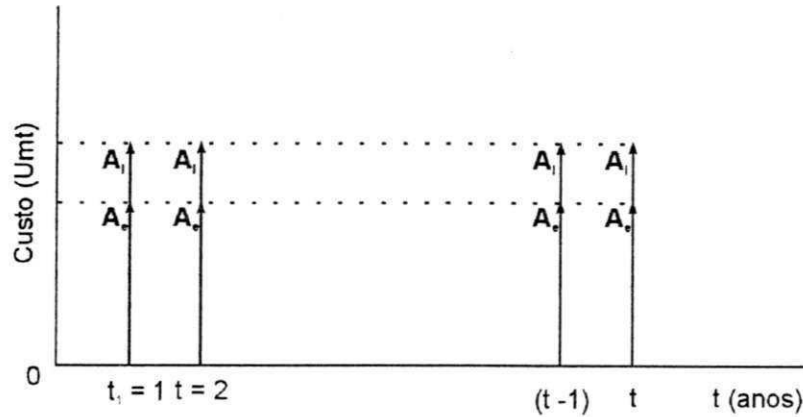


Figura 5.8 – Pagamentos em anuidades (séries uniformes)

Os pagamentos sendo feitos em parcelas anuais constantes (anuidades), para qualquer ano (t) do alcance, têm-se:

$$A = A_I + A_e$$

sendo:

A_I – anuidade devido aos custos fixos (equação 5.24);

A_e – anuidade devido aos custos de operação (equação 5.29).

Logo, tem-se:

$$A = I \cdot \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} + \frac{9,81}{\eta} \cdot \frac{i}{(1+i)^n - 1} \cdot \left[\sum_{t=1}^n n_{bt} \cdot Q_t \cdot p_t^* \right] H \quad (5.30)$$

No caso de se ter uma variação de n_{bt} conforme a equação 4.26, a equação 5.30 passa a ser:

$$A = I \cdot \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} + \frac{3580,65}{\eta} \cdot \frac{i}{(1+i)^n - 1} \cdot \left[\sum_{t=1}^n (Q_t^2 \cdot p_t^*) \right] H \quad (5.31)$$

5.2.3.3 - Caso particular das anuidades

Nos casos em que são constantes o número de hora de bombeamento ($n_{bt} = n_b$) e a vazão ($Q_1 = Q_2 = \dots = Q_t = Q$), a equação 5.29 se tornará:

$$A_e = \frac{9,81}{\eta} \cdot \frac{i}{(1+i)^n - 1} \cdot n_b \cdot Q \cdot \left(\sum_{t=1}^n p_t^* \right) H$$

sendo:

$$\sum_{t=1}^n p_t^* = p_1(1+i)^{(n-1)} + p_1(1+e) \cdot (1+i)^{(n-2)} + \dots + p_1(1+e)^{(n-2)} \cdot (1+i) + p_1(1+e)^{(n-1)}$$

$$\sum_{t=1}^n p_t^* = p_1 \left[\frac{(1+i)^n - (1+e)^n}{(1+i) - (1+e)} \right]$$

Logo:

$$A_e = \frac{9,81}{\eta} \cdot n_b \cdot Q \cdot p_1 \left[\frac{(1+i)^n - (1+e)^n}{(1+i) - (1+e)} \right] \left[\frac{i}{(1+i)^n - 1} \right] H \quad (5.32)$$

Tomando-se:

$$C_a = \left[\frac{(1+i)^n - (1+e)^n}{(1+i) - (1+e)} \right] \left[\frac{i}{(1+i)^n - 1} \right]$$

sendo:

C_a – coeficiente de equivalência.

Verifica-se que este fator de equivalência coincide com o apresentado na Revisão da Bibliografia, equação 2.38.

Tem-se:

$$A_e = C_h \cdot C_a \cdot H \quad (5.33)$$

Portanto, o valor das anuidades devido aos custos de investimento e de operação, será:

$$A = A_I + A_e \quad \therefore$$

$$A = I \cdot a + C_h \cdot C_a \cdot H \quad (5.34)$$

Na equação 5.34, o termo $I \cdot a$ é a parcela da anuidade devido aos custos com investimento e $C_h \cdot C_a \cdot H$ é a parcela devido aos custos com a operação do projeto, no caso particular de serem constantes o número de horas de bombeamento e a vazão do projeto.

CAPÍTULO 6

DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA, CONSIDERANDO VARIÁVEIS AS CONDIÇÕES DE CONTORNO DO PROJETO. DESENVOLVIMENTO DO PROGRAMA COMPUTACIONAL

6.1 - PRELIMINARES

É conveniente ressaltar mais uma vez, que o objetivo deste trabalho é se estudar a variação dos parâmetros que determinam as condições de contorno de um projeto de sistemas de abastecimento de água, desenvolver um método de otimização destes sistemas e um programa computacional de otimização, que possibilite a resolução de problemas de dimensionamento econômico de redes de distribuição de água através do método desenvolvido.

Este estudo foi feito através da aplicação das fórmulas vistas nos capítulos 4 e 5, para a determinação da variação dos parâmetros: rugosidade, perda de carga, população, consumo de água, vazão do projeto e coeficientes econômicos. Estes parâmetros, nos estudos apontados na revisão de literatura, foram considerados fixos nos métodos de dimensionamento de redes de abastecimento de água.

6.2 - DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO

Foi desenvolvido um método de dimensionamento econômico de redes de distribuição de água, procurando-se determinar o custo ótimo do projeto, ou seja, minimizar os custos totais com a implantação das instalações da rede de distribuição, mais os de operação da estação de bombeamento, quando são variáveis os parâmetros das condições de contorno do projeto. Neste estudo não foi incluída a componente dos custos dos equipamentos eletromecânicos.

Por se tratar da realização de um método de otimização onde, conforme já foi justificado, optou-se pelo emprego da Programação Não Linear, através do algoritmo do Gradiente Reduzido Generalizado (GRG2), no desenvolvimento do método foi adotada uma seqüência semelhante à do método PNL2000 (Gomes, 2002), apresentado na Revisão da Literatura. Desta forma, a metodologia adotada para o desenvolvimento do Método também é constituída de duas etapas: primeira etapa: dimensionamento inicial e segunda etapa: dimensionamento definitivo.

Para o desenvolvimento do método, foi adotada a seqüência do fluxograma da figura 6.1.

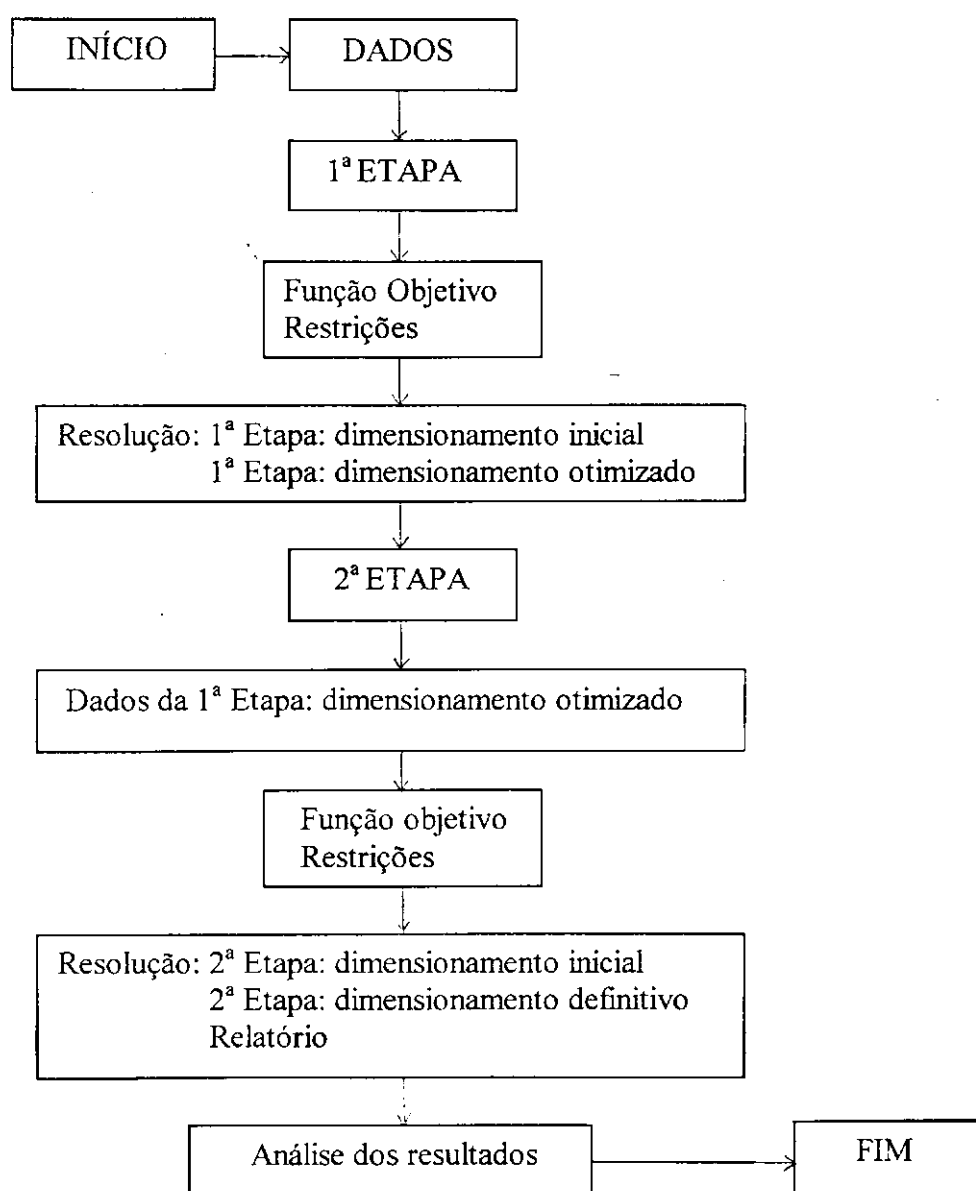


Figura 6.1 – Fluxograma esquemático do método desenvolvido neste trabalho

6.2.1 - Primeira Etapa: Dimensionamento Inicial

A Primeira Etapa do Método é, na realidade, um pré-dimensionamento do projeto, nela os diâmetros e as vazões dos trechos e a cota piezométrica de alimentação, são considerados variáveis que serão determinadas no processo de otimização. Posteriormente, executa-se a segunda etapa do método, ou seja, o dimensionamento final, que consiste em se fazer um ajuste da solução inicial obtida na primeira etapa.

No dimensionamento econômico de redes de distribuição de água, como já se viu, são considerados dois custos: custo de implantação da rede e custo de operação da estação de bombeamento (energético). Os custos de implantação da rede são os gastos realizados com as tubulações e respectivas instalações, são os chamados custos fixos ou de investimento. Já os custos de operação da rede são representados pelos custos energéticos, que são variáveis e incidirão ao longo do alcance do projeto. Estes dois gastos ocorrem em tempos diferentes, daí, é necessário que sejam feitas as conversões dos gastos fixos em variáveis ou o inverso, dos gastos variáveis em fixos.

Neste trabalho optou-se pela transformação dos custos variáveis em fixos, pois ao se determinar um custo mínimo total do projeto, em termos do seu valor presente, se tem uma idéia real do valor atual do projeto, o que poderá facilitar a sua análise por parte dos representantes dos órgãos financiadores, uma vez que os recursos disponíveis para financiamento são, geralmente, expressos em valores presentes.

Conforme apresentado nos capítulos anteriores, as funções que representam os parâmetros das condições de contorno de um projeto de sistemas de abastecimento de água são, em sua maioria, não lineares, desta forma optou-se, no processo de otimização, por se usar o modelo matemático da Programação Não Linear, citado na Revisão da Literatura.

Para o desenvolvimento do Método é necessário que sejam formulados uma Função Objetivo e um conjunto de Restrições hidráulicas inerentes ao problema de dimensionamento de redes de distribuição de água, necessárias ao desenvolvimento do processo de otimização.

6.2.1.1 - Função Objetivo

Considerando-se variáveis os parâmetros que definem as condições de contorno do projeto, a função objetivo que deverá ser minimizada, para fornecer o custo total

mínimo do projeto de abastecimento (custos de implantação da rede mais custos de operação da estação de bombeamento), pode ser a seguinte:

$$C(D_i, Q_{it}, H) = \sum_{i=1}^m L_i F(P_{D_i}) + \left(\sum_{t=1}^n C'_{ht} \right) H \quad (6.1)$$

sendo:

$C(D_i, Q_{it}, H)$ – valor presente do custo total do sistema de abastecimento;

D_i – diâmetro do trecho i da rede, em m;

Q_{it} – vazão do trecho i da rede no ano t , em m^3/s ;

H – altura de bombeamento (altura manométrica), em m;

m – número de trechos da rede, adimensional;

L_i – comprimento do trecho i da rede, em m;

$F(P_{D_i})$ – função de variação do preço unitário da tubulação do trecho i com o seu diâmetro (D_i), em R\$/m;

n – alcance do projeto, em anos;

C'_{ht} – valor presente do custo unitário de operação da estação de bombeamento no ano t , em R\$/m.

As **variáveis de decisão** são os diâmetros (D_i) – considerados inicialmente como variável contínua e a altura manométrica de alimentação (H).

As **vazões** nos trechos (Q_{it}) são variáveis de estado.

O termo $\sum_{i=1}^m L_i F(P_{D_i})$ representa os custos com a implantação das instalações de todo o projeto, sendo que a função de variação do preço unitário da tubulação, $F(P_{D_i})$, com o seu diâmetro (D_i), pode ser estabelecida através de programas computacionais de “ajuste de curvas”.

O termo $\left(\sum_{t=1}^n C'_{ht} \right) H$ representa o valor presente dos custos com a operação da estação de bombeamento durante todo o alcance do projeto (n anos), sendo “ C'_{ht} ” a função do valor presente do custo unitário de operação da estação de bombeamento no ano “ t ” (equações 5.2) e $\sum_{t=1}^n C'_{ht}$ é o valor presente do custo unitário total de operação (equação 5.5).

Neste caso os parâmetros n_{bt} , Q_t e p_t são funções que variam com o tempo, sendo, de acordo com o que foi visto no capítulo 5, determinadas pelas funções dadas pelas equações 4.26, 4.19, 4.21, respectivamente.

Tendo em vista que a estimativa da população em um ano t do alcance do projeto (P_t), pode ser determinada através de uma função do tempo, como foi visto no item 4.4, verifica-se que o valor presente do custo unitário total de operação da estação de bombeamento ($\sum_{t=1}^n C'_{ht}$) é uma função do tempo " t " (ano em que se deseja calcular os referidos custos).

A função objetivo a ser minimizada (equação 6.1) passará a ser:

$$C(D_i, Q_{it}, H) = \sum_{t=1}^m L_t F(P_{D_t}) + \frac{9,81}{\eta} \left[\sum_{t=1}^n (n_{bt} \cdot Q_{it} \cdot p_t) \right] H \quad (6.2)$$

Caso se admita que n_{bt} varie linearmente com Q_t , segundo a equação 4.26, tem-se:

$$C(D_i, Q_{it}, H) = \sum_{t=1}^m L_t F(P_{D_t}) + 3580,65 \frac{K_B}{\eta} \left[\sum_{t=1}^n (Q_t^2 \cdot p_t) \right] H \quad (6.3)$$

sendo:

η – rendimento esperado do conjunto motor-bomba;

K_B – coeficiente de bombeamento, em $h/(m^3/s)$;

Q_t – vazão média de projeto no ano " t ", em m^3/s .

6.2.1.2 - Restrições

A solução ótima que se deseja obter através da minimização da equação 6.2 ou da equação 6.3 (Função Objetivo), deve satisfazer às seguintes restrições hidráulicas pertinentes ao problema físico das redes de distribuição de água (malhadas ou ramificadas):

- a) *pressões mínimas e máximas nos nós;*
- b) *conservação da energia nos anéis;*
- c) *continuidade nos nós;*

- d) *velocidades máximas e mínimas nos trechos;*
- e) *diâmetros mínimos e máximos.*

a) Pressões mínimas e máximas nos nós

Cada nó da rede deve estar submetido a uma pressão que garanta nos mesmos o atendimento das demandas necessárias, sem causar prejuízos ao abastecimento da rede. Desta forma, as pressões nos nós da rede não devem ser inferiores nem superiores às pressões pré-determinadas pelo projetista, de acordo com as normas brasileiras NBR-12218/94 e NBR-5647/99. Assim sendo, cada nó da rede deve estar submetido à seguinte equação de restrição que estabelece os limites de pressão nas tubulações:

$$Z_{ki} \leq Z - \sum_{c=1}^k (h_f)_c \leq Z_{ks} \quad (6.4)$$

sendo:

Z – cota piezométrica de alimentação da rede;

Z_{ki} – cota piezométrica mínima requerida no nó k ;

Z_{ks} – cota piezométrica máxima admitida no nó k ;

$\sum_{c=1}^k (h_f)_c$ – soma das perdas de carga nos trechos “ c ” pertencentes ao percurso

(artéria) compreendido entre a alimentação e o nó k , no ano “ t ”;

k – número de trechos entre a alimentação e o nó k .

As perdas de carga podem ser calculadas por qualquer uma das fórmulas conhecidas, no entanto, neste trabalho, optou-se pelo uso das fórmulas de Darcy-Weisbach ou de Hazen-Williams, considerando-se a variação da rugosidade e da vazão ou velocidade de escoamento da água, ao longo da vida útil do projeto.

- Fórmula de Darcy-Weisbach

Considerando-se variáveis o coeficiente de atrito e vazão, a fórmula de Darcy-Weisbach pode ser dada pela equação 4.5.

No cálculo do coeficiente de atrito (f_{it}) pode ser usada a fórmula de von Kármán & Prandl (equação 4.6), a fórmula de Swamee & Jain (equação 4.7), ou a fórmula de Swamee & Jain Simplificada (equação 4.8).

A variação da rugosidade (ε_{it}) pode ser calculada pela fórmula de Colebrook e White alterada por Streeter, equação 4.1.

Para o cálculo do coeficiente de crescimento da rugosidade (α) de tubos de ferro fundido, pode-se adotar a fórmula de Colebrook e White (equação 2.3), a fórmula sugerida por projetistas britânicos (equação 2.4) ou a fórmula de Lamont (equação 2.5). Para o cálculo deste parâmetro em tubos que não sejam de ferro fundido não se dispõe de fórmulas específicas, no entanto, como para estes tubos a rugosidade varia muito pouco com o passar do tempo, sugere-se que se adote variação linear da rugosidade, considerando-se um coeficiente de crescimento da rugosidade bastante pequeno, dependendo do caso em estudo.

O número de Reynolds no trecho “i” no tempo “t” é dado pela fórmula da equação 2.1.

A velocidade do escoamento no trecho “i” da tubulação, no tempo “t”, pode ser calculada pela equação da continuidade, tem-se:

$$v_{it} = \frac{Q_{it}}{A_i} \quad (6.5)$$

sendo:

A_i – área da secção transversal da tubulação.

- Fórmula de Hazen-Williams

Quando se consideram variáveis o coeficiente de Hazen-Williams e a vazão do projeto, a fórmula de Hazen-Williams para o cálculo da perda de carga será dada pela equação 4.9. O coeficiente de atrito de Hazen-Williams (C_{it}) no trecho “i” no ano “t” pode ser calculado pela fórmula da equação 4.10.

Dependendo da fórmula que se use para o cálculo do coeficiente de atrito (f_{it}), o coeficiente de Hazen-Williams pode ser calculado pela equação 4.11 (von Kármán & Prandl), equação 4.12 (Swamee & Jain), ou equação 4.13 (Swamee & Jain Simplificada).

b) Conservação de energia nos anéis

A restrição da conservação de energia nos anéis deve ser aplicada em cada anel da rede e significa que, percorrendo-se o anel a partir de um dos seus nós até retornar a este mesmo nó, a soma das perdas de carga é nula. Esta restrição pode ser interpretada da seguinte forma: em cada anel da rede o somatório das perdas de carga é nulo, ou seja:

$$\sum_{i=1}^{a_k} h_{fit} - \sum_{j=1}^{i_k} E_{pi} = 0 \quad (6.6)$$

sendo:

h_{fit} – perda de carga no trecho “i” no anel “k”;

a_k – número de trechos no anel k em questão;

E_{pi} – energia de impulsão aplicada na malha ou anel. Caso não exista uma fonte externa dessa energia no interior do anel, o seu valor será nulo;

i_k – número de fontes de energia de impulsão dentro do anel k.

Neste caso, para o cálculo das perdas de carga valem as mesmas considerações feitas no item a.

c) Continuidade nos nós

Para cada nó da rede, segundo a lei de conservação de massa nos nós, deve-se ter que a soma das vazões que afluem ao nó é igual a soma das vazões que efluem do mesmo, ou seja, a soma algébrica das vazões que chegam e que saem de qualquer nó da rede deve ser igual a zero.

Para um nó qualquer da rede, deve-se ter:

$$\sum_{i=1}^{c_n} Q_{entra_{(i)}} - \sum_{j=1}^{s_n} Q_{sai_{(j)}} - d_n = 0 \quad (6.7)$$

sendo:

$Q_{entra(i)}$ – vazões dos trechos i que chegam ao nó n ;

$Q_{sai(j)}$ – vazões dos trechos j que deixam o nó n ;

d_n – demanda concentrada no nó n ;

c_n – número de trechos com vazões que chegam ao nó n ;

s_n – número de trechos com vazões que saem do nó n .

A demanda d_n representa a vazão com a qual o nó abastecerá determinado setor da rede.

d) Velocidades mínimas e máximas

Segundo Melo (2000), teoricamente não existe necessidade de se fixar um limite para a velocidade da água dentro das tubulações em redes de distribuição de água. Ocorre que, quando a velocidade da água cresce, as perdas de carga também crescem, aumentando, conseqüentemente, o custo da energia de bombeamento necessária para vencer estas perdas, também podem aumentar os desgastes das tubulações e de peças acessórios, e a corrosão dos tubos, além da ocorrência de ruídos desagradáveis. Portanto, para atender à restrição das velocidades mínimas e máximas nos trechos da rede, deve-se ter:

$$v_{min.} \leq v_{it} \leq v_{max.} \quad (6.8)$$

sendo:

v_{it} – velocidade média no trecho i no ano “ t ”;

$v_{max.}$ – velocidade máxima no trecho i ;

$v_{min.}$ – velocidade mínima no trecho i .

Os valores das velocidades mínimas e máximas são fixados em normas. Neste estudo foram adotados os valores recomendados pela NBR- 12218/94.

e) Diâmetros mínimos e máximos nos trechos

Para que se diminua a quantidade de cálculos envolvidos no dimensionamento, pode-se fazer uma limitação dos diâmetros a serem otimizados, desta forma, o diâmetro D_i deve ser maior ou igual a um diâmetro mínimo ($D_{min.}$) adotado e menor ou igual a um diâmetro máximo estimado ($D_{max.}$), ou seja:

$$D_{min.} \leq D_i \leq D_{max.} \quad (6.9)$$

Essa restrição não sofre alteração quando se consideram variáveis as condições de contorno do projeto.

6.2.1.3 – Resolução da Primeira Etapa do Método

A resolução da Primeira Etapa deste Método é feita por meio de métodos computacionais de otimização, encontrando-se dois resultados:

1ª Etapa: Dimensionamento Inicial;

1ª Etapa: Dimensionamento Otimizado.

6.2.2 -Segunda Etapa -Dimensionamento Definitivo

6.2.2.1 - Preliminares

Na **segunda etapa** do método proposto, o dimensionamento econômico da rede de distribuição de água é feito a partir dos diâmetros, vazões e altura manométrica encontrados na 1ª etapa – Dimensionamento Otimizado. Considera-se que, cada trecho é dividido em dois sub-trechos e o diâmetro ótimo contínuo obtido na primeira etapa é desdobrado em dois diâmetros comerciais, sendo um o imediatamente inferior e outro o imediatamente superior àquele encontrado. Realiza-se um novo processo de otimização a partir do equilíbrio da rede e destes valores obtidos da primeira etapa.

6.2.2.2 - Função Objetivo

Como nesta segunda etapa são adotados dois diâmetros comerciais para cada trecho, a função objetivo a ser minimizada passa a ser:

$$C(L_{ij}, Q_{it}, H) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^2 L_{ij} P_{D_{ij}} + \left(\sum_{t=1}^n C'_{ht} \right) H \quad (6.10)$$

sendo:

$C(L_{ij}, Q_{it}, H)$ – valor presente do custo total do sistema de abastecimento;

L_{ij} – comprimento ocupado pelo diâmetro D_{ij} , no trecho i considerado, em m;

$P_{D_{ij}}$ – preço unitário do tubo de diâmetro D_{ij} , no trecho i , em R\$/m;

j – número de sub-trechos em cada trecho da rede.

A função objetivo tem como variáveis de decisão os comprimentos dos sub-trechos L_{ij} e a altura de bombeamento H , sendo que as vazões nos trechos continuam sendo variáveis de estado do processo de otimização.

Para o termo $\left(\sum_{t=1}^n C'_{ht} \right) H$ são válidos os comentários feitos na Primeira Etapa, item 6.2.1.1.

6.2.2.3 – Restrições

a) Pressões mínimas e máximas

Cada nó da rede deve estar submetido à uma equação de restrição que estabelece os limites de pressão nas tubulações, do tipo da equação 6.4. Neste caso, em cada trecho devem ser calculadas duas perdas de carga, uma para cada sub-trecho, sendo a perda de carga no trecho igual à soma das perdas dos sub-trechos.

Neste trabalho são usadas as fórmulas de Darcy-Weisbach ou de Hazen-Williams, portanto, para o cálculo das perdas de carga em um sub-trecho j do trecho i , ocupado pelo diâmetro D_{ij} , tem-se:

- pela fórmula de Darcy-Weisbach:

$$(h_{f_{it}})_{D_{ij}} = 0,0827(f_{it})_{D_{ij}} \cdot L_{ij} \cdot \frac{Q_{it}^2}{D_{ij}^5} \quad (6.11)$$

sendo:

$(h_{f_{it}})_{D_{ij}}$ – perda de carga no sub-trecho j do trecho i ocupado pelo diâmetro D_{ij} , no

tempo t;

$(f_{it})_{D_{ij}}$ – coeficiente de atrito do sub-trecho j do trecho i ocupado pelo diâmetro D_{ij} , no tempo t.

- pela fórmula de Hazen-Williams:

$$(h_{f_{it}})_{D_{ij}} = 10,65 \cdot \frac{L_{ij}}{D_{ij}^{4,87}} \cdot \frac{Q_{it}}{[(C_{it})_{D_{ij}}]^{1,852}} \quad (6.12)$$

sendo:

$(C_{it})_{D_{ij}}$ – coeficiente de Hazen-Williams do sub-trecho j do trecho i, no tempo t.

b) Conservação de energia nos anéis

As restrições de conservação de energia nos anéis são obtidas de forma semelhante à da primeira etapa, através de equações do tipo da equação 6.6, devendo-se, também, calcular uma perda de carga para cada sub-trecho, pelas equações 6.11 ou 6.12.

c) Continuidade nos nós

As equações de restrição da continuidade nos nós, para esta etapa, são idênticas às da primeira etapa e podem ser obtidas através da equação 6.7.

d) Velocidades mínimas e máximas

As equações de restrição de velocidades mínimas e máximas desta etapa também são idênticas às da primeira etapa, sendo válida, portanto, a equação 6.8. Para cada sub-trecho deve-se ter:

$$v_{\min.} \leq (v_{it})_{D_{ij}} \leq v_{\max.} \quad (6.13)$$

sendo:

$(v_{it})_{D_{ij}}$ – velocidade no sub-trecho j do trecho i, no tempo t.

Nesta segunda etapa, nos trechos em que a vazão é pequena, pode se tornar inviável a aplicação da restrição da velocidade mínima, tendo em vista que os diâmetros estão fixados em dois valores comerciais, um para cada sub-trecho, não podendo assumir valor diferente de um destes, o que pode fazer com que não seja atendida a equação da continuidade.

Além dessas restrições, a solução encontrada deve ainda satisfazer a mais duas outras, que são: comprimentos dos sub-trechos e não negatividade dos comprimentos dos sub-trechos.

e) Comprimentos dos sub-trechos

A soma dos comprimentos dos dois sub-trechos em que foi dividido o trecho é igual ao comprimento deste trecho, tem-se:

$$\sum_{j=1}^2 L_{ij} = L_i \quad (6.14)$$

sendo:

L_i – comprimento do trecho i considerado;

L_{ij} – comprimento do sub-trecho j do trecho i (ocupado pelo tubo de diâmetro D_j).

f) Não negatividade dos comprimentos dos sub-trechos

Os comprimentos dos sub-trechos não podem ser negativos, ou seja:

$$L_{ij} \geq 0$$

(6.15)

6.2.2.4 – Resolução da 2ª Etapa do Método

A resolução de 2ª Etapa também é feita através de programas computacionais de otimização, encontrando-se os dois resultados:

2ª Etapa: Dimensionamento Inicial;

2ª Etapa: Dimensionamento Definitivo.

- Comentário

Verifica-se que, neste caso, na resposta definitiva do dimensionamento pode haver um ou mais trechos com tubulações de dois diâmetros comerciais distintos, em que o de diâmetro maior ocupará o sub-trecho de montante (considerando o sentido do fluxo da água estabelecido pela vazão) e o diâmetro menor, o sub-trecho de jusante, neste caso, os sub-trechos que surgirão podem ser interpretados com sendo novos nós introduzidos na rede.

6.3 - DESENVOLVIMENTO DO PROGRAMA COMPUTACIONAL

Para alcançar os resultados dos problemas de otimização de redes de abastecimento de água através do método de otimização visto no item anterior, foi desenvolvido um programa computacional que oferece condições de resolver tais problemas de forma geral. Desta forma, um Sistema de Otimização de redes de abastecimento de água foi desenvolvido em ambiente de programação Borland® Delphi 6, com base no algoritmo de otimização GRG2 (Gradiente Reduzido Generalizado). A implantação deste algoritmo foi possível devido a paleta de componentes Servers, que se encontra disponível desde a versão 5 do Delphi. Estes componentes disponibilizam um completo acesso às funções dos aplicativos do pacote Microsoft Office, sendo objeto de interesse o uso das funções existentes no Excel.

Sabe-se que, no Excel existem funções para processos de maximização e minimização, capazes de resolverem inúmeros processos numéricos por demanda. Uma das funções utilizadas neste sistema foi a função de minimização (ou maximização) da ferramenta Solver, que está implementada em uma DLL (Biblioteca de Vínculo Dinâmico). Esta função foi importada para o sistema através dos componentes já mencionados do Delphi, podendo ser utilizada em um aplicativo independente dos aplicativos do Office.

O Sistema de Otimização utiliza uma Base de Dados onde ficam armazenadas todas as informações dos projetos, tais como coeficientes, constantes, equações complementares, etc. Esta base de dados é o Access, da Microsoft, que é uma ferramenta de fácil utilização de aplicativos de bancos de dados, atendendo satisfatoriamente as necessidades deste sistema. Visto que é um sistema que não guarda informações que requerem um alto nível de segurança, tais como instituições financeiras, como bancos. A conexão com o Banco de Dados foi também realizada através de uma paleta de componentes do Delphi, a paleta BDE. Com os componentes de banco de dados do Delphi, é possível efetuar uma conexão a qualquer banco de dados existentes atualmente disponíveis. Estes componentes possuem propriedades que dão suporte a estas conexões.

Para a execução dos cálculos de operação, foram utilizados loops, de modo a efetuar cálculos de acompanhamento dos desajustes e dos custos de operação do projeto a cada ano.

A utilização do sistema se resume a parâmetros e restrições do projeto de dimensionamento que deverão ser passados ao aplicativo. As informações sobre cada projeto de dimensionamento são alocadas em tabelas. Uma destas é a tabela de diâmetros comerciais, na qual existe uma completa lista de diâmetros nominais, com valores internos e externos e custo por metro. Esta tabela será utilizada implicitamente na segunda etapa de minimização, visto que o sistema necessita de duas etapas para encontrar os diâmetros ótimos dos trechos.

Inicialmente, deve-se cadastrar o projeto com todos os trechos, seus respectivos comprimentos e diâmetros iniciais. Com os dados dos trechos cadastrados, devem-se cadastrar os dados existentes nas redes, juntamente com as equações da continuidade nos nós. Após o cadastro dos nós e dos dados complementares, poderá ser executada a função de geração da planilha da primeira etapa. Quando esta função for executada, o aplicativo vai gerar uma planilha em formato Excel. Quando a planilha da primeira etapa for gerada e

exibida, será necessário adicionar as equações da energia que regem o sistema e as restrições no Solver, para que se possa resolvê-lo. Feito isto, o Solver exibirá na planilha o resultado da função de minimização, alterando a planilha inicial.

Finalizada a primeira etapa, executa-se a função para gerar a planilha da segunda etapa. O aplicativo gera uma planilha semelhante à da primeira etapa, porém, esta contém os dados obtidos no processo de minimização da primeira etapa. Torna-se também necessário adicionar algumas informações à planilha e as restrições ao Solver, de modo a viabilizar o processo de resolução.

Concluídos os processos de minimização, é possível se ter um relatório anual completo de acompanhamento da rugosidade, vazão, horas de bombeamento, potência necessária, população e custos de operação do projeto.

O custo total do projeto pode ser apresentado com ou sem os custos do reservatório elevado.

No Apêndice C encontram-se as listas dos módulos e do código fonte deste programa computacional.

No desenvolvimento do programa computacional foi obedecida a seqüência do fluxograma da figura 6.2.

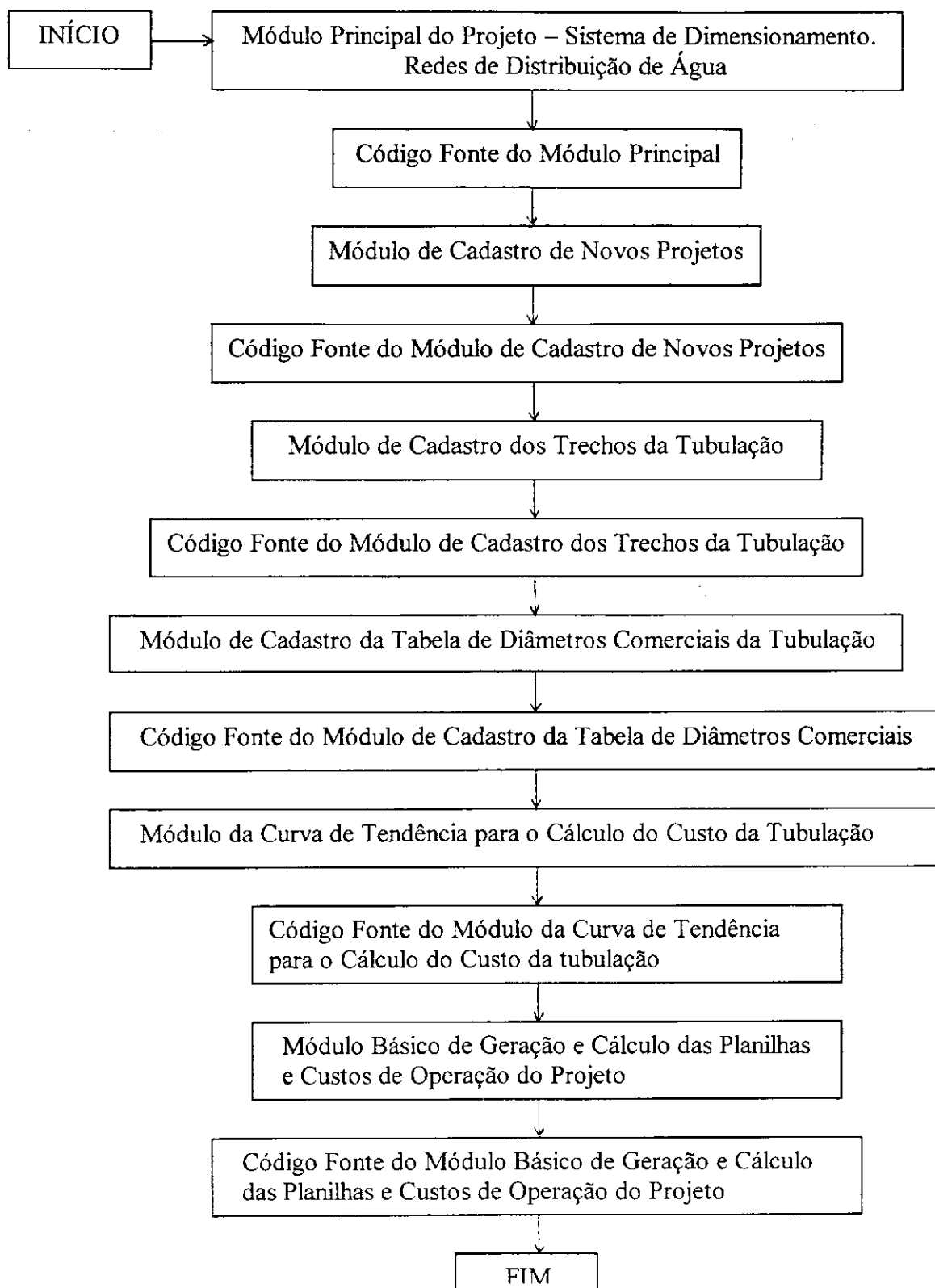


Figura 6.2 – Fluxograma esquemático dos módulos e códigos fontes do programa computacional desenvolvido neste trabalho

CAPÍTULO 7

APLICAÇÕES DO MÉTODO DESENVOLVIDO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

7.1 - Preliminares

Neste capítulo foram feitas três aplicações do método de dimensionamento de redes de distribuição de água, quando são considerados variáveis os parâmetros que definem as condições de contorno do projeto, aplicando-se o programa computacional desenvolvido no capítulo anterior, com a finalidade de verificar sua validade quando aplicado na otimização de sistemas de abastecimento de água. Também foi feita a análise dos resultados obtidos.

Inicialmente o método, com o programa computacional, foram aplicados a um exemplo já divulgado na literatura, de dimensionamento de uma rede com critério de otimização econômica - problema 5.3.1 extraído de Gomes (2002), para, através da comparação dos resultados obtidos, verificar a validade de ambos. Para a realização desta verificação, alguns parâmetros do exemplo de Gomes (2002) foram alterados e outros adotados, de forma que houvesse a maior compatibilidade possível entre os valores considerados, e representassem um mesmo estudo de caso. Em seguida, o método, com o programa computacional, foram aplicados mais uma vez ao mesmo exemplo, considerando-se, no entanto, variáveis os parâmetros das condições de contorno, e atualizando-se alguns valores dos dados do problema. Por último, o método, com o programa computacional, foram novamente testados, sendo que desta vez, ambos foram aplicados a uma rede de distribuição de água de maior porte.

7.2 - EXEMPLO 7.1 - RESOLUÇÃO DO EXEMPLO 5.3.1: REDE MALHADA COM COTA DE ALIMENTAÇÃO VARIÁVEL (EXTRAÍDO DE GOMES, 2002)

O exemplo tem como objetivo projetar o sistema de abastecimento de água de um Grande Setor, no bairro do Bessa (João Pessoa - PB), composto por dois anéis, alimentados por um reservatório elevado, conforme a Figura 7.1. Pretende-se dimensionar, com o menor custo possível, todos os trechos da rede e a altura do reservatório elevado, considerando-se os preços de implantação das tubulações e o custo de operação (energético) do conjunto motor-bomba, que impulsionará água para o reservatório. O nível da água de captação (poço de sucção) está na cota 30 (em metros), que coincide com a cota altimétrica do terreno. A tabela 7.1 apresenta as demandas e as cotas altimétricas do terreno nos nós dos anéis em questão, enquanto a Tabela 7.2 fornece os dados referentes aos comprimentos dos trechos nos anéis.

A pressão mínima imposta aos nós do Grande Setor é de 25 mca e as velocidades máximas e mínimas admitidas nos trechos da rede são de 3,0 m/s e 0,2 m/s, respectivamente. Na Figura 7.1 encontram-se também os sentidos de escoamento admitidos para as vazões e as numerações dos nós e dos trechos da rede.

O material da tubulação usada no sistema é de ferro dúctil sem revestimento para tubos de diâmetros superiores a 300 mm e de PVC para diâmetros situados entre 100 e 300 mm. Os tubos de PVC rígido são do tipo DEFoFo (diâmetros externos idênticos aos de ferro fundido), fabricados de acordo com a norma NBR 7665 da ABNT, dimensionados para trabalhar com água a 20°C e pressões de serviço máximas de 1MPa (100 mca), incluindo as variações dinâmicas. Os tubos de ferro dúctil são da Classe K-7, cujas pressões máximas de serviço são de 1,9 MPa para o diâmetro de 350 mm e de 1,8 MPa para os diâmetros entre 400 e 600 mm.

Na Tabela 7.3 encontram-se os preços de implantação dos tubos (em reais por metro) e os diâmetros internos, em função dos seus diâmetros nominais. Os coeficientes de rugosidade “C” da fórmula de Hazen-Williams, que serão utilizados nos cálculos das perdas de carga, são de 145 para os tubos de PVC, e de 130 para os de ferro dúctil.

Os custos e regime do bombeamento utilizado são:

- . número de horas de bombeamento diário = 20;
- . rendimento esperado do conjunto motor-bomba = 75 %;

- . tempo de vida útil do projeto (alcance) = 20 anos;
- . taxa de juro anual = 12 %;
- . taxa de aumento anual da energia = 6 %;
- . custo do kWh (incluindo a tarifa de demanda) = R\$ 0,071.

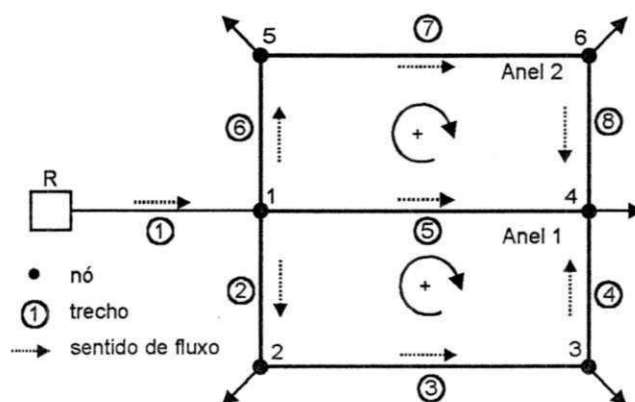


Figura 7.1 - Esquema do Grande Setor

Tabela 7.1 - Vazões demandadas e cotas dos nós

Nó	Vazão (l/s)	Cota (m)
1	0,00	6,0
2	47,78	5,5
3	80,32	5,5
4	208,60	6,0
5	43,44	4,5
6	40,29	4,0
Total	420,43	

Tabela 7.2 - Comprimentos dos trechos

Trecho	Comprimento (m)
1	2.540
2	1.230
3	1.430
4	1.300
5	1.490
6	1.210
7	1.460
8	1.190

Tabela 7.3 - Preço de Implantação dos tubos

DN	Material do Tubo	Diâmetro Interno (mm)	Custo do Tubo (R\$/m)	Custo de Montagem (R\$/m)	Custo de Implantação (R\$/m)
100	PVC	108,4	12,80	20,00	32,80
150		156,4	23,41	20,00	43,41
200		204,2	39,24	20,00	59,24
250		252,0	58,52	20,00	78,52
300		299,8	83,12	20,00	103,12
350	FoFo	381,0	185,82	40,00	225,82
400		432,0	227,66	40,00	267,66
450		483,0	262,63	40,00	302,63
500		535,0	309,29	40,00	349,29
600		638,0	638,37	40,00	433,37

A partir da Tabela 7.3, determinou-se a equação que representa a variação do custo de implantação da tubulação, $F(P_{Di})$, com o seu diâmetro, D_i , através de um ajuste de curva executado pela ferramenta “linha de tendência” da Planilha Excel, figura 7.2:

$$F(P_{Di}) = 0,0129 D^{1,6165} \quad (7.1)$$

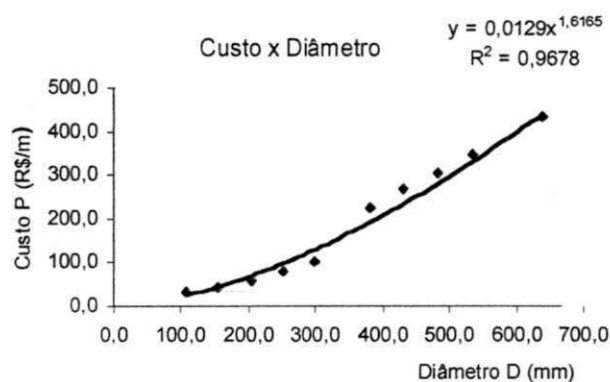


Figura 7.2 - Curva de ajuste do custo de implantação das tubulações versus o diâmetro

7.2.1 - Resolução pelo PNL2000

As soluções (dimensionamentos inicial e definitivo) do problema através do PNL2000, se encontram nas Planilhas B.1, B.2, B.3 e B.4, do Anexo B.

7.2.2 - Resolução pelo Método Proposto neste Trabalho

Para se adaptar os dados do Exemplo 5.3.1 de Gomes (2002) ao método desenvolvido neste trabalho, de modo que ambos apresentem resultados que representam uma mesma situação, deve-se adotar ou determinar alguns dados, tem-se:

- para a água: pH = 8,5; $k_1 = 1,2$; $k_2 = 1,5$ e $q = 200$ l/dia = $0,200$ m³/dia;
- coeficiente de bombeamento: $K_B = 47,57$ h/(m³/s);
- populações do bairro do Bessa da cidade de João Pessoa - PB:
 $P_{1991}^{Bessa} = 41.915$ hab. (adotada) e $P_{2000}^{Bessa} = 60.901$ hab. (adotada, para poder se obter a população correspondente ao consumo de 420,43 l/s, prevista no projeto);
- rugosidade:
tubos de PVC: $\varepsilon_o = 0,10$ mm (adaptado, para se obter C em torno de 145) e tubos de FoFo: $\varepsilon_o = 0,30$ mm (adaptado, para se obter C em torno de 130);
- custo do kWh: 0,1156 R\$/kWh (adaptado, para aproximar os valores dos custos de operação obtidos pelos dois métodos).

- Primeira Etapa: Dimensionamento Inicial

-Função Objetivo

A Função Objetivo, a ser minimizada é obtida da equação 6.2, é:

$$C(D_i, Q_{i,t}, H) = \sum_{i=1}^8 L_i F(P_{D_i}) + \frac{9,81}{\eta} \left[\sum_{t=1}^{20} (n_{bt} \cdot Q_t \cdot p'_t) \right] H \quad (7.2)$$

sendo:

$F(P_{D_i})$ - dada pela equação 7.1;

$$Q_t = \frac{P_t^{Bessa} k_1 \cdot k_2 \cdot q}{86400} = \frac{P_t^{Bessa} 1,2 \times 1,5 \times 0,200}{86400} = 0,4167 \times 10^{-5} P_t^{Bessa} \quad (7.3)$$

P_t^{Bessa} - a função de variação da população do bairro do Bessa;

$$n_{bt} = 365.K_B.Q_t = 365 \times 47,57 Q_t = 17363,05 Q_t \quad (7.4)$$

$$p_t' = \frac{p_1(1+e)^{(t-1)}}{(1+i)^t} = \frac{0,1156(1+0,06)^{(t-1)}}{(1+0,12)^t} = \frac{0,1156(1,06)^{(t-1)}}{1,12^t} \quad (7.5)$$

Para a determinação da função de variação da população do bairro do Bessa adotou-se o Método de Tendência de Crescimento Demográfico (também adotado pelo IBGE na realização do Censo de 2000), sendo, portanto, necessário se determinar, previamente, as funções de variação das populações do Nordeste, Paraíba e João Pessoa (tendo em vista que o Bessa é um bairro desta cidade). Foram usados os dados do IBGE dos Censos de 1991 e 2000, mostrados na tabela 7.4.

Tabela 7.4 - Populações dos Censos 1991 e 2000 (Fonte: IBGE)

ÁREA	POPULAÇÃO	
	1991	2000
Brasil	146.825.474	169.799.170
Nordeste	42.497.540	47.741.711
Paraíba	3.201.114	3.443.825
João Pessoa	497.600	597.934

Brasil: $P_{1991}^B = 146.825.475$; $P_{2000}^B = 169.799.170$

Nordeste: $P_{1991}^N = 42.497.540$; $P_{2000}^N = 47.741.711$

Paraíba: $P_{1991}^{PB} = 3.201.114$; $P_{2000}^{PB} = 3.443.825$

João Pessoa: $P_{1991}^{JP} = 497.600$; $P_{2000}^{JP} = 597.934$

- Função da variação de estimativa da população do Brasil com o tempo: dada pela equação 4.18.

- Função de variação da população do Nordeste:

$$a_t^N = \frac{47.741.711 - 42.497.540}{169.799.170 - 146.825.475} = 0,22827$$

$$b_t^N = 42.497.540 - 0,22827 \times 146.825.475 = 8.981.689$$

$$P_t^N = 0,22827 P_t^B + 8.981.689 \quad (7.6)$$

- Função de variação da população da Paraíba:

$$a_i^{PB} = \frac{3.443.825 - 3.201.114}{47.741.711 - 42.497.540} = 0,046282$$

$$b_i^{PB} = 3.201.114 - 0,046282 \times 42.497.540 = 1.234.243$$

$$P_t^{PB} = 0,046282 P_t^N + 1.234.243 \therefore$$

$$P_t^{PB} = 0,010565 P_t^B + 1.649.934 \quad (7.7)$$

- Função de variação da população de João Pessoa:

$$a_i^{JP} = \frac{597.934 - 497.600}{3.443.825 - 3.201.114} = 0,413389$$

$$b_i^{JP} = 497.600 - 0,413389 \times 3.201.114 = - 825.705 \therefore$$

$$P_t^{JP} = 0,413389 P_t^{PB} - 825.705 \therefore$$

$$P_t^{JP} = 0,0043675 P_t^B - 143.640 \quad (7.8)$$

- Função de variação da população do Bessa:

$$P_i^{Bessa} = \frac{60.901 - 41.915}{597.934 - 497.600} = 0,18923$$

$$b_i^{Bessa} = 41.915 - 0,18923 \times 497.600 = -52.245,85$$

$$P_t^{Bessa} = 0,18923 P_t^{JP} - 52.245,85 \therefore$$

$$P_t^{Bessa} = 0,0008265 P_t^B - 79.426,847 \quad (7.9)$$

Sendo a estimativa da população do Brasil para o ano "t" do alcance do projeto calculada pela equação 4.18, substituindo-se na equação 7.9, tem-se:

$$P_t^{Bessa} = 60.952 + 1.997,47 t \quad (7.10)$$

A função objetivo será:

$$C(D_i, Q_{it}, H) = \{ [2.540 \times 0,0129 (D_1)^{1,6165} + 1.230 \times 0,0129 (D_2)^{1,6165} + 1430 \times 0,0129 (D_3)^{1,6165} + 1.300 \times 0,0129 (D_4)^{1,6165} + 1.490 \times 0,0129 (D_5)^{1,6165} + 1.210 \times 0,0129 (D_6)^{1,6165} + 1.460 \times 0,0129 (D_7)^{1,6165} + 1.190 \times 0,0129 (D_8)^{1,6165} + \frac{9,81}{\eta} \left[\sum_{t=1}^{20} (n_{bt} \cdot Q_t \cdot p_t) \right] H \} \quad (7.11)$$

A última parcela da equação 7.11 representa o valor presente dos custos de operação (bombeamento) da rede. No cálculo computacional através do programa ora desenvolvido entra-se diretamente com as funções de Q_t (equação 7.3), n_{bt} (equação 7.4) e p_t (equação 7.5).

Caso se deseje calcular os custos de operação tendo como única variável o tempo (ano em que se pretende calcular os custos do projeto), tem-se:

$$\frac{9,81}{\eta} \left[\sum_{t=1}^{20} (n_{bt} \cdot Q_t \cdot p_t) \right] H = 0,456 \times 10^{-6} \left[\sum_{t=1}^{20} (60.952 + 1.995,47t)^2 \cdot \frac{1,06^{(t-1)}}{1,12^t} \right] H \quad (7.12)$$

- Restrições

a) Pressão mínima requerida nos nós:

Em qualquer nó da rede a pressão disponível deve ser maior ou igual a 25 mca.

A cota piezométrica do reservatório é:

$$Z = H + 30 \quad (7.13)$$

Para um determinado nó da rede a pressão disponível é igual à cota piezométrica do reservatório, menos as perdas de carga ocorridas nos trechos em série, desde o reservatório até este nó, independente do percurso seguido. É conveniente adotar o percurso mais curto entre o nó em estudo e o reservatório, a fim de se diminuir o tamanho das equações. Esta pressão disponível deve ser maior ou igual à cota topográfica (em m) do nó mais 25 mca.

Serão 6 inequações de restrição de pressão mínima (uma para cada nó), com as perdas de carga calculadas para o alcance do projeto, $t = 20$ anos, tem-se:

$$\text{nó 1: } Z - (h_{f1,20}) \geq (25 + 6,0) \quad (7.14)$$

$$\text{nó 2: } Z - (h_{f1,20} + h_{f2,20}) \geq (25 + 5,5) \quad (7.15)$$

$$\text{nó 3: } Z - (h_{f1,20} + h_{f2,20} + h_{f3,20}) \geq (25 + 5,5) \quad (7.16)$$

$$\text{nó 4: } Z - (h_{f1,20} + h_{f5,20}) \geq (25 + 6,0) \quad (7.17)$$

$$\text{nó 5: } Z - (h_{f1,20} + h_{f6,20}) \geq (25 + 4,5) \quad (7.18)$$

$$\text{nó 6: } Z - (h_{f1,20} + h_{f6,20} + h_{f7,20}) \geq (25 + 4,0) \quad (7.19)$$

Usando-se a equação de Hazen-Williams para o cálculo das perdas de carga (equação 4.9), tem-se:

$$h_{fi,20} = 10,65 \frac{L_i}{D_i^{4,87}} \left(\frac{Q_{i,20}}{C_{i,20}} \right)^{1,852} \quad (7.20)$$

sendo:

$i = 1, 2, \dots, 8$.

D_i - diâmetro do trecho "i";

$Q_{i,20}$ - vazão do trecho "i", no ano $t = 20$ (alcance do projeto);

$C_{i,20}$ - coeficiente de Hazen-Williams, no ano $t = 20$.

O coeficiente de Hazen-Williams pode ser calculado pela equação 4.13, tem-se:

$$C_{i,20} = \frac{29,7 \{ [\log(0,27 \varepsilon_{i,20} / D_i)^2]^{0,54} \}}{D_i^{0,0891} \cdot v_{i,20}^{0,081}} \quad (7.21)$$

Neste exemplo, para comparação com o exemplo 5.3.1, será considerado:

$$\varepsilon_{i,20} = \varepsilon_o$$

b) Conservação de energia nos anéis:

Para cada anel da rede, deve-se ter:

$$\text{anel 1: } (h_{f5,20} - h_{f2,20} - h_{f3,20} - h_{f4,20}) = 0 \quad (7.22)$$

$$\text{anel 2: } (h_{f6,20} + h_{f7,20} + h_{f8,20} - h_{f5,20}) = 0 \quad (7.23)$$

c) Continuidade nos nós

Aplicando-se a equação da continuidade para cada nó da rede, tem-se:

$$\text{nó 1: } (Q_{1,20} - Q_{2,20} - Q_{5,20} - Q_{6,20}) = 0 \quad (7.24)$$

$$\text{nó 2: } (Q_{2,20} - Q_{3,20}) = 47,78 \quad (7.25)$$

$$\text{nó 3: } (Q_{3,20} - Q_{4,20}) = 80,32 \quad (7.26)$$

$$\text{nó 4: } (Q_{4,20} + Q_{5,20} + Q_{8,20}) = 208,60 \quad (7.27)$$

$$\text{nó 5: } (Q_{6,20} - Q_{7,20}) = 43,44 \quad (7.28)$$

$$\text{nó 6: } (Q_{7,20} - Q_{8,20}) = 40,29 \quad (7.29)$$

d) Velocidades máxima e mínima:

Em cada trecho da rede, a velocidade de escoamento da água deve ser maior ou igual a 0,2 m/s e menor ou igual a 3,0 m/s. Tem-se, então, duas equações para cada trecho, num total de dezesseis equações do tipo:

$$\begin{array}{ll} v_{1,20} \geq 0,2 \text{ m/s}, & v_{1,20} \leq 3,0 \text{ m/s} \\ \vdots & \vdots \\ v_{8,20} \geq 0,2 \text{ m/s}, & v_{8,20} \leq 3,0 \text{ m/s} \end{array} \quad (7.30)$$

e) Restrição de diâmetro:

Os diâmetros internos disponíveis para o projeto estão compreendidos entre 108,4 mm e 638,9 mm, logo, para cada trecho têm-se duas equações, havendo, portanto, um total de dezesseis equações do tipo:

$$\begin{array}{l}
 D_1 \geq 108,4 \text{ mm e } D_1 \leq 638,0 \text{ mm} \\
 \vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots \\
 D_8 \geq 108,4 \text{ mm e } D_8 \leq 638,0 \text{ mm}
 \end{array} \tag{7.31}$$

- Resolução da 1ª Etapa através do programa computacional desenvolvido neste trabalho

Aplicando-se o método, com o programa computacional desenvolvidos, obteve-se os resultados da 1ª Etapa, que se encontram nas Planilhas 7.1 - Primeira Etapa – dimensionamento inicial e 7.2 - Primeira Etapa - dimensionamento otimizado.

- Segunda Etapa - Dimensionamento Definitivo

A partir dos valores dos diâmetros, das vazões e da altura de bombeamento determinados na solução otimizada da Primeira Etapa, realiza-se a Segunda Etapa do Método, que constará de uma solução de partida e uma solução definitiva.

Nesta segunda etapa, em cada trecho são considerados dois diâmetros comerciais, sendo um o imediatamente inferior e outro o imediatamente superior ao diâmetro encontrado na solução otimizada da primeira etapa (Planilha 7.2).

Executa-se um novo processo de otimização, onde as variáveis são as vazões nos trechos, dois comprimentos para as tubulações em cada trecho, e a altura de bombeamento.

Os dados determinados na primeira etapa encontram-se na Tabela 7.5.

Tabela 7.5 - Diâmetros comerciais, vazões e velocidades que serão usados na 2ª etapa

Trecho	Diâmetro da 1ª Etapa (mm)	Diâmetros internos comerciais (mm)	Vazão (l/s)	Velocidade (m/s)
1	582,0	535,0 - 638,0	420,43	1,58
2	365,0	299,8 - 381,0	129,94	1,24
3	319,3	299,8 - 381,0	82,16	1,03
4	108,4	108,4 - 156,4	1,84	0,20
5	393,5	381,0 - 432,0	204,91	1,69
6	293,3	252,0 - 299,8	85,57	1,27
7	238,4	204,2 - 252,0	42,13	0,94
8	108,4	108,4 - 156,4	1,84	0,20

- Função Objetivo

A função objetivo, que deverá ser minimizada, obtida através equação 6.10, é:

$$C(L_{ij}, Q_{it}, H) = \sum_{i=1}^8 \sum_{j=1}^2 L_{ij} \cdot P_{D_{ij}} + \frac{9,81}{\eta} \left[\sum_{t=1}^{20} (n_{bt} \cdot Q_{it} \cdot p_t) \right] H \quad (7.32)$$

Os preços unitários de implantação dos tubos, $(P_{D_{ij}})$, encontram-se na Tabela 7.3.

A função objetivo passa a ser:

$$C(L_{ij}, Q_{it}, H) = [(349,29 L_{1,535} + 433,37 L_{1,638}) + (103,12 L_{2,299} + 225,80 L_{2,381}) + (103,12 L_{3,299} + 225,82 L_{3,381}) + (32,80 L_{4,108} + 43,41 L_{4,156}) + (225,83 L_{5,381}$$

$$+267,66 L_{5,432}) + (78,52 L_{6,252} + 103,12 L_{6,299}) + (78,52 L_{7,204} + 103,12 L_{7,252}) + (32,08 L_{8,108} + 43,41 L_{8,156})] + \frac{9,81}{\eta} \left[\sum_{t=1}^{20} (n_{bt} \cdot Q_{it} \cdot p_t) \right] H \quad (7.33)$$

- Restrições

a) Pressão mínima requerida nos nós

Sendo, $Z = H + 30$, segundo a equação 7.13 as equações de restrição são:

$$\text{nó 1: } Z - [(h_{f1,20})_{535} + (h_{f1,20})_{638}] \geq (25 + 6,0) \quad (7.34)$$

$$\text{nó 2: } Z - [(h_{f1,20})_{535} + (h_{f1,20})_{638} + (h_{f2,20})_{299} + (h_{f2,20})_{381}] \geq (25 + 5,5) \quad (7.35)$$

$$\text{nó 3: } Z - [(h_{f1,20})_{535} + (h_{f1,20})_{638} + (h_{f2,20})_{299} + (h_{f2,20})_{381} + (h_{f3,20})_{299} + (h_{f3,20})_{381}] \geq (25 + 5,5) \quad (7.36)$$

$$\text{nó 4: } Z - [(h_{f1,20})_{535} + (h_{f1,20})_{638} + (h_{f5,20})_{381} + (h_{f5,20})_{432}] \geq (25 + 6,0) \quad (7.37)$$

$$\text{nó 5: } Z - [(h_{f1,20})_{535} + (h_{f1,20})_{638} + (h_{f6,20})_{252} + (h_{f6,20})_{299}] \geq (25 + 4,5) \quad (7.38)$$

$$\text{nó 6: } Z - [(h_{f1,20})_{535} + (h_{f1,20})_{638} + (h_{f6,20})_{252} + (h_{f6,20})_{299} + (h_{f7,20})_{204} + (h_{f7,20})_{252}] \geq (26 + 4,0) \quad (7.39)$$

Usando-se a fórmula de Hazen-Williams, as perdas de carga em cada sub-trecho são calculadas pela equação 6.12. Para o sub-trecho 2 do trecho 1, tem-se:

$$(h_{f1,20})_{D_{12}} = 10,65 \cdot \frac{L_{12}}{D_{12}^{4,87}} \cdot \frac{Q_{1,20}^{1,852}}{[(C_{1,20})_{D_{1,20}}]^{1,852}} \quad (7.40)$$

b) Conservação de energia nos anéis

A restrição da conservação de energia nos anéis deve ser aplicada a cada anel da rede, portanto, tem-se:

$$\text{anel 1: } [(h_{f5,20})_{381} + (h_{f5,20})_{432} - (h_{f2,20})_{299} - (h_{f2,20})_{381} - (h_{f3,20})_{299} - (h_{f3,20})_{381} - (h_{f4,20})_{10} - (h_{f4,20})_{156}] = 0 \quad (7.41)$$

$$\text{anel 2: } [(h_{f6,20})_{252} + (h_{f6,20})_{299} + (h_{f7,20})_{204} + (h_{f7,20})_{252} + (h_{f8,20})_{108} + (h_{f8,20})_{156} - (h_{f5,20})_{381} - (h_{f5,20})_{432}] \quad (7.42)$$

c) Continuidade nos nós

As equações de restrição de continuidade nos nós são as mesmas da primeira etapa, dadas pelas equações 7.24 a 7.29.

d) Velocidades mínimas e máximas

Em cada sub-trecho deve ser atendida a restrição de velocidades mínimas e máximas, dada pela equação 6.13. Como a rede tem 8 trechos e cada um foi dividido em dois sub-trechos, deve-se ter trinta e duas inequações do tipo:

$$\begin{aligned} (v_{1,20})_{D_{11}} &\geq 0,2 \text{ m/s} & (v_{1,20})_{D_{12}} &\geq 0,2 \text{ m/s} \\ \vdots & & \vdots & \\ (v_{8,20})_{D_{8,1}} &\geq 0,2 \text{ m/s} & (v_{8,20})_{D_{8,2}} &\geq 0,2 \text{ m/s} \end{aligned} \quad (7.43)$$

$$\begin{aligned} \text{e, } (v_{1,20})_{D_{11}} &\leq 3,0 \text{ m/s} & (v_{1,20})_{D_{12}} &\leq 3,0 \text{ m/s} \\ \vdots & & \vdots & \\ (v_{8,20})_{D_{8,1}} &\leq 3,0 \text{ m/s} & (v_{8,20})_{D_{8,2}} &\leq 3,0 \text{ m/s} \end{aligned} \quad (7.44)$$

e) Comprimentos dos sub-trechos

Cada trecho da rede foi dividido em dois sub-trechos. Para que seja atendida a restrição de comprimentos dos sub-trechos a soma dos comprimentos destes sub-trechos deve ser igual ao comprimento do respectivo trecho, portanto, tem-se:

$$\text{trecho 1: } L_{11} + L_{12} = 2.540 \quad (7.45)$$

$$\text{trecho 2: } L_{21} + L_{22} = 1.230 \quad (7.46)$$

$$\text{trecho 3: } L_{31} + L_{32} = 1.430 \quad (7.47)$$

$$\text{trecho 4: } L_{41} + L_{42} = 1.300 \quad (7.48)$$

$$\text{trecho 5: } L_{51} + L_{52} = 1.490 \quad (7.49)$$

$$\text{trecho 6: } L_{61} + L_{62} = 1.210 \quad (7.50)$$

$$\text{trecho 7: } L_{71} + L_{72} = 1.460 \quad (7.51)$$

$$\text{trecho 8: } L_{81} + L_{82} = 1.190 \quad (7.52)$$

f) Não negatividade dos comprimentos dos sub-trechos

Os comprimentos dos sub-trechos devem ser maiores ou iguais a zero, portanto, tem-se dezesseis desigualdades do tipo:

$$\begin{array}{ll} L_{11} \geq 0 & L_{12} \geq 0 \\ \vdots & \vdots \\ L_{81} \geq 0 & L_{82} \geq 0 \end{array} \quad (7.53)$$

As soluções do problema, através do método proposto, com a utilização do programa computacional desenvolvido, se encontram nas Planilhas 7.3 e 7.4.

Planilha 7.3 - Exemplo 7.1 - 2ª Etapa - Dimensionamento Inicial

Trechos	Vazão (l/s)	Diametro (mm)	Rugosidade (mm) - 20 Anos	Coefficiente de Hazen Williams	Comp. do Trecho (m)	Perdas (m.c.a.)	Perdas no Trecho (m)	Custo Unitário (R\$)	Custo Total (R\$)	Velocidade (m3/s)
1	420,43	535,0	0,30	126,9	1.524	8,73	11,05	349,29	532.317,96	1,87
	420,43	638,0	0,30	131,3	1.016	2,32		433,37	440.303,92	1,32
2	129,94	299,8	0,10	142,4	738	6,52	8,11	103,12	76.102,56	1,84
	129,94	381,0	0,30	130,5	492	1,59		225,82	111.103,44	1,14
3	82,16	299,8	0,10	147,8	858	3,03	3,77	103,12	88.476,96	1,16
	82,16	381,0	0,30	135,4	572	0,74		225,82	129.169,04	0,72
4	1,84	108,4	0,10	164,7	780	0,28	0,31	32,80	25.584,00	0,20
	1,84	156,4	0,10	177,2	520	0,03		43,41	22.573,20	0,10
5	204,91	381,0	0,30	125,8	894	7,19	9,67	225,82	201.883,08	1,80
	204,91	432,0	0,30	129,0	596	2,48		267,66	159.525,36	1,40
6	85,57	252,0	0,10	142,5	726	6,88	8,74	78,52	57.005,52	1,72
	85,57	299,8	0,10	147,3	484	1,85		103,12	49.910,08	1,21
7	42,13	204,2	0,10	144,9	876	6,04	7,38	59,24	51.894,24	1,29
	42,13	252,0	0,10	150,9	584	1,34		78,52	45.855,68	0,85
8	1,84	108,4	0,10	164,7	714	0,26	0,28	32,80	23.419,20	0,20
	1,84	156,4	0,10	177,2	476	0,03		43,41	20.663,16	0,10
Altura =		20,48						Total =	2.035.787,40	
Cota Piezométrica de cab.(mca) =		50,48								

Trechos	Vazão Minimizada	Comp. L1	Comp. L2	Soma Lf=(L1+L2)	Dif. [L-(L1+L2)]
1	420,43	1.524	1.016	2.540	0,00
2	129,94	738	492	1.230	0,00
3	82,16	858	572	1.430	0,00
4	1,84	780	520	1.300	0,00
5	204,91	894	596	1.490	0,00
6	85,57	726	484	1.210	0,00
7	42,13	876	584	1.460	0,00
8	1,84	714	476	1.190	0,00

Nº	Altura Piezométrica (m)	Demanda (l/s)	Cota do Nó (m)	Pressão Disp. (mca)	Equação da Cont.	Equação da Cons. de Energia	
1	39,43	0,00	6,00	33,43	0,00	-2,52	Anel 1
2	31,32	47,78	5,50	25,82	0,00	6,73	Anel 2
3	27,55	80,32	5,50	22,05	0,00		
4	29,76	208,60	6,00	23,76	0,00		
5	30,69	43,44	4,50	26,19	0,00		
6	23,32	40,29	4,00	19,32	0,00		

Cota do Terreno (m)	Horas de Bombeamento (h)	Custo do kWh (R\$)	Rendimento do Bombeamento (%)	Custo Anual Unit. de Energ. Elét. (R\$/m)	Custo de Energia Elét. (R\$)	Custo Total do Sistema (R\$)
30,00	7299,8	0,12	75,00	31.865,09	652.460,08	2.688.247,48

Planilha 7.4 - Exemplo 7.1 - 2ª Etapa - Dimensionamento Definitivo

Trechos	Vazão (l/s)	Diametro (mm)	Rugosidade (mm) - 20 Anos	Coefficiente de Hazen Williams	Comp. do Trecho (m)	Perdas (m.c.a)	Perdas no Trecho (m)	Custo Unitário (R\$)	Custo Total (R\$)	Velocidade (m3/s)
1	420,43	535,0	0,30	126,9	0	0,00	5,79	349,29	0,00	1,87
	420,43	638,0	0,30	131,3	2.540	5,79		433,37	1.100.759,80	1,32
2	131,94	299,8	0,10	142,2	316	2,88	5,92	103,12	32.601,78	1,87
	131,94	381,0	0,30	130,3	914	3,04		225,82	206.364,74	1,16
3	84,16	299,8	0,10	147,5	1.430	5,29	5,29	103,12	147.461,60	1,19
	84,16	381,0	0,30	135,2	0	0,00		225,82	0,00	0,74
4	3,84	108,4	0,10	155,2	0	0,00	0,30	32,80	0,00	0,42
	3,84	156,4	0,10	167,0	1.300	0,30		43,41	56.433,00	0,20
5	200,92	381,0	0,30	126,0	1.490	11,52	11,52	225,82	336.471,80	1,76
	200,92	432,0	0,30	129,2	0	0,00		267,66	0,00	1,37
6	87,57	252,0	0,10	142,2	189	1,88	5,97	78,52	14.859,12	1,76
	87,57	299,8	0,10	147,0	1.021	4,09		103,12	105.260,77	1,24
7	44,13	204,2	0,10	144,4	0	0,00	3,68	59,24	0,00	1,35
	44,13	252,0	0,10	150,3	1.460	3,68		78,52	114.639,20	0,89
8	3,84	108,4	0,10	155,2	1.190	1,87	1,87	32,80	39.032,00	0,42
	3,84	156,4	0,10	167,0	0	0,00		43,41	0,00	0,20
Altura =		18,31						Total =	2.153.883,82	
Cota Piezométrica de cab (mca) =		48,31								

Trechos	Vazão Minimizada	Comprimento L1	Comprimento L2	Soma Lf=(L1+L2)	Dif. [L-(L1+L2)]
1	420,43	0	2.540	2.540	0,00
2	131,94	316	914	1.230	0,00
3	84,16	1.430	0	1.430	0,00
4	3,84	0	1.300	1.300	0,00
5	200,92	1.490	0	1.490	0,00
6	87,57	189	1.021	1.210	0,00
7	44,13	0	1.460	1.460	0,00
8	3,84	1.190	0	1.190	0,00

Nº	Altura Piezométrica (m)	Demanda (l/s)	Cota do Nó (m)	Pressão Disponível (mca)	Equação da Cont.	Equação da Cons. de Energia	
1	42,52	0,00	6,00	36,52	0,00	0,00	Anel 1
2	36,59	47,78	5,50	31,09	0,00	0,00	Anel 2
3	31,30	80,32	5,50	25,80	0,00		
4	31,00	208,60	6,00	25,00	0,00		
5	36,54	43,44	4,50	32,04	0,00		
6	32,87	40,29	4,00	28,87	0,00		

Cota do Terreno (m)	Horas de Bombeamento (h)	Custo do kWh (R\$)	Rendimento do Bombeamento (%)	Custo Anual Unit. de Energ. Elét. (R\$/m)	Custo de Energia Elét. (R\$)	Custo Total do Sistema (R\$)
30,00	7299,8	0,12	75,00	31.865,09	583.408,80	2.737.292,62

- Análise dos resultados do Exemplo 7.1

Apesar de não ter sido possível resolver o Exemplo 5.3.1 (Gomes, 2002) usando-se os mesmos dados para os dois métodos, tendo em vista as particularidades de cada um (o proposto e o PNL2000), verifica-se que os valores aproximados, adotados ou calculados para os dados usados na solução do problema, não proporcionaram grandes diferenças nos resultados. Pela análise dos resultados obtidos nos dimensionamentos definitivos dos dois métodos, Planilha B.4 (PNL2000) e Planilha 7.4 (Método proposto), pode-se constatar que:

- as vazões são praticamente iguais;
- os diâmetros também são praticamente iguais;
- os comprimentos dos sub-trechos apresentam pequenas diferenças nos trechos 6 e 7;
- os custos de implantação, tendo em vista as duas constatações anteriores, também são um pouco diferentes, sendo o custo obtido pelo método proposto cerca de 0,66 % maior;
- a altura manométrica calculada através do método proposto é 14 % menor do que a do PNL2000;
- o custo de energia elétrica no método proposto é 13,85 % menor do que o do PNL2000;
- o custo total do projeto determinado pelo método proposto é 2,4% menor do que o do PNL2000.

Verifica-se, portanto, que a diferença dos custos totais obtidos pela aplicação dos dois métodos é pequena (apenas 2,4%) e que a diferença nos valores das alturas manométricas devem ser devido à redução do custo de operação que ocorre com a aplicação do método proposto, o que permite concluir que a aplicação deste método e do programa computacional desenvolvidos neste trabalho é válida, podendo-se sugerir o emprego de ambos no dimensionamento otimizado de redes de abastecimento de água.

7.3 - EXEMPLO 7.2

Resolução pelo método proposto de um exemplo já conhecido na literatura, e que considera constantes os parâmetros das condições de contorno do projeto.

Propõe-se efetuar o dimensionamento otimizado da rede de abastecimento de água do Exemplo 7.1 (Exemplo 5.3.1 de Gomes, 2002), usando o método, com o programa computacional desenvolvidos neste trabalho, considerando variáveis os parâmetros das condições de contorno do projeto. São considerados também os dados complementares relacionados a seguir:

- rugosidade inicial: tubos de PVC: $\varepsilon_o = 0,01$ mm e tubos de FoFo: $\varepsilon_o = 0,30$ mm;
- populações: adotar as mesmas do Exemplo 7.1.
- água: pH = 8,5 ; $\nu = 1,007 \times 10^{-6}$ m²/s; $k_1 = 1,2$; $k_2 = 1,5$ e $q = 0,200$ m³/s;
- coeficiente de bombeamento: $K_B = 47,57$ h/(m³/s);
- custo do kWh: 0,071 R\$/kWh;
- os demais dados são os mesmos do Exemplo 7.1.

Solução

- Primeira Etapa- Dimensionamento Inicial

- Função Objetivo

A função objetivo é a mesma do Exemplo 7.1, dada pela equação 7.11, como também são as mesmas funções de variação dos parâmetros:

vazão do projeto (Q_i): equação 7.3;

número de horas de bombeamento (n_{bt}): equação 7.4;

valor presente do custo unitário do kWh (p'_t): equação 7.5;

população do bairro do Bessa (P_t^{Bessa}): equação 7.10.

Restrições

a) Pressão mínima requerida nos nós

A cota piezométrica e as inequações de restrição são as mesmas do Exemplo 7.1, ou seja, são calculadas pela equação 7.13 e pelas inequações 7.14 a 7.19. As perdas de carga são calculadas pelas fórmulas de Hazen-Williams. Fixando a altura manométrica, e igual ao valor obtido na 1ª etapa otimizada.

- **Fórmula de Hazen-Williams:** é calculada pela equação 7.20.

O coeficiente de Hazen-Williams do trecho i no ano t (C_{it}) foi calculado pela fórmula da equação 7.21 (considera o coeficiente de atrito calculado pela fórmula 4.7, de Swamee & Jain). Para tubos de ferro fundido (FoFo), a rugosidade é calculada pela equação 2.2 e o coeficiente de crescimento da rugosidade pela equação 2.4, tem-se:

tubo de FoFo: $\alpha = 10^{(3,3-0,5 \times 8,5)} = 0,112 \text{ mm/ano};$

$$\varepsilon_{it} = 0,30 + 0,112t \quad (7.54)$$

Para os tubos de PVC, a variação da rugosidade com o tempo é muito pequena, no entanto, para fins práticos, sugeriu-se que se adote uma variação linear com um coeficiente de variação da rugosidade também bastante pequeno e obtido a partir dos valores sugeridos por autores ou fabricantes. Netto, 1998, sugere que se adote para tubos de PVC novos $C = 140$ e $C = 130$ para tubos usados com aproximadamente 20 anos, o que corresponde aos valores aproximados de $\varepsilon_o = 0,01 \text{ mm}$ e $\alpha = 0,0145 \text{ mm/ano}$. Neste caso tem-se:

$$\text{Tubo de PVC: } \varepsilon_{it} = 0,01 + 0,0145 t$$

O número de Reynolds para um trecho i no ano t (R_{eit}) é obtido da equação 2.1, tem-se:

$$R_{eit} = \frac{v_{it} D_i}{\nu} \quad (7.56)$$

O coeficiente de atrito do trecho i no ano t (f_{it}), pode ser calculado pela equação 4.7 (fórmula de Swamee & Jain).

b) Conservação de energia nos anéis

As equações de restrição de conservação da energia nos anéis são iguais às do Exemplo 7.1, ou seja, são as equações 7.22 e 7.23.

c) Continuidade nos nós

Também são equações idênticas às do Exemplo 7.1, ou seja, equações 7.24 a 7.29.

d) Velocidades máximas e mínimas

As desigualdades desta restrição são iguais às do Exemplo 7.1 (equações 7.30).

e) Restrições de diâmetro

Também são iguais às do Exemplo 7.1 (equações 7.31).

- Resolução através do método desenvolvido

- Aplicando-se o método, com o programa computacional desenvolvidos, obtiveram-se os resultados constantes das Planilhas 7.5 - 1ª Etapa - Dimensionamento Inicial e 7.6 - 1ª Etapa - Dimensionamento Otimizado.

Planilha 7.5 - Exemplo 7.2 - 1ª Etapa - Dimensionamento Inicial

Trechos	Vazão (l/s)	Dímetro (mm)	Rugosidade (mm) - 20 Anos	Coefficiente de Hazen Williams	Comp. do Trecho (m)	Perdas (m.c.a.)	Custo Unitário (R\$/m)	Custo Total (R\$)	Velocidade (m/s)
1	420,43	731,8	2,54	101,0	2540	4,83	550,70	1.398.767,31	1,00
2	188,10	489,5	2,54	98,2	1230	3,94	287,47	353.582,83	1,00
3	140,32	422,8	2,54	97,1	1430	5,55	226,84	324.382,01	1,00
4	60,00	276,5	0,30	130,2	1300	4,81	114,16	148.403,92	1,00
5	85,00	329,1	2,54	95,1	1490	8,04	151,27	225.398,20	1,00
6	147,33	433,2	2,54	97,3	1210	4,55	235,96	285.507,83	1,00
7	103,89	363,8	2,54	95,9	1460	6,90	177,91	259.752,59	1,00
8	63,60	284,6	0,30	130,3	1190	4,24	119,66	142.397,53	1,00
Altura =		24,00					Total =	3.138.192,23	
Cota Piezométrica de cab.(mca) =		54,00							

Nó	Altura Piezométrica (m)	Demanda (l/s)	Cota do Nó (m)	Pressão Disponível (mca)	Equação da Cont.	Equação da Cons. de Energia	
1	49,17	0,00	6,00	43,17	0,00	-6,25	Anel 1
2	45,23	47,78	5,50	39,73	0,00	7,65	Anel 2
3	39,69	80,32	5,50	34,19	0,00		
4	41,13	208,60	6,00	35,13	0,00		
5	44,63	43,44	4,50	40,13	0,00		
6	37,72	40,29	4,00	33,72	0,00		

Cota do Terreno (m)	Horas de Bombeamento (h)	Custo do kWh (R\$)	Rendimento do Bombeamento (%)	Custo Anual Unit. de Energ. Elét. (R\$/m)	Custo de Energia Elét. (R\$)	Custo Total do Sistema (R\$)
30,00	7299,8	0,07	75,00	19.503,63	468.087,17	3.606.279,40

Planilha 7.6 - Exemplo 7.2 - 1ª Etapa - Dimensionamento Otimizado

Trechos	Vazão (l/s)	Diametro (mm)	Rugosidade (mm) - 20 Anos	Coefficiente de Hazen Williams	Comp. do Trecho (m)	Perdas (m.c.a)	Custo Unitário (R\$/m)	Custo Total (R\$)	Velocidade (m3/s)
1	420,43	603,9	2,54	96,7	2540	13,36	403,64	1.025.234,29	1,47
2	136,89	400,5	2,54	96,0	1230	6,06	207,79	255.582,43	1,09
3	89,11	347,0	2,54	96,0	1430	6,39	164,83	235.707,82	0,94
4	8,79	223,6	0,30	145,5	1300	0,31	81,03	105.343,21	0,22
5	182,87	402,4	2,54	93,9	1490	12,77	209,46	312.088,15	1,44
6	100,67	356,3	2,54	95,7	1210	6,00	172,03	208.155,90	1,01
7	57,23	300,0	2,54	96,0	1460	5,84	130,27	190.199,40	0,81
8	16,94	229,9	0,30	138,8	1190	0,92	84,73	100.831,80	0,41
Altura =		27,13					Total =	2.433.143,00	
Cota Piezométrica de cab.(mca) =		57,13							

Nó	Altura Piezométrica (m)	Demanda (l/s)	Cota do Nó (m)	Pressão Disponível. (mca)	Equação da Cont.	Equação da Cons. de Energia	
1	43,77	0,00	6,00	37,77	0,00	0,00	Anel 1
2	37,71	47,78	5,50	32,21	0,00	0,00	Anel 2
3	31,31	80,32	5,50	25,81	0,00		
4	31,00	208,60	6,00	25,00	0,00		
5	37,77	43,44	4,50	33,27	0,00		
6	31,92	40,29	4,00	27,92	0,00		

Cota do Terreno (m)	Horas de Bombeamento (h)	Custo do kWh (R\$)	Rendimento do Bombeamento (%)	Custo Anual Unit. de Energ. Elét. (R\$/m)	Custo de Energia Elét. (R\$)	Custo Total do Sistema (R\$)
30,00	7299,8	0,07	75,00	19.503,63	529.093,01	2.962.236,01

- Segunda Etapa - Dimensionamento definitivo

Na segunda etapa do método, para cada trecho da rede, consideram-se como variáveis as vazões, as velocidades e dois comprimentos, correspondentes a dois diâmetros comerciais fixos, sendo um imediatamente inferior e outro imediatamente superior ao diâmetro encontrado na solução otimizada da 1ª etapa (Planilha 7.6).

Os dados obtidos na 1ª etapa e que serão básicos para o desenvolvimento da 2ª etapa, se encontram na Tabela 7.6.

Tabela 7.6 - Diâmetros comerciais, vazões e velocidades que serão usados na 2ª etapa.

Trechos	Diâmetro (mm)	Diâmetro (mm)	Vazão (l/s)	Velocidade (m3/s)
1	603,9	535,0 - 638,0	420,43	1,47
2	400,5	381,0 - 432,0	136,90	1,09
3	347,0	299,8 - 381,0	89,12	0,94
4	223,7	204,2 - 253,0	8,80	0,22
5	402,4	381,0 - 432,0	182,85	1,44
6	365,3	299,8 - 381,0	100,68	1,01
7	300,0	299,8 - 381,0	57,24	0,81
8	229,9	204,2 - 253,0	16,95	0,41

- Função objetivo

A função objetivo é obtida a partir da equação 7.32, tem-se:

$$C(L_{ij}, Q_{it}, H) = [(349,29 L_{1,535} + 433,37 L_{1,638} + 225,80 L_{2,381} + 267,68 L_{2,432} + 103,12 L_{3,299} + 225,82 L_{3,381} + 32,80 L_{4,204} + 43,41 L_{4,253} + 225,82 L_{5,381} + 267,66 L_{5,432} + 103,12 L_{6,299} + 225,82 L_{6,381} + 103,12 L_{7,299} + 225,82 L_{7,381} + 32,80 L_{8,204} + 43,41 L_{8,253} + \frac{9,81}{\eta} \left[\sum_{t=1}^{20} (n_{bt} \cdot Q_t \cdot p'_t) \right] H] \quad (7.57)$$

- Restrições

a) Pressão mínima nos nós

São iguais às restrições do Exemplo 7.1, dadas pelas equações 7.34 a 7.39.

Quando se aplica a fórmula de Hazen-Williams, as perdas de carga são calculadas pela equação 7.40.

b) Conservação de energia nos anéis

Para cada anel da rede, tem-se:

$$\text{anel 1: } [(h_{f5,20})_{381} + (h_{f5,20})_{432} - (h_{f2,20})_{381} - (h_{f2,20})_{432} - (h_{f3,20})_{299} - (h_{f3,20})_{381} - (h_{f4,20})_{204} - (h_{f4,20})_{253}] = 0 \quad (7.58)$$

$$\text{anel 2: } [(h_{f6,20})_{299} + (h_{f6,20})_{381} + (h_{f7,20})_{299} + (h_{f7,20})_{381} + (h_{f8,20})_{204} + (h_{f8,20})_{253} - (h_{f5,20})_{381} - (h_{f5,20})_{432}] = 0 \quad (7.59)$$

c) Continuidade nos nós

As equações da restrição de continuidade nos nós são as mesmas do Exemplo 7.1, dadas pelas equações 7.24 a 7.29.

d) Velocidades mínimas e máximas

As equações são iguais às do Exemplo 7.1, sendo dadas pelas equações 7.43 e 7.44.

e) Comprimentos dos sub-trechos

As restrições dos comprimentos dos sub-trechos são dadas pelas equações 7.45 a 7.52.

f) Não negatividade dos comprimentos dos sub-trechos

As equações da restrição de não negatividade dos sub-trechos são dadas pelas equações 7.53.

- Resolução através do método desenvolvido

O programa computacional desenvolvido neste trabalho fornece também uma espécie de relatório, onde se encontram os valores anuais das populações, vazões, rugosidades, horas de bombeamento, potências requeridas e valores presentes dos custos unitários de energia. Este relatório possibilita o acompanhamento das variações destes parâmetros durante todo o alcance do projeto.

Aplicando-se o método, com o programa computacional desenvolvidos, foram encontrados os valores constantes das Planilhas 7.7 – Exemplo 7.2 - 2ª Etapa - Dimensionamento inicial e 7.8 - Exemplo 7.2 - 2ª Etapa - Dimensionamento Definitivo.

Planilha 7.7 - Exemplo 7.2 - 2ª Etapa - Dimensionamento Inicial

Trechos	Vazão (l/s)	Diametro (mm)	Rugosidade (mm) - 20 Anos	Coefficiente de Hazen Williams	Comp. do Trecho (m)	Perdas (m.c.a)	Perdas no Trecho (m)	Custo Unitário (R\$)	Custo Total (R\$)	Velocidade (m3/s)
1	420,43	535,0	2,54	94	1.524	15,24	19,23	349,29	532.317,96	1,87
	420,43	638,0	2,54	98	1.016	3,99		433,37	440.303,92	1,32
2	136,89	381,0	2,54	95	738	4,74	6,36	225,82	166.655,16	1,20
	136,89	432,0	2,54	98	492	1,62		267,66	131.688,72	0,93
3	89,11	299,8	0,30	128	858	4,58	6,13	103,12	88.476,96	1,26
	89,11	381,0	2,54	98	572	1,56		225,82	129.169,04	0,78
4	8,79	204,2	0,30	143	780	0,30	0,37	59,24	46.207,20	0,27
	8,79	252,0	0,30	149	520	0,07		78,52	40.830,40	0,18
5	182,87	381,0	2,54	93	894	10,25	13,75	225,82	201.883,08	1,60
	182,87	432,0	2,54	96	596	3,50		267,66	159.525,36	1,25
6	100,67	299,8	0,30	127	726	4,95	6,62	103,12	74.865,12	1,43
	100,67	381,0	2,54	97	484	1,68		225,82	109.296,88	0,88
7	57,23	299,8	0,30	133	876	1,93	2,58	103,12	90.333,12	0,81
	57,23	381,0	2,54	102	584	0,65		225,82	131.878,88	0,50
8	16,94	204,2	0,30	135	714	1,03	1,26	59,24	42.297,36	0,52
	16,94	252,0	0,30	141	476	0,23		78,52	37.375,52	0,34
Altura =		27,13						Total =	2.423.104,68	
Cota Piezométrica de cab.(mca) =		57,13								

Trechos	Vazão Minimizada	Comprimento L1	Comprimento L2	Soma Lf=(L1+L2)	Dif. [L-(L1+L2)]
1	420,43	1.524	1.016	2.540	0,00
2	136,89	738	492	1.230	0,00
3	89,11	858	572	1.430	0,00
4	8,79	780	520	1.300	0,00
5	182,87	894	596	1.490	0,00
6	100,67	726	484	1.210	0,00
7	57,23	876	584	1.460	0,00
8	16,94	714	476	1.190	0,00

Nó	Altura Piezométrica (m)	Demanda (l/s)	Cota do Nó (m)	Pressão Disponível (mca)	Equação da Cont.	Equação da Cons. de Energia	
1	37,90	0,00	6,00	31,90	0,00	-2,61	Anel 1
2	31,54	47,78	5,50	26,04	0,00	-3,29	Anel 2
3	25,41	80,32	5,50	19,91	0,00		
4	24,14	208,60	6,00	18,14	0,00		
5	31,27	43,44	4,50	26,77	0,00		
6	28,69	40,29	4,00	24,69	0,00		

Cota do Terreno (m)	Horas de Bombeamento (h)	Custo do kWh (R\$)	Rendimento do Bombeamento (%)	Custo Anual Unit. de Energ. Elét. (R\$/m)	Custo de Energia Elét. (R\$)	Custo Total do Sistema (R\$)
30,00	7299,8	0,07	75,00	19.503,63	529.093,01	2.952.197,69

Planilha 7.8 - Exemplo 7.2 - 2ª Etapa - Dimensionamento Definitivo

Trechos	Vazão (l/s)	Dímetro (mm)	Rugosidade (mm) - 20 Anos	Coefficiente de Hazen Williams	Comp. do Trecho (m)	Perdas (m c.a.)	Perdas no Trecho (m)	Custo Unitário (R\$)	Custo Total (R\$)	Velocidade (m3/s)
1	420,43	535,0	2,54	94,0	40	0,40	10,22	349,29	13.829,47	1,87
	420,43	638,0	2,54	97,9	2500	9,83		433,37	1.083.601,34	1,32
2	138,07	381,0	2,54	94,8	1037	6,77	7,42	225,82	234.114,68	1,21
	138,07	432,0	2,54	97,7	193	0,65		267,66	51.730,28	0,94
3	90,29	299,8	0,30	128,0	1430	7,83	7,83	103,12	147.461,60	1,28
	90,29	381,0	2,54	98,1	0	0,00		225,82	0,00	0,79
4	9,97	204,2	0,30	141,3	1300	0,65	0,65	59,24	77.012,00	0,30
	9,97	252,0	0,30	147,7	0	0,00		78,52	0,00	0,20
5	176,44	381,0	2,54	92,9	1490	15,90	15,90	225,82	336.471,80	1,55
	176,44	432,0	2,54	95,8	0	0,00		267,66	0,00	1,20
6	105,92	299,8	0,30	126,4	1210	9,12	9,12	103,12	124.775,20	1,50
	105,92	381,0	2,54	96,9	0	0,00		225,82	0,00	0,93
7	62,48	299,8	0,30	131,9	1460	3,83	3,83	103,12	150.555,20	0,89
	62,48	381,0	2,54	101,1	0	0,00		225,82	0,00	0,55
8	22,19	204,2	0,30	132,5	1190	2,95	2,95	59,24	70.495,60	0,68
	22,19	252,0	0,30	138,4	0	0,00		78,52	0,00	0,45
Altura =		27,13						Total =	2.290.047,17	
Cota Piezométrica de cab (mca) =		57,13								

Trechos	Vazão Minimizada	Comprimento L1	Comprimento L2	Soma Lf=(L1+L2)	Dif. [L-(L1+L2)]
1	420,43	40	2500	2540	0,00
2	138,07	1037	193	1230	0,00
3	90,29	1430	0	1430	0,00
4	9,97	1300	0	1300	0,00
5	176,44	1490	0	1490	0,00
6	105,92	1210	0	1210	0,00
7	62,48	1460	0	1460	0,00
8	22,19	1190	0	1190	0,00

Nó	Altura Piezométrica (m)	Demanda (l/s)	Cota do Nó (m)	Pressão Disponível (mca)	Equação da Cont.	Equação da Cons. de Energia	
1	46,90	0,00	6,00	40,90	0,00	0,00	Anel 1
2	39,48	47,78	5,50	33,98	0,00	0,00	Anel 2
3	31,65	80,32	5,50	26,15	0,00		
4	31,00	208,60	6,00	25,00	0,00		
5	37,78	43,44	4,50	33,28	0,00		
6	33,95	40,29	4,00	29,95	0,00		

Cota do Terreno (m)	Horas de Bombeamento (h)	Custo do kWh (R\$)	Rendimento do Bombeamento (%)	Custo Anual Unit. de Energ. Elét. (R\$/m)	Custo de Energia Elét. (R\$)	Custo Total do Sistema (R\$)
30,00	7299,8	0,07	75,00	19.503,63	529.093,01	2.819.140,19

Planilha 7.9 – Relatório do Exemplo 7.2

Exemplo 7.2 – Relatório Anual de Operação do Projeto

Altura de Bombeamento: H (m) = 27,13

Ano	População (hab.)	Vazão (l/s)	Rugosidade (mm) FoFo	Rugosidade (mm) PVC	Horas Bombeamento	Potência Requerida (KW)	Valor Presente do Custo de Energia (R\$)
2001	62949	262,29	0,412	0,024	4554,1	93,07	26.869,05
2002	64947	270,61	0,524	0,039	4698,7	96,02	27.069,08
2003	66944	278,94	0,637	0,053	4843,2	98,98	27.219,02
2004	68942	287,26	0,749	0,068	4987,7	101,93	27.321,09
2005	70939	295,58	0,861	0,082	5132,2	104,88	27.377,51
2006	72937	303,90	0,973	0,097	5276,7	107,84	27.390,57
2007	74934	312,23	1,085	0,111	5421,2	110,79	27.362,54
2008	76932	320,55	1,198	0,126	5565,7	113,74	27.295,71
2009	78929	328,87	1,310	0,140	5710,2	116,69	27.192,34
2010	80927	337,19	1,422	0,155	5854,7	119,65	27.054,68
2011	82924	345,52	1,534	0,169	5999,2	122,60	26.884,93
2012	84922	353,84	1,646	0,184	6143,7	125,55	26.685,25
2013	86919	362,16	1,759	0,198	6288,3	128,51	26.457,75
2014	88917	370,49	1,871	0,213	6432,8	131,46	26.204,49
2015	90914	378,81	1,983	0,227	6577,3	134,41	25.927,46
2016	92912	387,13	2,095	0,242	6721,8	137,37	25.628,6
2017	94909	395,45	2,207	0,256	6866,3	140,32	25.309,78
2018	96906	403,78	2,320	0,271	7010,8	143,27	24.972,78
2019	98904	412,10	2,432	0,285	7155,3	146,23	24.619,34
2020	100901	420,42	2,544	0,300	7299,8	149,18	24.251,11

- Análise dos Resultados do Exemplo 7.2

Fazendo-se uma análise comparativa dos resultados finais, obtidos com a aplicação do método ora desenvolvido, Planilha 7.10, com os do Exemplo 5.3.1 de Gomes, 2002, Planilha B.4, verifica-se que:

- para os tubos de ferro fundido sem revestimento interno, a rugosidade variou de 0,30 mm para 2,54 mm, em consequência, houve aumentos consideráveis nas perdas de carga. No trecho 5, por exemplo, o coeficiente de Hazen-Williams passou de 126,5 para 92,9, sofrendo uma redução de 36,27%, e a perda de carga teve um acréscimo de 57,27%, bastante significativo, como consequência os diâmetros aumentaram em vários trechos;

- houve um aumento da ordem de 7,02 % nos custos de implantação das tubulações, devido ao aumento dos diâmetros em alguns trechos;

- os custos com a operação da estação de bombeamento (energia elétrica) diminuíram cerca de 20,35 %;

- a altura manométrica aumentou em 29,81 %, o que causaria aumento do consumo de energia de bombeamento. No entanto, como no método proposto são calculados os custos de energia, a cada ano, a soma destes ainda é menor do que os custos com energia calculados através do PNL2000;

- o custo total do projeto teve um aumento de apenas 0,54 %, muito pequeno, praticamente desprezível. Observa-se que, quando se consideram as variações dos parâmetros, mesmo havendo aumentos dos diâmetros em alguns trechos da rede, o custo total pode aumentar pouco, pois há uma compensação devido a diminuição dos custos de operação.

Destas análises pode-se concluir que, tendo em vista os aumentos dos diâmetros em vários sub-trechos da rede, os projetos dimensionados sem se considerar as variações dos parâmetros das condições de contorno do projeto podem conduzir a uma solução onde os diâmetros estão sub-dimensionados nestes sub-trechos. Pode-se concluir também que, mesmo tendo havido aumento no custo de implantação das tubulações, há apenas um pequeno aumento no custo total do projeto, isto ocorre porque há uma redução acentuada do custo de energia, que compensa o aumento do custo de implantação.

7.4 - EXEMPLO 7.3

Neste estudo de caso, pretende-se dimensionar o sistema de abastecimento de água da cidade de Itororó, na Bahia, adaptado de Porto (1998), Figura 7.3. Propõe-se fazer o dimensionamento otimizado da rede de abastecimento de água da cidade de Itororó através do método de otimização desenvolvido.

Na Figura 7.3 além do esquema da rede de distribuição encontram-se os sentidos dos escoamentos admitidos para as vazões e as numerações dos nós e dos trechos.

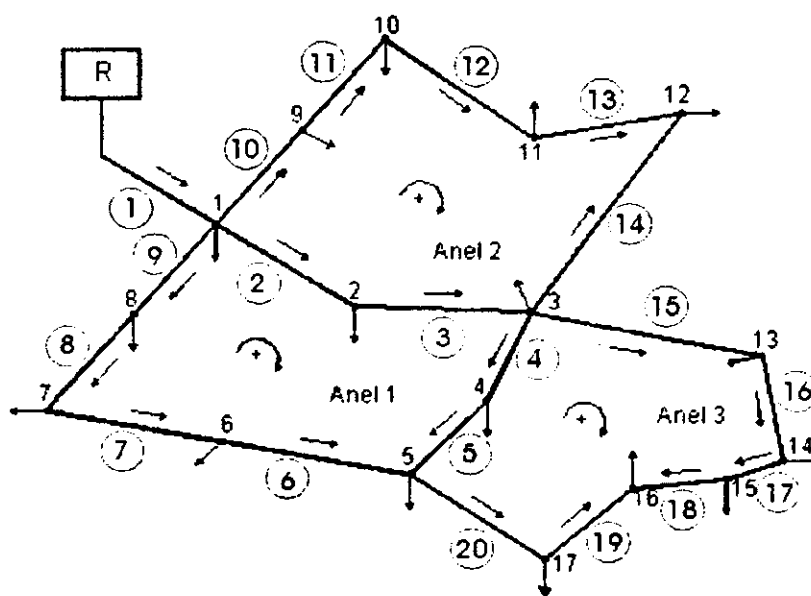


Figura 7.3 - Esquema da rede de distribuição, sentidos das vazões e numeração dos nós e dos trechos
(Extraída de Porto, 1998)

A Tabela 7.7 contém as demandas de vazões e as cotas altimétricas do terreno nos nós dos anéis da rede.

Na Tabela 7.8 encontram-se os comprimentos dos trechos da rede de distribuição.

Devem ser empregados tubos de PVC rígido, PBA, para diâmetros inferiores ao DN 100 (pressão nominal de 75 mca) e DEFoFo para os demais diâmetros até o DN 500, conforme a Tabela 7.9, que contém também os custos dos tubos e os custos de instalação determinados no Apêndice A, baseados em valores fornecidos por técnicos da CAGEPA - Companhia de Água e Esgoto da Paraíba.

Tabela 7.7 - Vazões e cotas dos nós da rede de distribuição

Nó	Vazão (l/s)	Cota (m)	Nó	Vazão (l/s)	Cota (m)
R	-	222,0	9	3,73	211,5
1	6,17	220,5	10	2,26	213,5
2	2,33	215,6	11	3,49	205,5
3	4,65	210,4	12	7,46	208,8
4	1,71	210,5	13	6,21	215,5
5	5,31	209,5	14	4,96	212,6
6	4,28	213,2	15	9,83	207,5
7	4,20	218,5	16	5,20	219,4
8	3,03	230,7	17	1,48	220,5

Tabela 7.8 - Comprimentos dos trechos

Trecho	Comprimento (m)	Trecho	Comprimento (m)
1	324	11	152
2	124	12	168
3	184	13	177
4	206	14	225
5	103	15	254
6	202	16	263
7	134	17	133
8	227	18	321
9	167	19	105
10	166	20	169

Tabela 7.9 - Diâmetros nominais internos, custos dos tubos e custos de instalação

DN	Tubo de PVC	Diâmetro interno (mm)	Custo do tubo (R\$/m)	Custo de Montagem (R\$/m)	Custo de Implantação (R\$/m)
50	PBA	53,4	6,07	23,37	29,44
75	"	75,6	12,24	24,26	36,50
100	DEFoFo	108,4	20,30	25,03	45,33
150	"	156,4	33,80	26,89	60,69
200	"	204,2	57,62	28,78	86,40
250	"	252,0	88,50	30,45	118,95
300	"	299,8	122,24	32,21	154,45
400	"	432,0	207,05	35,64	242,69
500	"	535,0	319,44	38,62	358,06

Dados complementares:

- . pressão mínima requerida nos nós: 15 mca;
- . velocidade máxima de circulação da água: $v_{\text{máx}} = 3,5 \text{ m/s}$;
- . velocidade mínima de circulação: $v_{\text{mín}} = 0,2 \text{ m/s}$;

- . viscosidade da água a 20°C: $\nu = 1,007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$;
- . rendimento esperado do conjunto motor-bomba: 75% ($\eta = 0,75$);
- . alcance do projeto: 25 anos;
- . bombeamento diário ao final do alcance: 20 h/dia;
- . taxa de juro anual: 10 % ($i = 0,10$);
- . taxa de aumento anual de energia: 6 % ($e = 0,06$);
- . custo da tarifa de consumo: 0,12 R\$/kWh;
- . custo da taxa de demanda da energia elétrica : 8,5 R\$/kW.mês;
- . rugosidade inicial dos tubos de PVC: $\varepsilon_o = 0,01 \text{ mm}$;
- . populações da cidade de Itororó: ano de 1991: $P'_{1991} = 17.980$ (estimada pela da Bahia); ano de 2000: $P'_{2000} = 19.799$ (Censo de 2000);
- . água: $k_1 = 1,2$; $k_2 = 1,5$ e $q = 0,150 \text{ m}^3/\text{s}$;
- . concreto estrutural utilizado para o reservatório elevado:
custo unitário: 950,00 R\$/m³;
volume de concreto do reservatório elevado com capacidade para 50,0 m³ de água: 16,0 m³;
volumes dos pilares mais fundações: $V = 2,2928 e^{0,1219 H}$ (função obtida através dos valores do Quadro 1, por meio de uma curva de ajuste).

A partir dos custos de implantação e dos diâmetros constantes na Tabela 7.9 determinou-se a função que relaciona o custo de implantação da tubulação, $F(P_{D_i})$, com o seu diâmetro, D_i , Figura 7.4.

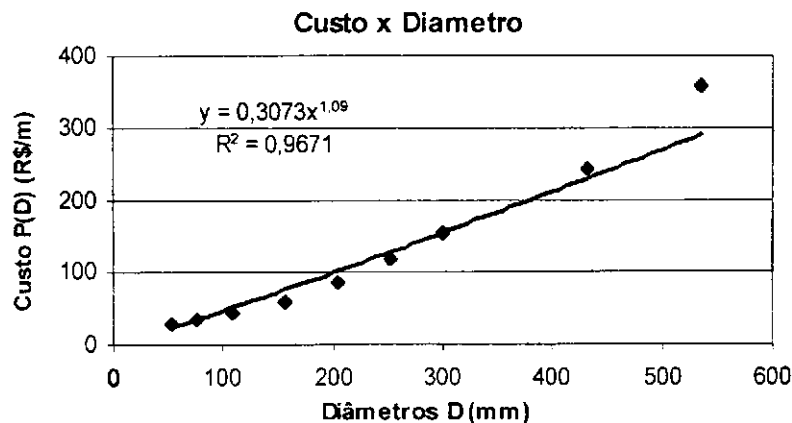


Figura 7.4 - Curva de ajuste : custo de implantação versus diâmetro do tubo.

Obteve-se:

$$F(P_{D_i}) = 0,3073 (D_i)^{1,09} \quad (7.60)$$

- Primeira Etapa: Dimensionamento Inicial

- Função Objetivo

A função objetivo é obtida a partir da equação 7.2, tem-se:

$$C(D_i, Q_{it}, H) = \sum_{i=1}^{20} L_i F(P_{D_i}) + \frac{9,81}{\eta} \left[\sum_{t=1}^{25} (n_{bt} \cdot Q_t \cdot p_t') \right] H \quad (7.61)$$

sendo: $F(P_{D_i})$ = função determinada pela equação 7.63;

$$Q_t = \frac{P_t^I \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot q}{86400} = 0,313 \times 10^{-5} P_t^I \quad (7.62)$$

$$n_{bt} = 365 \cdot K_B \cdot Q_t \quad (7.63)$$

p_t^I - função de variação da população de Itororó;

$$p_t' = \frac{p_1(1+e)^{(t-1)}}{(1+i)^t} = \frac{p_1(1+0,06)^{(t-1)}}{(1+0,10)^t} = \frac{p_1(1,06)^{(t-1)}}{1,10^t} \quad (7.64)$$

- Determinação da função de variação da população da cidade de Itororó, pelo Método de Tendência de Crescimento Demográfico, tem-se:

. função de variação da população do Nordeste: é dada pela equação 7.6.

. função de variação da população da Bahia:

população da Bahia: $P_{1991}^{Ba} = 11.867.991$ hab. (Censo de 1991); $P_{2000}^{Ba} = 13.870.250$ hab. (Censo de 2000);

população do Nordeste: $P_{1991}^N = 42.497.450$ hab. (Tabela 7.4); $P_{2000}^N = 47.741.711$ hab. (Tabela 7.4);

$$a_i^{Ba} = \frac{13.870.250 - 11.867.991}{47.741.711 - 42.497.540} = 0,38181$$

$$b_i^{Ba} = 11.867.991 - 0,38181 \times 42.497.540 = - 4.357.994,7$$

$$P_t^{Ba} = 0,38181 P_t^N - 4.357.994,7 \quad \therefore$$

$$P_t^{Ba} = 0,087156 P_t^B - 928.696 \quad (7.65)$$

. função de variação da população de Itororó:

$$a_t^I = \frac{19.799 - 17.980}{13.870.250 - 11.867.991} = 0,00091$$

$$b_t^I = 17.980 - 0,00091 \times 11.867.991 = 7.180,13$$

$$P_t^I = 0,00091 P_t^{Ba} + 7.180,13 \quad \therefore$$

$$P_t^I = 0,0000793 P_t^B + 6.335,$$

sendo a estimativa da população do Brasil dada pela equação 4.18, vem:

$$P_t^I = 19.757 + 186,07 t \quad (7.66)$$

Portanto, a estimativa da população da cidade de Itororó para um ano “t” qualquer do alcance do projeto (a partir do ano de 2000), é determinada através da equação 7.66

A estimativa da população da cidade de Itororó para o final do alcance do projeto é:

$$P_{25}^I = 19.757 + 186,07 \times 25 = 24.409 \text{ hab.}$$

A vazão média prevista para abastecer a cidade de Itororó ao final do alcance do projeto é dada pela equação 7.62 tem-se:

$$Q_{25}^I = 0,313 \times 10^{-5} \times 24.409 = 0,0763 \text{ m}^3/\text{s}$$

O coeficiente de bombeamento é:

$$K_B = \frac{20}{0,0763} = 262,12 \text{ h}/(\text{m}^3/\text{s})$$

Cálculo da tarifa total de energia (consumo mais demanda): considerando-se 20 h/dia de bombeamento, tem-se 360 horas por mês, logo, a taxa de demanda corresponde a 0,014 R\$/kWh, portanto, tem-se:

$$p_1 = 0,12 + 0,014 = 0,134 \text{ R\$/kWh}$$

Tem-se:

$$p_t = \frac{0,134(1,06)^{(t-1)}}{(1,10)^t} \quad (7.67)$$

A função objetivo será dada por:

$$\begin{aligned} C(D_i, Q_{it}, H) = & [L_1 F(P_{D_1}) + L_2 F(P_{D_2}) + L_3 F(P_{D_3}) + L_4 F(P_{D_4}) + L_5 F(P_{D_5}) + \\ & L_6 F(P_{D_6}) + L_7 F(P_{D_7}) + L_8 F(P_{D_8}) + L_9 F(P_{D_9}) + L_{10} F(P_{D_{10}}) + L_{11} F(P_{D_{11}}) \\ & + L_{12} F(P_{D_{12}}) + L_{13} F(P_{D_{13}}) + L_{14} F(P_{D_{14}}) + L_{15} F(P_{D_{15}}) + L_{16} F(P_{D_{16}}) + L_{17} F(P_{D_{17}}) + \\ & \frac{9,81}{\eta} \left[\sum_{t=1}^{25} (n_{bt} \cdot Q_t \cdot p_t') \right] H \end{aligned} \quad (7.68)$$

Então, tem-se:

$$\begin{aligned} C(D_i, Q_{it}, H) = & [324 \times 0,3073 D_1^{1,09} + 124 \times 0,3073 D_2^{1,09} + 184 \times 0,3073 D_3^{1,09} + \\ & 206 \times 0,3073 D_4^{1,09} + 103 \times 0,3073 D_5^{1,09} + 202 \times 0,3073 D_6^{1,09} + 134 \times 0,3073 D_7^{1,09} \\ & + 227 \times 0,3073 D_8^{1,09} + 167 \times 0,3073 D_9^{1,09} + 166 \times 0,3073 D_{10}^{1,09} + 152 \times 0,3073 \\ & D_{11}^{1,09} + 168 \times 0,3073 D_{12}^{1,09} + 177 \times 0,3073 D_{13}^{1,09} + 225 \times 0,3073 D_{14}^{1,09} + 254 \times \\ & 0,3073 D_{15}^{1,09} + 263 \times 0,3073 D_{16}^{1,09} + 133 \times 0,3073 D_{17}^{1,09} + 321 \times 0,3073 D_{18}^{1,09} + \\ & 105 \times 0,3073 D_{20}^{1,09} + 169 \times 0,3073 D_{20}] + \frac{9,81}{\eta} \left[\sum_{t=1}^{25} (n_{bt} \cdot Q_t \cdot p_t') \right] H \end{aligned} \quad (7.69)$$

Na equação 7.68, a última parcela corresponde ao valor presente dos custos de operação da rede. Usando-se o cálculo computacional através do programa desenvolvido, pode-se trabalhar diretamente com as funções Q_t (equação 7.62), n_{bt} (equação 7.63) e p_t' (equação 7.64).

No caso do projetista desejar calcular os custos de operação considerando como única variável o tempo, tem-se:

$$\frac{9,81}{\eta} \left[\sum_{t=1}^{25} (n_{br} \cdot Q_t \cdot p_t) \right] H = 1,056 \times 10^{-6} \left[\sum_{t=1}^{25} (19.757 + 186,07t)^2 \cdot \frac{1,06^{(t-1)}}{1,10^t} \right] H \quad (7.70)$$

- Restrições

a) Pressão mínima nos nós

Para que seja atendida a restrição de pressão mínima nos nós, em qualquer nó da rede a pressão disponível deve ser maior ou igual a 15 mca.

A cota piezométrica do reservatório é:

$$Z = H + 222,0 \quad (7.71)$$

Portanto, serão 17 inequações de restrição de pressão mínima, sendo as perdas de carga calculadas para o alcance do projeto ($t = 25$ anos), tem-se:

$$\text{nó 1: } Z - (h_{f1,25}) \geq 220,5 + 15 \quad (7.72)$$

$$\text{nó 2: } Z - (h_{f1,25} + h_{f2,25}) \geq 215,6 + 15 \quad (7.73)$$

$$\text{nó 3: } Z - (h_{f1,25} + h_{f2,25} + h_{f3,25}) \geq 210,4 + 15 \quad (7.74)$$

$$\text{nó 4: } Z - (h_{f1,25} + h_{f2,25} + h_{f3,25} + h_{f4,25}) \geq 210,5 + 15 \quad (7.75)$$

$$\text{nó 5: } Z - (h_{f1,25} + h_{f2,25} + h_{f3,25} + h_{f4,25} + h_{f5,25}) \geq 209,5 + 15 \quad (7.76)$$

$$\text{nó 6: } Z - (h_{f1,25} + h_{f9,25} + h_{f8,25} + h_{f7,25}) \geq 213,2 + 15 \quad (7.77)$$

$$\text{nó 7: } Z - (h_{f1,25} + h_{f9,25} + h_{f8,25}) \geq 218,5 + 15 \quad (7.78)$$

$$\text{nó 8: } Z - (h_{f1,25} + h_{f9,25}) \geq 230,7 + 15 \quad (7.79)$$

$$\text{nó 9: } Z - (h_{f1,25} + h_{f10,25}) \geq 211,5 + 15 \quad (7.81)$$

$$\text{nó 10: } Z - (h_{f1,25} + h_{f10,25} + h_{f11,25}) \geq 213,5 + 15 \quad (7.82)$$

$$\text{nó 11: } Z - (h_{f1,25} + h_{f10,25} + h_{f11,25} + h_{f12,25}) \geq 205,5 + 15 \quad (7.83)$$

$$\text{nó 12: } Z - (h_{f1,25} + h_{f10,25} + h_{f11,25} + h_{f12,25} + h_{f13,25}) \geq 208,8 + 15 \quad (7.84)$$

$$\text{nó 13: } Z - (h_{f1,25} + h_{f2,25} + h_{f3,25} + h_{f5,25}) \geq 215,5 + 15 \quad (7.85)$$

$$\text{nó 14: } Z - (h_{f1,25} + h_{f2,25} + h_{f3,25} + h_{f5,25} + h_{f6,25}) \geq 212,6 + 15 \quad (7.86)$$

$$\text{nó 15: } Z - (h_{f1,25} + h_{f2,25} + h_{f3,25} + h_{f5,25} + h_{f6,25} + h_{f7,25}) \geq 207,5 + 15 \quad (7.87)$$

$$\text{nó 16: } Z - (h_{f1,25} + h_{f2,25} + h_{f3,25} + h_{f5,25} + h_{f6,25} + h_{f7,25} + h_{f8,25}) \geq 219,4 + 15 \quad (7.88)$$

$$\text{nó 17: } Z - (h_{f1,25} + h_{f9,25} + h_{f8,25} + h_{f7,25} + h_{f6,25} + h_{f20,25}) \geq 220,5 + 15 \quad (7.89)$$

As perdas de carga são calculadas pela fórmula de Darcy-Weisbach (equação 4.5).

O coeficiente de atrito do trecho “i” no ano “t” (f_{it}) foi calculado pela equação 4.7.

A variação da rugosidade dos tubos de PVC com revestimento de argamassa foi considerada linear, tomando-se $\alpha = 0,0145$ mm/ano (de acordo com a sugestão adotada no Exemplo 7.2), desta forma, a rugosidade foi calculada pela equação 7.55.

O número de Reynolds foi calculado pela equação 7.56.

b) Conservação da energia nos anéis

Para cada anel da rede, deve-se ter:

$$\text{anel 1: } h_{f2,25} + h_{f3,25} + h_{f4,25} + h_{f5,25} - h_{f6,25} - h_{f7,25} - h_{f8,25} - h_{f9,25} = 0 \quad (7.90)$$

$$\text{anel 2: } h_{f10,25} + h_{f11,25} + h_{f12,25} + h_{f13,25} - h_{f14,25} - h_{f15,25} - h_{f16,25} = 0 \quad (7.91)$$

$$\text{anel 3: } h_{f17,25} + h_{f18,25} + h_{f19,25} + h_{f20,25} - h_{f21,25} - h_{f22,25} - h_{f23,25} - h_{f24,25} = 0 \quad (7.92)$$

c) Continuidade nos nós

Em cada nó da rede deve ser atendida a restrição de continuidade nos nós, tem-se:

$$\text{nó 1: } Q_1 - Q_2 - Q_9 - Q_{10} = 6,17 \quad (7.93)$$

$$\text{nó 2: } Q_2 - Q_3 = 2,33 \quad (7.94)$$

$$\text{nó 3: } Q_3 - Q_4 - Q_{14} - Q_{15} = 4,65 \quad (7.95)$$

$$\text{nó 4: } Q_4 - Q_5 = 1,71 \quad (7.96)$$

$$\text{nó 5: } Q_5 + Q_6 - Q_{20} = 5,31 \quad (7.97)$$

$$\text{nó 6: } Q_7 - Q_6 = 4,28 \quad (7.98)$$

$$\text{nó 7: } Q_8 - Q_7 = 4,20 \quad (7.99)$$

$$\text{nó 8: } Q_9 - Q_8 = 3,03 \quad (7.100)$$

$$\text{nó 9: } Q_{10} - Q_{11} = 3,73 \quad (7.101)$$

$$\text{nó 10: } Q_{11} - Q_{12} = 2,26 \quad (7.102)$$

$$\text{nó 11: } Q_{12} - Q_{13} = 3,49 \quad (7.103)$$

$$\text{nó 12: } Q_{13} + Q_{14} = 7,46 \quad (7.104)$$

$$\text{nó 13: } Q_{15} - Q_{16} = 6,21 \quad (7.105)$$

$$\text{nó 14: } Q_{16} - Q_{17} = 4,96 \quad (7.106)$$

$$\text{nó 15: } Q_{17} - Q_{18} = 9,83 \quad (7.107)$$

$$\text{nó 16: } Q_{18} + Q_{19} = 5,20 \quad (7.108)$$

$$\text{nó 17: } Q_{20} - Q_{19} = 1,48 \quad (7.109)$$

d) Velocidades mínima e máxima

As restrições de velocidades mínima e máxima são:

$$v_{1,25} \geq 0,2 \text{ m/s}, \dots, v_{20,25} \geq 0,2 \text{ m/s} \quad (7.110)$$

$$v_{1,25} \leq 3,5 \text{ m/s}, \dots, v_{20,25} \leq 3,5 \text{ m/s} \quad (7.111)$$

e) Restrições de diâmetros

Os diâmetros internos disponíveis estão compreendidos entre 53,4 mm e 553,0 mm (Tabela 7.9), como a rede tem 20 trechos, deve-se ter 40 equações de restrições do tipo:

$$D_1 \geq 53,4 \text{ mm}, \dots, D_{20} \geq 53,4 \text{ mm}. \quad (7.112)$$

$$D_1 \leq 553,0 \text{ mm}, \dots, D_{20} \leq 553,0 \text{ mm}. \quad (7.113)$$

- Resolução através do método desenvolvido

Aplicando-se o método, com o programa computacional desenvolvidos, foram encontrados os valores que constam das Planilhas 7.10 a 7.13.

Planilha 7.10 - Exemplo 7.3 - 1ª Etapa - Dimensionamento Inicial - Sem Reservatório

Trechos	Vazão (l/s)	Diametro (mm)	Rugosidade (mm) - 25 Anos	Coefficiente de Hazen Williams	Comp. do Trecho (m)	Perdas (m.c.a)	Custo Unitário (R\$/m)	Custo Total (R\$)	Velocidade (m3/s)
1,00	76,30	311,77	0,373	127,1416	324	1,09	159,44	51.658,62	1,00
2,00	37,16	217,57	0,373	124,9498	124	0,65	107,98	13.389,55	1,00
3,00	34,83	210,64	0,373	124,7402	184	1,01	104,26	19.183,52	1,00
4,00	3,00	61,82	0,373	115,2100	206	5,48	27,62	5.690,60	1,00
5,00	1,29	40,54	0,373	111,1566	103	4,79	17,49	1.801,27	1,00
6,00	6,52	91,14	0,373	118,5766	202	3,24	42,06	8.496,96	1,00
7,00	10,80	117,29	0,373	120,5875	134	1,55	55,29	7.408,75	1,00
8,00	15,00	138,23	0,373	121,8235	227	2,13	66,06	14.995,08	1,00
9,00	18,03	151,55	0,373	122,4913	167	1,39	72,98	12.187,75	1,00
10,00	14,94	137,96	0,373	121,8088	166	1,56	65,91	10.941,78	1,00
11,00	11,21	119,50	0,373	120,7305	152	1,72	56,42	8.575,30	1,00
12,00	8,95	106,78	0,373	119,8548	168	2,20	49,94	8.389,69	1,00
13,00	5,46	83,40	0,373	117,8368	177	3,18	38,21	6.763,08	1,00
14,00	2,00	50,48	0,373	113,3150	225	7,81	22,18	4.989,82	1,00
15,00	25,18	179,10	0,373	123,6593	254	1,71	87,46	22.213,65	1,00
16,00	18,97	155,45	0,373	122,6727	263	2,12	75,02	19.729,64	1,00
17,00	14,01	133,59	0,373	121,5713	133	1,30	63,66	8.466,65	1,00
18,00	4,18	72,97	0,373	116,6900	321	6,87	33,06	10.612,81	1,00
19,00	1,02	36,05	0,373	109,9530	105	5,71	15,40	1.616,90	1,00
20,00	2,50	56,43	0,373	114,3697	169	5,07	25,03	4.229,46	1,00
Altura =		20,00					Total =	241.340,88	
Cota Piezométrica de cab (mca) =		242,00							

Nó	Altura Piezométrica (m)	Demanda (l/s)	Cota do Nó (m)	Pressão Disponível (mca)	Equação da Cont.	Equação da Cons. de Energia	
1,00	240,91	6,17	220,50	20,41	0,00	3,62	Anel 1
2,00	240,26	2,33	215,60	24,66	0,00	-0,82	Anel 2
3,00	239,25	4,65	210,40	28,85	0,00	-9,03	Anel 3
4,00	233,77	1,71	210,50	23,27	0,00		
5,00	228,98	5,31	209,50	19,48	0,00		
6,00	235,84	4,28	213,20	22,64	0,00		
7,00	237,39	4,20	218,50	18,89	0,00		
8,00	239,52	3,03	230,70	8,82	0,00		
9,00	239,35	3,73	211,50	27,85	0,00		
10,00	237,63	2,26	213,50	24,13	0,00		
11,00	235,44	3,49	205,50	29,94	0,00		
12,00	237,73	7,46	208,80	28,93	0,00		
13,00	237,53	6,21	215,50	22,03	0,00		
14,00	235,41	4,96	212,60	22,81	0,00		
15,00	234,10	9,83	207,50	26,60	0,00		
16,00	227,23	5,20	219,40	7,83	0,00		
17,00	227,53	1,48	220,50	7,03	0,00		

Cota do Terreno (m)	Horas de Bombeamento (h)	Custo do kWh (R\$)	Rendimento do Bombeamento (%)	Custo Anual Unit. de Energ. Elét. (R\$/m)	Custo de Energia Elét. (R\$)	Custo Total do Sistema (R\$)
222,00	7.297,74	0,134	75,00	11.816,15	236.322,94	477.663,81

Planilha 7.11 - Exemplo 7.3 - 1ª Etapa - Dimensionamento Otimizado - Sem Reservatório

Trecho	Vazão (l/s)	Diâmetro (mm)	Rugosidade (mm) - 25 Anos	Coefficiente de Hazen Williams	Comp. do Trecho (m)	Perdas (m c.a.)	Custo Unitário (R\$/m)	Custo Total (R\$)	Velocidade (m/s)
1	76,30	321,13	0,373	127,9227	324	0,93	164,63	53.341,54	0,94
2	45,86	202,34	0,373	120,9437	124	1,46	99,82	12.377,28	1,43
3	13,53	200,03	0,373	121,1549	184	2,08	98,58	18.138,37	1,39
4	12,80	115,44	0,373	118,5087	206	3,65	54,34	11.194,81	1,22
5	11,09	110,41	0,373	118,6872	193	1,73	51,78	5.333,47	1,16
6	0,45	53,40	0,373	129,7041	202	0,26	23,57	4.761,62	0,20
7	4,73	77,58	0,373	117,2131	134	2,65	35,33	4.733,90	1,00
8	8,93	94,27	0,373	116,5036	227	5,71	43,63	9.905,06	1,28
9	11,96	173,61	0,373	130,4613	167	0,30	84,55	14.120,53	0,51
10	12,31	90,97	0,373	112,5792	166	9,59	41,98	6.968,72	1,89
11	8,58	80,96	0,373	112,8162	152	7,91	37,00	5.624,32	1,67
12	6,32	73,35	0,373	112,9879	168	8,00	33,25	5.585,98	1,50
13	2,83	53,40	0,373	111,7105	177	9,12	23,57	4.172,31	1,26
14	4,63	53,40	0,373	107,3416	225	31,09	23,57	5.303,78	2,07
15	21,45	148,91	0,373	120,3133	254	3,29	71,60	18.187,21	1,23
16	15,24	133,75	0,373	120,7791	263	3,03	63,74	16.764,02	1,09
17	10,28	118,38	0,373	121,3253	133	1,33	55,85	7.427,40	0,93
18	0,45	53,40	0,373	129,7041	321	0,41	23,57	7.566,73	0,20
19	4,75	87,63	0,373	120,5530	105	1,10	40,32	4.233,22	0,79
20	6,23	99,19	0,373	121,3573	169	1,58	46,11	7.791,99	0,81
Altura =		24,93					Total =	223.532,28	
Cota Piezométrica de cab (mca) =		246,93							

Nº	Altura Piezométrica (m)	Demanda (l/s)	Cota do Nó (m)	Pressão Disponível (mca)	Equação da Cont.	Equação da Cons. de Energia	
1,00	246,00	6,17	220,50	25,50	0,00	0,00	Anel 1
2,00	244,51	2,33	215,60	28,91	0,00	0,00	Anel 2
3,00	242,46	4,65	210,40	32,06	0,00	0,00	Anel 3
4,00	238,81	1,71	210,50	28,31	0,00		
5,00	237,08	5,31	209,50	27,58	0,00		
6,00	237,34	4,28	213,20	24,14	0,00		
7,00	239,99	4,20	218,50	21,49	0,00		
8,00	245,70	3,03	230,70	15,00	0,00		
9,00	236,41	3,73	211,50	24,91	0,00		
10,00	228,50	2,26	213,50	15,00	0,00		
11,00	220,50	3,49	205,50	15,00	0,00		
12,00	236,88	7,46	208,80	28,08	0,00		
13,00	239,17	6,21	215,50	23,67	0,00		
14,00	236,13	4,96	212,60	23,54	0,00		
15,00	234,81	9,83	207,50	27,31	0,00		
16,00	234,40	5,20	219,40	15,00	0,00		
17,00	235,50	1,48	220,50	15,00	0,00		

Cota do Terreno (ml)	Horas de Bombeamento (h)	Custo do kWh (R\$)	Rendimento do Bombeamento (%)	Custo Anual Unit. de Energ. Elét. (R\$/m)	Custo de Energia Elét. (R\$)	Custo Total do Sistema (R\$)
222,00	7.297,74	0,134	75,00	11.816,15	294.581,79	518.114,07

Planilha 7.12 - Exemplo 7.3 - 1ª Etapa - Dimensionamento Inicial - Com Reservatório

Trechos	Vazão (l/s)	Diametro (mm)	Rugosidade (mm) - 25 Anos	Coefficiente de Hazen Williams	Comp. do Trecho (m)	Perdas (m.c.a.)	Custo Unitário (R\$/m)	Custo Total (R\$)	Velocidade (m3/s)
1,00	76,30	311,77	0,373	127,1416	324	1,09	159,44	51.658,62	1,00
2,00	37,16	217,57	0,373	124,9498	124	0,65	107,98	13.389,55	1,00
3,00	34,83	210,64	0,373	124,7402	184	1,01	104,26	19.183,52	1,00
4,00	3,00	61,82	0,373	115,2100	206	5,48	27,62	5.690,60	1,00
5,00	1,29	40,54	0,373	111,1566	103	4,79	17,49	1.801,27	1,00
6,00	6,52	91,14	0,373	118,5766	202	3,24	42,06	8.496,96	1,00
7,00	10,80	117,29	0,373	120,5875	134	1,55	55,29	7.408,75	1,00
8,00	15,00	138,23	0,373	121,8235	227	2,13	66,06	14.995,08	1,00
9,00	18,03	151,55	0,373	122,4913	167	1,39	72,98	12.187,75	1,00
10,00	14,94	137,96	0,373	121,8088	166	1,56	65,91	10.941,78	1,00
11,00	11,21	119,50	0,373	120,7305	152	1,72	56,42	8.575,30	1,00
12,00	8,95	106,78	0,373	119,8548	168	2,20	49,94	8.389,69	1,00
13,00	5,46	83,40	0,373	117,8368	177	3,18	38,21	6.763,08	1,00
14,00	2,00	50,48	0,373	113,3150	225	7,81	22,18	4.989,82	1,00
15,00	25,18	179,10	0,373	123,6593	254	1,71	87,46	22.213,65	1,00
16,00	18,97	155,45	0,373	122,6727	263	2,12	75,02	19.729,64	1,00
17,00	14,01	133,59	0,373	121,5713	133	1,30	63,66	8.466,65	1,00
18,00	4,18	72,97	0,373	116,6900	321	6,87	33,06	10.612,81	1,00
19,00	1,02	36,05	0,373	109,9530	105	5,71	15,40	1.616,90	1,00
20,00	2,50	56,43	0,373	114,3697	169	5,07	25,03	4.229,46	1,00
Altura =		20,00					Total =	241.340,88	
Cota Piezométrica de cab (mca) =		242,00							

Nº	Altura Piezométrica (m)	Demanda (l/s)	Cota do N° (m)	Pressão Disponível (mca)	Equação da Cont.	Equação da Cons. de Energia		Custo do Concreto (R\$/m3)	Caixa D'Água (m3)
1,00	240,91	6,17	220,50	20,41	0,00	3,62	Anel 1	950,00	16,00
2,00	240,26	2,33	215,60	24,66	0,00	-0,82	Anel 2		
3,00	239,25	4,65	210,40	28,85	0,00	-9,03	Anel 3		
4,00	233,77	1,71	210,50	23,27	0,00			Pilar + Fundação (m3)	Custo da Estrutura (R\$)
5,00	228,98	5,31	209,50	19,48	0,00			26,36	40.240,15
6,00	235,84	4,28	213,20	22,64	0,00				
7,00	237,39	4,20	218,50	18,89	0,00				
8,00	239,52	3,03	230,70	8,82	0,00				
9,00	239,35	3,73	211,50	27,85	0,00				
10,00	237,63	2,26	213,50	24,13	0,00				
11,00	235,44	3,49	205,50	29,94	0,00				
12,00	237,73	7,46	208,80	28,93	0,00				
13,00	237,53	6,21	215,50	22,03	0,00				
14,00	235,41	4,96	212,60	22,81	0,00				
15,00	234,10	9,83	207,50	26,60	0,00				
16,00	227,23	5,20	219,40	7,83	0,00				
17,00	227,53	1,48	220,50	7,03	0,00				

Cota do Terreno (m)	Horas de Bombeamento (h)	Custo do kWh (R\$)	Rendimento do Bombeamento (%)	Custo Anual Unit. de Energ. Elét. (R\$/m)	Custo de Energia Elét. (R\$)	Custo Total do Sistema (R\$)
222,00	7.297,74	0,134	75,00	11.816,15	236.322,94	517.903,96

Planilha 7.13 - Exemplo 7.3 - 1ª Etapa - Dimensionamento Otimizado - Com Reservatório

Trçhos	Vazão (l/s)	Diâmetro (mm)	Rugosidade (mm) - 25 Anos	Coefficiente de Hazen Williams	Comp. do Trecho (m)	Perdas (m.c.a.)	Custo Unitário (R\$/m)	Custo Total (R\$)	Velocidade (m/s)
1	76,30	343,11	0,373	129,6816	324	0,66	176,88	57.309,33	0,83
2	45,87	203,87	0,373	121,1385	124	1,40	100,64	12.478,75	1,41
3	43,54	203,18	0,373	121,5615	184	1,91	100,26	18.448,15	1,34
4	9,41	102,41	0,373	118,2325	206	3,72	47,73	9.832,42	1,14
5	7,70	96,78	0,373	118,6194	103	1,68	44,90	4.624,20	1,05
6	0,45	53,40	0,373	129,7041	202	0,26	23,57	4.761,62	0,20
7	4,73	83,30	0,373	119,1850	134	1,82	38,16	5.113,22	0,87
8	8,93	92,14	0,373	115,8887	227	6,44	42,56	9.662,25	1,34
9	11,96	189,98	0,373	133,0374	167	0,19	93,23	15.569,12	0,42
10	12,30	88,78	0,373	111,9497	166	10,90	40,89	6.787,37	1,99
11	8,57	84,03	0,373	113,8079	152	6,48	38,52	5.855,67	1,55
12	6,31	73,33	0,373	112,9871	168	8,00	33,24	5.584,04	1,50
13	2,82	53,40	0,373	111,7277	177	9,09	23,57	4.172,31	1,26
14	4,64	53,40	0,373	107,3315	225	31,16	23,57	5.303,78	2,07
15	24,84	164,20	0,373	121,4733	254	2,64	79,60	20.218,17	1,17
16	18,63	150,50	0,373	121,9809	263	2,43	72,43	19.050,11	1,05
17	13,67	135,89	0,373	122,2777	133	1,13	64,84	8.624,23	0,94
18	3,84	89,43	0,373	123,2359	321	1,97	41,21	13.229,23	0,61
19	1,36	54,71	0,373	119,2334	105	1,10	24,20	2.540,89	0,58
20	2,84	72,91	0,373	120,3714	169	1,68	33,03	5.582,34	0,68
Altura =		24,54					Total =	234.747,19	
Cota Piezométrica de cab (mca) =									

Nº	Altura Piezométrica (m)	Demanda (l/s)	Cota do Nó (m)	Pressão Disponível (mca)	Equação da Cont.	Equação da Cons. de Energia	Custo do Concreto (R\$/m³)	Caixa D'Água (m³)
1,00	245,89	6,17	220,50	25,39	0,00	0,00	950,00	16,00
2,00	244,48	2,33	215,60	28,88	0,00	0,00		
3,00	242,57	4,65	210,40	32,17	0,00	0,00		
4,00	238,86	1,71	210,50	28,36	0,00	0,00		
5,00	237,18	5,31	209,50	27,68	0,00	0,00		
6,00	237,44	4,28	213,20	24,24	0,00	0,00		
7,00	239,26	4,20	218,50	20,76	0,00	0,00		
8,00	245,70	3,03	230,70	15,00	0,00	0,00		
9,00	234,98	3,73	211,50	23,48	0,00	0,00		
10,00	228,50	2,26	213,50	15,00	0,00	0,00		
11,00	220,50	3,49	205,50	15,00	0,00	0,00		
12,00	236,80	7,46	208,80	28,00	0,00	0,00		
13,00	239,93	6,21	215,50	24,43	0,00	0,00		
14,00	237,50	4,96	212,60	24,90	0,00	0,00		
15,00	236,37	9,83	207,50	28,87	0,00	0,00		
16,00	234,40	5,20	219,40	15,00	0,00	0,00		
17,00	235,50	1,48	220,50	15,00	0,00	0,00		
							Pilar + Fundação (m³)	Custo da Estrutura (R\$)
							45,90	58.809,24
							ANEL 1	
							ANEL 2	
							ANEL 3	
							Total =	

Cota do Terreno (m)	Horas de Bombeamento (h)	Custo do kWh (R\$)	Rendimento do Bombeamento (%)	Custo Anual Unit. de Energ. Elét. (R\$/m³)	Custo de Energia Elét. (R\$)	Custo Total do Sistema (R\$)
222,00	7.297,74	0,134	75,00	11.816,15	290.012,23	583.568,66

- Segunda Etapa: Dimensionamento Final

A Segunda Etapa é realizada a partir dos valores dos diâmetros, vazões, velocidades e altura de bombeamento obtidos na solução otimizada da Primeira Etapa, cujos valores se encontram na Tabela 7.10.

Tabela 7.10 - Diâmetros, vazões e velocidades que serão usados na Segunda Etapa.

Trechos	Diâmetro (mm)	Diâmetros Internos Comerciais (mm)	Vazão (l/s)	Velocidade (m3/s)
1	324,69	252.0 - 299.8	76,30	0,92
2	202,90	156.4 - 204.2	45,87	1,42
3	200,42	156.4 - 204.2	43,54	1,38
4	115,55	53.40 - 75.6	12,80	1,22
5	109,46	53.4 - 75.6	11,09	1,18
6	53,40	75.6 - 108.4	0,45	0,20
7	77,82	108.4 - 156.4	4,73	0,99
8	94,00	108.4 - 156.4	8,93	1,29
9	176,10	156.4 - 204.2	11,96	0,49
10	90,89	75.6 - 108.4	12,30	1,90
11	80,91	75.6 - 108.4	8,57	1,67
12	73,27	53.4 - 75.6	6,31	1,50
13	53,40	53.4 - 75.6	2,82	1,26
14	53,40	53.4 - 75.6	4,64	2,07
15	149,26	156.4 - 204.2	21,45	1,23
16	133,27	108.4 - 156.4	15,24	1,09
17	117,87	108.4 - 156.4	10,28	0,94
18	53,40	75.6 - 108.4	0,45	0,20
19	87,60	53.4 - 75.6	4,75	0,79
20	99,36	53.4 - 75.6	6,23	0,80

- Função objetivo

A função objetivo que será minimizada nesta Segunda Etapa é obtida da equação 6.11, tem-se:

$$C(L_{ij}, Q_{ij}, H) = \sum_{i=1}^{17} \sum_{j=1}^2 L_{ij} P_{D_{ij}} + \frac{9,81}{\eta} \left[\sum_{t=1}^{25} (n_{bt} \cdot Q_{it} \cdot p_t) \right] H \quad (7.114)$$

Os preços unitários dos tubos (P_{D_i}) encontram-se na Tabela 7.9, substituindo-se na equação 7.114, obtém-se:

$$C(L_{ij}, Q_i, H) = [118,95 L_{1,252} + 154,45 L_{1,295} + 86,40 L_{2,204} + 118,95 L_{2,252} + 60,69 L_{3,156} + 86,40 L_{3,204} + 29,44 L_{4,53} + 36,50 L_{4,75} + 29,44 L_{5,53} + 36,50 L_{5,75} + 29,44 L_{6,53} + 36,50 L_{6,75} + 36,50 L_{7,75} + 45,33 L_{7,108} + 36,50 L_{8,75} + 45,33 L_{8,108} + 45,33 L_{9,108} + 60,69 L_{9,154} + 45,33 L_{10,108} + 60,69 L_{10,156} + 36,50 L_{11,75} + 45,33 L_{11,108} + 36,50 L_{12,75} + 45,33 L_{12,108} + 29,44 L_{13,53} + 36,50 L_{13,75} + 29,44 L_{14,53} + 36,50 L_{14,75} + 60,69 L_{15,156} + 86,40 L_{15,204} + 45,33 L_{16,108} + 60,69 L_{16,156} + 45,33 L_{17,108} + 60,69 L_{17,156} + 29,44 L_{18,53} + 36,50 L_{18,75} + 29,44 L_{19,53} + 36,50 L_{19,75} + 36,50 L_{20,75} + 45,33 L_{20,108}] + \frac{9,81}{\eta} \left[\sum_{t=1}^{25} (n_{bt} \cdot Q_{it} \cdot p'_t) \right] H \quad (7.115)$$

- Restrições

a) Pressão mínima requerida nos nós

Sendo, conforme a equação 7.71: $Z = H + 222$, as equações de restrição de pressão mínima requeridas nos nós são:

$$\text{nó 1: } Z - (h_{f1,25})_{252} - (h_{f1,25})_{299} \geq 220,5 + 15 \quad (7.116)$$

$$\text{nó 2: } Z - (h_{f1,25})_{252} - (h_{f1,25})_{299} - (h_{f2,25})_{204} - (h_{f2,25})_{252} \geq 215,6 + 15 \quad (7.117)$$

$$\text{nó 3: } Z - (h_{f1,25})_{252} - (h_{f1,25})_{299} - (h_{f2,25})_{204} - (h_{f2,25})_{252} - (h_{f3,25})_{156} - (h_{f3,25})_{204} \geq 210,4 + 15 \quad (7.118)$$

$$\text{nó 4: } Z - (h_{f1,25})_{252} - (h_{f1,25})_{299} - (h_{f2,25})_{204} - (h_{f2,25})_{252} - (h_{f3,25})_{156} - (h_{f3,25})_{204} - (h_{f4,25})_{53} - (h_{f4,25})_{75} \geq 210,5 + 15 \quad (7.119)$$

$$\text{nó 5: } Z - (h_{f1,25})_{256} - (h_{f1,25})_{299} - (h_{f2,25})_{204} - (h_{f2,25})_{252} - (h_{f3,25})_{156} - (h_{f3,25})_{204} - (h_{f4,25})_{53} - (h_{f4,25})_{75} - (h_{f5,25})_{53} - (h_{f5,25})_{75} \geq 209,5 + 15 \quad (7.120)$$

$$\text{nó 6: } Z - (h_{f1,25})_{252} - (h_{f1,25})_{299} - (h_{f9,25})_{108} - (h_{f9,25})_{156} - (h_{f8,25})_{75} - (h_{f8,25})_{108} - (h_{f7,25})_{75} - (h_{f7,25})_{108} \geq 213,2 + 15 \quad (7.121)$$

$$\text{nó 7: } Z - (h_{f1,25})_{252} - (h_{f1,25})_{299} - (h_{f9,25})_{108} - (h_{f9,25})_{156} - (h_{f8,25})_{75} - (h_{f8,25})_{108} \geq 218,5 + 15 \quad (7.122)$$

$$\text{nó 8: } Z - (h_{f1,25})_{252} - (h_{f1,25})_{299} - (h_{f9,25})_{108} + (h_{f9,25})_{156} \geq 230,7 + 15 \quad (7.123)$$

$$\text{nó 9: } Z - (h_{f1,25})_{252} - (h_{f1,25})_{299} - (h_{f0,25})_{108} - (h_{f0,25})_{156} \geq 211,5 + 15 \quad (7.124)$$

$$\text{nó 10: } Z - (h_{f1,25})_{252} - (h_{f1,25})_{299} - (h_{f0,25})_{108} - (h_{f0,25})_{156} - (h_{f1,25})_{75} - (h_{f1,25})_{108} \geq 213,5 + 15 \quad (7.125)$$

$$\text{nó 11: } Z - (h_{f1,25})_{252} - (h_{f1,25})_{299} - (h_{f0,25})_{108} - (h_{f0,25})_{156} - (h_{f1,25})_{75} - (h_{f1,25})_{108} - (h_{f2,25})_{75} - (h_{f2,25})_{108} \geq 205,5 + 15 \quad (7.126)$$

$$\text{nó 12: } Z - (h_{f1,25})_{252} - (h_{f1,25})_{299} - (h_{f0,25})_{108} - (h_{f0,25})_{156} - (h_{f1,25})_{75} - (h_{f1,25})_{108} - (h_{f2,25})_{75} - (h_{f2,25})_{108} - (h_{f3,25})_{53} - (h_{f3,25})_{75} \geq 208,8 + 15 \quad (7.127)$$

$$\text{nó 13: } Z - (h_{f1,25})_{252} - (h_{f1,25})_{299} - (h_{f2,25})_{204} - (h_{f2,25})_{252} - (h_{f3,25})_{156} - (h_{f3,25})_{204} - (h_{f5,25})_{156} - (h_{f5,25})_{204} \geq 215,5 + 15 \quad (7.128)$$

$$\text{nó 14: } Z - (h_{f1,25})_{252} - (h_{f1,25})_{299} - (h_{f2,25})_{204} - (h_{f2,25})_{252} - (h_{f3,25})_{156} - (h_{f3,25})_{204} - (h_{f5,25})_{156} - (h_{f5,25})_{204} - (h_{f6,25})_{108} - (h_{f6,25})_{156} \geq 212,6 + 15 \quad (7.129)$$

$$\text{nó 15: } Z - (h_{f1,25})_{252} - (h_{f1,25})_{299} - (h_{f2,25})_{204} - (h_{f2,25})_{252} - (h_{f3,25})_{156} - (h_{f3,25})_{204} - (h_{f5,25})_{156} - (h_{f5,25})_{204} - (h_{f6,25})_{108} - (h_{f6,25})_{156} - (h_{f7,25})_{108} - (h_{f7,25})_{156} \geq 207,5 + 15 \quad (7.130)$$

$$\text{nó 16: } Z - (h_{f1,25})_{252} - (h_{f1,25})_{299} - (h_{f2,25})_{204} - (h_{f2,25})_{252} - (h_{f3,25})_{156} - (h_{f3,25})_{204} - (h_{f5,25})_{156} - (h_{f5,25})_{204} - (h_{f6,25})_{108} - (h_{f6,25})_{156} - (h_{f7,25})_{108} - (h_{f7,25})_{156} - (h_{f8,25})_{53} - (h_{f8,25})_{75} \geq 219,4 + 15 \quad (7.131)$$

$$\text{nó 17: } Z - (h_{f1,25})_{252} - (h_{f1,25})_{299} - (h_{f9,25})_{108} - (h_{f9,25})_{156} - (h_{f8,25})_{75} - (h_{f8,25})_{108} - (h_{f7,25})_{75} - (h_{f7,25})_{108} - (h_{f6,25})_{53} - (h_{f6,25})_{75} - (h_{f20,25})_{75} - (h_{f20,25})_{108} \geq 220,2 + 15 \quad (7.132)$$

As perdas de carga são calculadas pela fórmula de Darcy-Weisbach (equação 4.5), sendo o coeficiente de atrito em cada trecho “i” no ano “t” (f_{it}) calculado pela equação 4.7, a rugosidade pela equação 7.55 e o número de Reynolds pela equação 7.56.

b - Conservação da energia nos anéis

Para que seja atendida a restrição da conservação da energia nos anéis, em cada anel da rede deve-se ter:

$$\text{anel 1: } (h_{f2,25})_{204} + (h_{f2,25})_{252} + (h_{f3,25})_{156} + (h_{f3,25})_{204} + (h_{f4,25})_{53} + (h_{f4,25})_{75} + (h_{f5,25})_{53} + (h_{f5,25})_{75} - (h_{f6,25})_{53} - (h_{f6,25})_{75} - (h_{f7,25})_{75} - (h_{f7,25})_{108} - (h_{f8,25})_{75} - (h_{f8,25})_{108} - (h_{f9,25})_{108} - (h_{f9,25})_{156} = 0 \quad (7.133)$$

$$\text{anel 2: } (h_{f0,25})_{108} + (h_{f0,25})_{156} + (h_{f1,25})_{75} + (h_{f1,25})_{108} + (h_{f2,25})_{75} + (h_{f2,25})_{108} +$$

$$(h_{f13,25})_{53} + (h_{f13,25})_{75} - (h_{f14,25})_{53} - (h_{f14,25})_{75} - (h_{f3,25})_{156} - (h_{f3,25})_{204} - (h_{f2,25})_{204} - (h_{f2,25})_{252} = 0 \quad (7.134)$$

$$\text{anel 3: } (h_{f15,25})_{156} + (h_{f15,25})_{204} + (h_{f16,25})_{108} + (h_{f16,25})_{156} + (h_{f17,25})_{108} + (h_{f17,25})_{156} + (h_{f18,25})_{53} + (h_{f18,25})_{75} - (h_{f19,25})_{53} - (h_{f19,25})_{75} - (h_{f20,25})_{75} - (h_{f20,25})_{108} - (h_{f5,25})_{53} - (h_{f5,25})_{75} - (h_{f4,25})_{53} - (h_{f4,25})_{75} = 0 \quad (7.135)$$

c) Continuidade nos nós:

As equações de continuidade nos nós são as mesmas da primeira etapa, ou sejam, equações de 7.93 a 7.109.

d) Velocidades máxima e mínima

As equações de restrição de velocidades máxima e mínima são iguais às da primeira etapa: equações 7.110 e 7.111.

e) Comprimentos dos sub-trechos

Como cada trecho da rede foi dividido em dois sub-trechos , em cada trecho deve-se ter:

$$\text{trecho 1: } L_{1,1} + L_{1,2} = L_1 \quad (7.136)$$

$$\text{trecho 2: } L_{2,1} + L_{2,2} = L_2 \quad (7.137)$$

$$\text{trecho 3: } L_{3,1} + L_{3,2} = L_3 \quad (7.138)$$

$$\text{trecho 4: } L_{4,1} + L_{4,2} = L_4 \quad (7.139)$$

$$\text{trecho 5: } L_{5,1} + L_{5,2} = L_5 \quad (7.140)$$

$$\text{trecho 6: } L_{6,1} + L_{6,2} = L_6 \quad (7.141)$$

$$\text{trecho 7: } L_{7,1} + L_{7,2} = L_6 \quad (7.142)$$

$$\text{trecho 8: } L_{8,1} + L_{8,2} = L_8 \quad (7.143)$$

$$\text{trecho 9: } L_{9,1} + L_{9,2} = L_9 \quad (7.144)$$

$$\text{trecho 10: } L_{10,1} + L_{10,2} = L_{10} \quad (7.145)$$

$$\text{trecho 11: } L_{11,1} + L_{11,2} = L_{11} \quad (7.146)$$

$$\text{trecho 12: } L_{12,1} + L_{12,2} = L_{12} \quad (7.147)$$

$$\text{trecho 13: } L_{13,1} + L_{13,2} = L_{13} \quad (7.148)$$

$$\text{trecho 14: } L_{14,1} + L_{14,2} = L_{14} \quad (7.149)$$

$$\text{trecho 15: } L_{15,1} + L_{15,2} = L_{15} \quad (7.150)$$

$$\text{trecho 16: } L_{16,1} + L_{16,2} = L_{16} \quad (7.151)$$

$$\text{trecho 17 : } L_{17,1} + L_{17,2} = L_{17} \quad (7.152)$$

f) Não negatividade dos sub-trechos

As restrições de não negatividade dos sub-trechos são:

$$L_{1,1} \geq 0 \text{ e } L_{1,2} \geq 0$$

$$\vdots \quad \quad \quad \vdots$$

$$L_{17,1} \geq 0 \text{ e } L_{17,2} \geq 0 \quad (7.153)$$

- Resolução através do método e do programa computacional desenvolvidos

Aplicando-se o programa computacional desenvolvido neste trabalho, encontraram-se resultados iniciais, finais e relatórios que constam das tabelas 7.14 - 2ª Etapa - Dimensionamento inicial - Sem reservatório, 7.15 - 2ª Etapa - Dimensionamento otimizado - Sem reservatório, 7.16 - Relatório - Sem reservatório, 7.17 - 2ª Etapa - Dimensionamento inicial - Com reservatório, 7.18 - 2ª Etapa - Dimensionamento definitivo - Com reservatório e 7.19 - Relatório - Com reservatório.

Planilha 7.14 - Exemplo 7.3 - 2ª Etapa - Dimensionamento Inicial - Sem Reservatório

Trechos	Vazão (l/s)	Diametro (mm)	Rugosidade (mm) - 25 Anos	Coefficiente de Hazen Williams	Comp. do Trecho (m)	Perdas (m.c.a.)	Perdas no Trecho (m)	Custo Unitário (R\$)	Custo Total (R\$)	Velocidade (m3/s)
1	76,30	299,8	0,37	126,1130	194	0,80	0,88	154,45	30.025,08	1,08
	76,30	432,0	0,37	135,9155	130	0,08		242,69	31.452,62	0,52
2	45,86	156,4	0,37	114,3597	74	3,41	3,96	60,69	4.515,34	2,39
	45,86	204,2	0,37	121,1811	50	0,56		86,40	4.285,44	1,40
3	43,53	156,4	0,37	114,8437	110	4,56	5,30	60,69	6.700,18	2,27
	43,53	204,2	0,37	121,6940	74	0,74		86,40	6.359,04	1,33
4	12,80	108,4	0,37	116,8285	124	3,05	3,35	45,33	5.602,79	1,39
	12,80	156,4	0,37	126,8104	82	0,29		60,69	5.000,86	0,67
5	11,09	108,4	0,37	118,1929	62	1,15	1,26	45,33	2.801,39	1,20
	11,09	156,4	0,37	128,2913	41	0,11		60,69	2.500,43	0,58
6	0,45	53,4	0,37	129,7041	121	0,16	0,17	29,44	3.568,13	0,20
	0,45	75,6	0,37	141,0109	81	0,02		36,50	2.949,20	0,10
7	4,73	75,6	0,37	116,5026	80	1,82	2,00	36,50	2.934,60	1,05
	4,73	108,4	0,37	126,6482	54	0,18		45,33	2.429,69	0,51
8	8,93	75,6	0,37	110,6553	136	11,04	12,13	36,50	4.971,30	1,99
	8,93	108,4	0,37	120,2917	91	1,09		45,33	4.115,96	0,97
9	11,96	156,4	0,37	127,5152	100	0,31	0,36	60,69	6.081,14	0,62
	11,96	204,2	0,37	135,1213	67	0,05		86,40	5.771,52	0,37
10	12,31	75,6	0,37	107,8134	100	15,35	16,87	36,50	3.635,40	2,74
	12,31	108,4	0,37	117,2022	66	1,52		45,33	3.009,91	1,33
11	8,58	75,6	0,37	111,0124	91	6,82	7,50	36,50	3.328,80	1,91
	8,58	108,4	0,37	120,6798	61	0,67		45,33	2.756,06	0,93
12	6,32	53,4	0,37	104,6713	101	25,96	28,68	29,44	2.967,55	2,82
	6,32	75,6	0,37	113,7959	67	2,73		36,50	2.452,80	1,41
13	2,83	53,4	0,37	111,7105	106	5,47	6,05	29,44	3.126,53	1,26
	2,83	75,6	0,37	121,4487	71	0,58		36,50	2.584,20	0,63
14	4,63	53,4	0,37	107,3416	135	18,65	20,61	29,44	3.974,40	2,07
	4,63	75,6	0,37	116,6990	90	1,96		36,50	3.285,00	1,03
15	21,45	108,4	0,37	112,0479	152	10,58	11,59	45,33	6.908,29	2,33
	21,45	156,4	0,37	121,6213	102	1,02		60,69	6.166,10	1,12
16	15,24	108,4	0,37	115,1938	158	5,52	6,05	45,33	7.153,07	1,65
	15,24	156,4	0,37	125,0360	105	0,53		60,69	6.384,59	0,79
17	10,28	108,4	0,37	118,9274	80	1,27	1,39	45,33	3.617,33	1,11
	10,28	156,4	0,37	129,0886	53	0,12		60,69	3.228,71	0,54
18	0,45	53,4	0,37	129,7041	193	0,25	0,27	29,44	5.670,14	0,20
	0,45	75,6	0,37	141,0109	128	0,03		36,50	4.686,60	0,10
19	4,75	75,6	0,37	116,4536	63	1,44	1,59	36,50	2.299,50	1,06
	4,75	108,4	0,37	126,5949	42	0,14		45,33	1.903,86	0,52
20	6,23	75,6	0,37	113,9241	101	4,00	4,40	36,50	3.701,10	1,39
	6,23	108,4	0,37	123,8451	68	0,40		45,33	3.064,31	0,68
Altura =		24,93						Total =	217.968,97	
Cota Piezométrica de cab.(mca) =		246,93								

Planilha 7.16 – Relatório do Exemplo 7.3 – Sem Reservatório

Exemplo 7.3 - Relatório Anual de Operação do Projeto - Sem Reservatório

Altura de Bombeamento: H (m) = 25,40

Ano	População (hab.)	Vazão (l/s)	Rugosidade (mm) FoFo	Rugosidade (mm) PVC	Horas Bombeamento	Potência Requerida (KW)	Valor Presente do Custo de Energia (R\$)
2001	19943	62,32	0,412	0,024	5962,6	20,71	15.040,17
2002	20129	62,90	0,524	0,039	6018,2	20,90	14.764,96
2003	20315	63,49	0,637	0,053	6073,9	21,09	14.492,31
2004	20501	64,07	0,749	0,068	6129,5	21,29	13.955,04
2005	20687	64,65	0,861	0,082	6185,1	21,48	13.690,58
2006	20873	65,23	0,973	0,097	6240,7	21,67	13.690,58
2007	21059	65,81	1,085	0,111	6296,4	21,87	13.428,99
2008	21246	66,39	1,198	0,126	6352,0	22,06	13.170,35
2009	21432	66,97	1,310	0,140	6407,6	22,25	12.914,71
2010	21618	67,56	1,422	0,155	6463,3	22,45	12.662,12
2011	21804	68,14	1,534	0,169	6518,9	22,64	12.412,63
2012	21990	68,72	1,646	0,184	6574,5	22,83	12.166,28
2013	22176	69,30	1,759	0,198	6630,2	23,02	11.923,12
2014	22362	69,88	1,871	0,213	6685,8	23,22	11.683,17
2015	22548	70,46	1,983	0,227	6741,4	23,41	11.446,46
2016	22734	71,04	2,095	0,242	6797,1	23,60	11.213,02
2017	22920	71,63	2,207	0,256	6852,7	23,80	10.982,87
2018	23106	72,21	2,320	0,271	6908,3	23,99	10.756,03
2019	23292	72,79	2,432	0,285	6964,0	24,18	10.532,51
2020	23478	73,37	2,544	0,300	7019,6	24,38	10.312,31
2021	23664	73,95	2,656	0,314	7075,2	24,57	10.095,45
2022	23851	74,53	2,768	0,329	7130,8	24,76	9.881,93
2023	24037	75,11	2,881	0,343	7186,5	24,96	9.671,75
2024	24223	75,70	2,993	0,358	7242,1	25,15	9.464,90
2025	24409	76,28	3,105	0,372	7297,7	25,34	9.261,39

Planilha 7.17 - Exemplo 7.3 - 2ª Etapa - Dimensionamento Inicial - Com Reservatório

Trechos	Vazão (l/s)	Diametro (mm)	Rugosidade (mm) - 25 Anos	Coefficiente de Hazen Williams	Comp. do Trecho (m)	Perdas (m.c.a)	Perdas no Trecho (m)	Custo Unitário (R\$)	Custo Total (R\$)	Velocidade (m/s)
1	76,30	299,8	0,37	126,1130	194	0,80	0,88	154,45	30.025,08	1,08
	76,30	432,0	0,37	135,9155	130	0,08		242,69	31.452,62	0,52
2	45,87	156,4	0,37	114,3587	74	3,41	3,97	60,69	4.515,34	2,39
	45,87	204,2	0,37	121,1799	50	0,56		86,40	4.285,44	1,40
3	43,54	156,4	0,37	114,8426	110	4,56	5,30	60,69	6.700,18	2,27
	43,54	204,2	0,37	121,6927	74	0,74		86,40	6.359,04	1,33
4	9,41	75,6	0,37	110,1810	124	11,14	12,24	36,50	4.511,40	2,10
	9,41	108,4	0,37	119,7761	82	1,10		45,33	3.735,19	1,02
5	7,70	75,6	0,37	111,9847	62	3,73	4,10	36,50	2.255,70	1,72
	7,70	108,4	0,37	121,7368	41	0,37		45,33	1.867,60	0,84
6	0,45	53,4	0,37	129,7041	121	0,16	0,17	29,44	3.568,13	0,20
	0,45	75,6	0,37	141,0109	81	0,02		36,50	2.949,20	0,10
7	4,73	75,6	0,37	116,5026	80	1,82	2,00	36,50	2.934,60	1,05
	4,73	108,4	0,37	126,6482	54	0,18		45,33	2.429,69	0,51
8	8,93	75,6	0,37	110,6553	136	11,04	12,13	36,50	4.971,30	1,99
	8,93	108,4	0,37	120,2917	91	1,09		45,33	4.115,96	0,97
9	11,96	156,4	0,37	127,5152	100	0,31	0,36	60,69	6.081,14	0,62
	11,96	204,2	0,37	135,1213	67	0,05		86,40	5.771,52	0,37
10	12,30	75,6	0,37	107,8172	100	15,34	16,86	36,50	3.635,40	2,74
	12,30	108,4	0,37	117,2064	66	1,52		45,33	3.009,91	1,33
11	8,57	75,6	0,37	111,0181	91	6,82	7,49	36,50	3.328,80	1,91
	8,57	108,4	0,37	120,6860	61	0,67		45,33	2.756,06	0,93
12	6,31	53,4	0,37	104,6785	101	25,91	28,63	29,44	2.967,55	2,82
	6,31	75,6	0,37	113,8037	67	2,72		36,50	2.452,80	1,41
13	2,82	53,4	0,37	111,7277	106	5,45	6,03	29,44	3.126,53	1,26
	2,82	75,6	0,37	121,4674	71	0,57		36,50	2.584,20	0,63
14	4,64	53,4	0,37	107,3315	135	18,69	20,66	29,44	3.974,40	2,07
	4,64	75,6	0,37	116,6880	90	1,96		36,50	3.285,00	1,03
15	24,84	156,4	0,37	120,1839	152	2,05	2,38	60,69	9.249,16	1,29
	24,84	204,2	0,37	127,3527	102	0,33		86,40	8.778,24	0,76
16	18,63	108,4	0,37	113,3343	158	8,26	9,05	45,33	7.153,07	2,02
	18,63	156,4	0,37	123,0176	105	0,79		60,69	6.384,59	0,97
17	13,67	108,4	0,37	116,2124	80	2,25	2,46	45,33	3.617,33	1,48
	13,67	156,4	0,37	126,1416	53	0,22		60,69	3.228,71	0,71
18	3,84	75,6	0,37	118,4858	193	2,88	3,16	36,50	7.029,90	0,86
	3,84	108,4	0,37	128,8041	128	0,28		45,33	5.820,37	0,42
19	1,36	53,4	0,37	118,5290	63	0,75	0,83	29,44	1.854,72	0,61
	1,36	75,6	0,37	128,8616	42	0,08		36,50	1.533,00	0,30
20	2,84	53,4	0,37	111,6720	101	5,27	5,82	29,44	2.985,22	1,27
	2,84	75,6	0,37	121,4069	68	0,55		36,50	2.467,40	0,63
Altura =		24,54						Total =	219.751,49	
Cota Piezométrica de cab (mca) =		246,54								

Continuação da Planilha 7.17 - Exemplo 7.3 - 2ª Etapa - Dimensionamento Inicial - Com Reservatório

Trechos	Vazão Minimizada	Comprimento L1	Comprimento L2	Soma L1+(L1+L2)	Dif [L-(L1+L2)]
1	76,30	194	130	324	0,00
2	45,87	74	50	124	0,00
3	43,54	110	74	184	0,00
4	9,41	124	82	206	0,00
5	2,70	62	41	103	0,00
6	0,45	121	81	202	0,00
7	4,73	80	54	134	0,00
8	8,93	136	91	227	0,00
9	11,96	100	67	167	0,00
10	12,30	100	66	166	0,00
11	8,57	91	61	152	0,00
12	6,11	101	67	168	0,00
13	2,82	106	71	177	0,00
14	4,64	135	90	225	0,00
15	24,84	152	102	254	0,00
16	18,63	158	105	263	0,00
17	13,67	80	53	133	0,00
18	3,84	193	128	321	0,00
19	1,36	63	42	105	0,00
20	2,84	101	68	169	0,00

Nº	Altura Piezométrica (m)	Demanda (l/s)	Cota do No (m)	Pressão Disponível (mca)	Equação da Cont.	Equação da Cons. de Energia	Caixa D'Água (m³)
1	245,66	6,17	220,50	25,16	0,00	Anel 1	16,00
2	241,70	2,33	215,60	26,10	0,00	Anel 2	
3	238,53	4,65	210,40	28,13	0,00	Anel 3	
4	226,29	1,71	210,50	15,79	0,00		
5	222,20	5,31	209,50	12,70	0,00		
6	231,17	4,28	213,20	17,97	0,00		
7	233,17	4,20	218,50	14,67	0,00		
8	245,30	3,03	230,70	14,60	0,00		
9	238,81	3,73	211,50	17,31	0,00		
10	221,32	2,26	213,50	7,82	0,00		
11	192,68	3,49	205,50	-12,82	0,00		
12	186,66	7,46	208,80	-22,14	0,00		
13	236,15	6,21	215,50	20,65	0,00		
14	227,10	4,96	212,60	14,50	0,00		
15	224,64	9,83	207,50	17,14	0,00		
16	221,47	5,20	219,40	2,07	0,00		
17	225,17	1,48	220,50	4,67	0,00		

Custo do Concreto (R\$/m³)	Custo da Fundação (m³)	Pilar + Fundação (R\$)	Custo da Estrutura (R\$)
950,00	45,90	58.809,24	

Cota do Terreno (m)	Horas de Bombeamento (h)	Custo do kWh (R\$)	Rendimento do Bombeamento (%)	Custo Anual Unil. de Energ. Elet. (R\$/m)	Custo de Energia Elet. (R\$)	Custo Total do Sistema (R\$)
222,00	7297,7	0,13	75,00	11 816,15	290 012,23	568 572,96

Planilha 7.18 - Exemplo 7.3 - 2ª Etapa - Dimensionamento Definitivo - Com Reservatório

Trechos	Vazão (ls)	Diametro (mm)	Rugosidade (mm) - 25 Anos	Coefficiente de Hazen Williams	Comp. do Trecho (m)	Perdas (m.c.a)	Perdas no Trecho (m)	Custo Unitário (R\$)	Custo Total (R\$)	Velocidade (m3/s)
1	76,30	299,8	0,37	126,1130	284	1,17	1,19	154,45	43.791,79	1,08
	76,30	432,0	0,37	135,9155	40	0,02		242,69	9.820,75	0,52
2	49,72	156,4	0,37	113,6148	0	0,00	1,64	60,69	0,00	2,59
	49,72	204,2	0,37	120,3917	124	1,64		86,40	10.713,60	1,52
3	47,39	156,4	0,37	114,0574	15	0,74	2,76	60,69	914,86	2,47
	47,39	204,2	0,37	120,8607	169	2,02		86,40	14.595,18	1,45
4	10,35	75,6	0,37	109,3425	0	0,00	3,32	36,50	0,00	2,31
	10,35	108,4	0,37	118,8645	206	3,32		45,33	9.337,98	1,12
5	8,64	75,6	0,37	110,9545	0	0,00	1,16	36,50	0,00	1,92
	8,64	108,4	0,37	120,6169	103	1,16		45,33	4.668,99	0,94
6	-0,22	53,4	0,37	137,4971	158	0,05	0,05	29,44	4.642,94	0,10
	-0,22	75,6	0,37	149,4833	44	0,00		36,50	1.616,64	0,05
7	4,06	75,6	0,37	117,9432	106	1,78	1,85	36,50	3.879,79	0,91
	4,06	108,4	0,37	128,2142	28	0,07		45,33	1.255,84	0,44
8	8,26	75,6	0,37	111,3519	73	5,06	6,65	36,50	2.662,25	1,84
	8,26	108,4	0,37	121,0489	154	1,58		45,33	6.983,62	0,90
9	11,29	156,4	0,37	128,1081	104	0,29	0,33	60,69	6.341,79	0,59
	11,29	204,2	0,37	135,7495	63	0,04		86,40	5.400,45	0,34
10	9,12	75,6	0,37	110,4631	118	10,00	10,60	36,50	4.315,70	2,03
	9,12	108,4	0,37	120,0827	48	0,60		45,33	2.165,03	0,99
11	5,39	75,6	0,37	115,2695	112	3,31	3,48	36,50	4.091,02	1,20
	5,39	108,4	0,37	125,3077	40	0,17		45,33	1.809,45	0,58
12	3,13	53,4	0,37	110,7971	119	7,54	8,02	29,44	3.515,08	1,40
	3,13	75,6	0,37	120,4558	49	0,48		36,50	1.773,97	0,70
13	-0,36	53,4	0,37	132,0562	147	0,12	0,13	29,44	4.339,45	0,16
	-0,36	75,6	0,37	143,5681	30	0,00		36,50	1.080,41	0,08
14	7,82	53,4	0,37	102,8821	12	4,57	17,83	29,44	341,43	3,49
	7,82	75,6	0,37	111,8507	213	13,26		36,50	7.789,20	1,74
15	24,57	156,4	0,37	120,2886	178	2,33	2,58	60,69	10.780,72	1,28
	24,57	204,2	0,37	127,4636	76	0,25		86,40	6.597,87	0,75
16	18,36	108,4	0,37	113,4662	0	0,00	1,93	45,33	0,00	1,99
	18,36	156,4	0,37	123,1608	263	1,93		60,69	15.961,47	0,96
17	13,40	108,4	0,37	116,3972	35	0,96	1,34	45,33	1.606,14	1,45
	13,40	156,4	0,37	126,3422	98	0,38		60,69	5.921,39	0,70
18	3,57	75,6	0,37	119,1759	132	1,71	2,07	36,50	4.823,61	0,80
	3,57	108,4	0,37	129,5542	189	0,36		45,33	8.560,41	0,39
19	1,63	53,4	0,37	116,8307	105	1,79	1,79	29,44	3.091,20	0,73
	1,63	75,6	0,37	127,0153	0	0,00		36,50	0,00	0,36
20	3,11	53,4	0,37	110,8668	0	0,00	1,66	29,44	0,00	1,39
	3,11	75,6	0,37	120,5315	169	1,66		36,50	6.168,50	0,69
Altura =		25,23								
Cota Piezométrica de cab.(mca) =		247,23								
								Total =	221.358,49	

Exemplo 7.3 - Relatório Anual de Operação do Projeto - Com Reservatório

Altura de Bombeamento: H (m) = 25,23

Ano	População (hab.)	Vazão (l/s)	Rugosidade (mm) FoFo	Rugosidade (mm) PVC	Horas Bombeamento	Potência Requerida (KW)	Valor Presente do Custo de Energia (R\$)
2001	19943	62,32	0,412	0,024	5962,6	20,56	14.936,60
2002	20129	62,90	0,524	0,039	6018,2	20,76	14.662,99
2003	20315	63,49	0,637	0,053	6073,9	20,95	14.392,23
2004	20501	64,07	0,749	0,068	6129,5	21,14	14.124,09
2005	20687	64,65	0,861	0,082	6185,1	21,33	13.858,67
2006	20873	65,23	0,973	0,097	6240,7	21,52	13.596,67
2007	21059	65,81	1,085	0,111	6296,4	21,71	13.336,25
2008	21246	66,39	1,198	0,126	6352,0	21,91	13.079,39
2009	21432	66,97	1,310	0,140	6407,6	22,10	12.825,52
2010	21618	67,56	1,422	0,155	6463,3	22,29	12.574,67
2011	21804	68,14	1,534	0,169	6518,9	22,48	12.326,90
2012	21990	68,72	1,646	0,184	6574,5	22,67	12.082,26
2013	22176	69,30	1,759	0,198	6630,2	22,87	11.840,77
2014	22362	69,88	1,871	0,213	6685,8	23,06	11.602,48
2015	22548	70,46	1,983	0,227	6741,4	23,25	11.367,41
2016	22734	71,04	2,095	0,242	6797,1	23,44	11.135,58
2017	22920	71,63	2,207	0,256	6852,7	23,63	10.907,02
2018	23106	72,21	2,320	0,271	6908,3	23,83	10.681,75
2019	23292	72,79	2,432	0,285	6964,0	24,02	10.459,77
2020	23478	73,37	2,544	0,300	7019,6	24,21	10.241,10
2021	23664	73,95	2,656	0,314	7075,2	24,40	10.025,73
2022	23851	74,53	2,768	0,329	7130,8	24,59	9.813,69
2023	24037	75,11	2,881	0,343	7186,5	24,78	9.604,96
2024	24223	75,70	2,993	0,358	7242,1	24,98	9.399,54
2025	24409	76,28	3,105	0,372	7297,7	25,17	9.197,43

- Análise dos resultados do Exemplo 7.3

Analizando-se os resultados finais obtidos na resolução deste exemplo, através do método desenvolvido, considerando-se duas situações: sem e com o custo do concreto do reservatório elevado, planilha 7.15 e planilha 7.18, respectivamente, verificou-se que:

- o método, com o programa computacional desenvolvidos neste trabalho, apresentaram resultados esperados válidos quando aplicados à uma rede com mais nós e trechos que o exemplo anterior, considerando-se ou não o custo do concreto do reservatório elevado;

- a altura manométrica sofreu uma pequena redução (0,67 %);

- os diâmetros sofreram pequenas alterações, porém, mesmo nos trechos que não foram alterados, para que sejam atendidas as condições hidráulicas pré-estabelecidas, os comprimentos dos sub-trechos sofreram alterações, resultando em um acréscimo no custo de implantação, em torno de 4,64 %;

- o custo de energia elétrica sofreu uma redução de 0,69 %;

- o custo total do projeto teve um aumento de R\$ 70.333,44 (devido à inclusão do custo do concreto do reservatório elevado que é de R\$ 62.596,96), havendo, portanto, um aumento de R\$ 7.736,48.

- em termos percentuais, o custo total do projeto quando se considera o reservatório é 13,74 % maior do que quando não se considera o custo do reservatório adicionado ao custo otimizado da solução sem reservatório, caso se considere este, o percentual cai para 1,35 %.

Portanto, verifica-se que o método com o programa computacional desenvolvidos neste trabalho, são válidos, podendo ser aplicados na resolução de projetos de otimização de sistemas de abastecimento de água, quando se consideram variáveis os parâmetros das condições de contorno projeto. Verifica-se, ainda, que também é viável o dimensionamento econômico com a inclusão do custo do concreto do reservatório elevado no processo de otimização.

Verificada a viabilidade de aplicação do método proposto, deve-se ressaltar que os resultados do dimensionamento otimizado de sistemas de distribuição de água, obtidos através da

sua aplicação, são mais confiáveis do que os calculados com base em metodologias que não consideram as variações dos parâmetros, tendo em vista que a consideração destas variações influem significativamente nos resultados do dimensionamento.

CAPÍTULO 8

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O dimensionamento de redes de abastecimento de água foi executado durante décadas, e ainda continua sendo, por muitos projetistas, através dos métodos tradicionais como o de Hardy-Cross e o do seccionamento fictício, os quais consideram apenas o dimensionamento hidráulico das redes, sem levarem em conta a busca de soluções mais econômicas.

Nas últimas décadas, surgiram os métodos de dimensionamento econômico de redes de distribuição de água, baseados em técnicas de otimização, que visam a minimização do custo total do projeto, ou seja, custo de implantação da rede mais custo de operação da estação de bombeamento (custo de energia elétrica), os quais buscam alcançar soluções mais econômicas para o projeto. No entanto nestes métodos de dimensionamento econômico, o custo ótimo total do sistema de distribuição é determinado sem se levar em consideração as variações dos parâmetros que determinam as condições de contorno do projeto, ou sejam: rugosidade interna da tubulação, perdas de carga, características da água, vazão média de projeto, número de horas anuais de bombeamento, variação da população e coeficientes econômicos. A não consideração da variação destes parâmetros modifica os resultados obtidos no dimensionamento, tanto na parte econômica como também na operacional, podendo ocorrer casos de redes com trechos subdimensionados (principalmente quando se trata de tubulações de ferro fundido sem revestimento interno).

Neste trabalho foram realizados estudos aprofundados sobre as variações dos citados parâmetros e desenvolvido um método de dimensionamento econômico que considera essas variações, como também foi desenvolvido um programa computacional para resolver este método, tendo se chegado às conclusões citadas a seguir.

A variação da rugosidade das paredes internas das tubulações depende acentuadamente do tipo do material usado. Em tubulações de ferro fundido sem revestimento interno, os estudos de Colebrook e White comprovaram que, a variação da rugosidade com o tempo é praticamente linear, podendo o coeficiente de crescimento da rugosidade ser calculado por meio de fórmulas existentes. Para os tubos de ferro fundido revestidos de argamassa e os tubos de PVC, não se encontrou na literatura existente, fórmula para o cálculo da variação da rugosidade. No entanto, para que fosse possível se analisar a variação da rugosidade destes tubos, sugeriu-se, neste trabalho, que se adotasse, também, variação linear, determinando-se os coeficientes de crescimento da rugosidade a partir das rugosidades para tubos novos e velhos, fornecidas pelo fabricante. Considerando-se que os seus valores são pequenos, qualquer mudança na fórmula adotada não deve causar grandes alterações nos cálculos das rugosidades.

Verificou-se que a qualidade da água tem uma importância considerável na determinação da diminuição da capacidade da tubulação transportá-la, tendo em vista que, dependendo de suas características químicas, podem ocorrer os fenômenos da incrustação, da agressão ou da corrosão, que causam a redução da capacidade de transporte da tubulação. Constatou-se que o pH e o IL (Índice de Langelier) da água são importantes no cálculo do coeficiente de crescimento da rugosidade das paredes internas dos tubos, devendo, sempre que possível, a água para abastecimento ser levemente supersaturada e não ser nem agressiva, nem corrosiva. Neste caso, é recomendável um permanente controle da água, quanto a esta característica, por parte das empresas de saneamento, para evitar estes problemas de incrustação.

A estimativa do crescimento da população pode ser feita pelos métodos adotados pelo IBGE: Método das Componentes Demográficas e Método de Tendência de Crescimento Demográfico, tendo em vista a grande quantidade de dados disponíveis referentes às variações das populações dos municípios brasileiros registrados pelo IBGE. Existe uma tendência, atualmente, dos órgãos públicos de fomento do Brasil (bancos e órgãos de desenvolvimento) de seguirem a metodologia do IBGE para a estimativa de crescimento populacional das diversas localidades brasileiras.

Foram desenvolvidas fórmulas para o cálculo das variações anuais dos custos de energia elétrica com a operação da estação de bombeamento, considerando-se variáveis a vazão e o número de horas anuais de bombeamento, sendo o custo do kWh corrigido através do seu valor presente, calculado para cada ano de operação do projeto. Recomenda-se que a atualização dos custos de energia não seja feita pelo “fator de atualização de energia”, normalmente usado nos projetos, tendo em vista que este só deve ser usado no caso particular em que sejam constantes a vazão e o número anual de horas de bombeamento.

O algoritmo da Programação Não Linear (usado através do Solver importado para o programa computacional desenvolvido neste trabalho), se mostrou exeqüível quando aplicado na otimização de sistemas de abastecimento de água, considerando-se variáveis os parâmetros das condições de contorno do projeto. Deve-se levar em conta que o custo total obtido pelo método de otimização adotado pode não ser necessariamente o ótimo global. Este aspecto da incerteza da obtenção ou não do ótimo global não deve ser considerado como uma deficiência do processo de otimização, tendo em vista que os valores das variáveis hidráulicas encontrados no dimensionamento da rede (pressão disponível nos nós, diâmetros das tubulações dos trechos e velocidade de circulação da água), correspondentes à solução ótima alcançada pelo método, asseguram que esta solução está muito próxima da ótima global. A solução ótima local (muito próxima da global) satisfaz o objetivo principal de alcance de uma solução, efetivamente econômica.

Conforme se verificou no exemplo 7.2 desenvolvido no capítulo 7, a solução através do método proposto neste trabalho apresentou aumentos dos diâmetros em vários trechos da rede de abastecimento, em relação aos diâmetros obtidos pelo método PNL2000, que, como vários métodos de dimensionamento otimizado existentes, não considera as variações dos parâmetros das condições de contorno do projeto, o que pode levar a uma solução onde alguns trechos da rede estejam com diâmetros sub-dimensionados. Como, com a aplicação do método proposto, há redução nos custos de energia elétrica (custos de operação do projeto), o aumento nos custos de implantação que ocorre devido ao aumento de alguns diâmetros, não causa acréscimos acentuados no custo total do projeto.

O método de otimização de redes de abastecimento de água desenvolvido neste trabalho apresentou resultados coerentes quando comparados com os obtidos através de método consagrado na literatura (como o PNL2000), tendo sido eficiente na resolução dos problemas em que foi aplicado.

A ferramenta computacional auxiliar empregada através de um programa desenvolvido neste trabalho, demonstrou ser executável, podendo ser sugerido o seu uso na solução de problemas pelo método de otimização proposto.

Os resultados obtidos quando se considerou o custo do concreto do reservatório elevado (Exemplo 7.3) nos processos de otimização, apresentaram apenas pequenas diferenças em relação àqueles obtidos sem esta consideração, podendo-se sugerir a sua inclusão nos projetos de abastecimento de água .

Portanto, pode-se concluir que, os efeitos das variações dos parâmetros das condições de contorno do projeto devem ser considerados nos métodos de dimensionamento econômico de sistemas de abastecimento de água, tendo em vista que se tem melhor condição de dimensionamento das tubulações e pode-se calcular as populações, as vazões, os coeficientes de rugosidade, as horas anuais de bombeamento e os custos com energia, para cada ano de operação do projeto, desde sua entrada em funcionamento até o final do seu alcance. Pode-se, também, sugerir a inclusão do custo do concreto do reservatório elevado nos métodos de otimização de redes de abastecimento de água, podendo sua inclusão ser considerada como mais um parâmetro do projeto.

Os resultados do dimensionamento otimizado dos sistemas de distribuição de água, obtidos através do método proposto, podem ser considerados mais confiáveis do que os calculados com base em metodologias que não consideram as variações dos parâmetros das condições de contorno do projeto, tendo em vista que esta consideração tem influência significativa nos resultados dos dimensionamentos.

Em complemento a este estudo, podem ser feitas as seguintes recomendações:

- realização de um estudo aprofundado sobre a determinação dos efeitos das incrustações na redução dos diâmetros das tubulações, que ocasionam aumento nas perdas de carga e redução na capacidade de transportar água das tubulações.

- estudo dos efeitos da inclusão da confiabilidade de operação do sistema, considerando-a como mais uma restrição imposta ao processo de otimização.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALPEROVITS, E.; SHAMIR, U. - Design of optimal water distribution system. Water Resources Research, Ago. Vol, 13, nº 6, 900. New York, NY, USA, 1977, 885 p.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION - APHA - Standard methods for the examination of water and wastewater - 19th Edition, 1995 - ISBN: 0-87553-223-3-USA. p. 2-41, 2-47.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12218: Projeto de Rede de Distribuição de Água para Abastecimento Público. Rio de Janeiro, 1994.

_____ NBR 5647: Tubos de PVC Rígido com Junta Elástica. Rio de Janeiro, 1999.

_____ NBR 7665: Sistemas para Adução e Distribuição de Água - Tubos de PVC Defoyo com Junta Elástica. Rio de Janeiro, 1991.

AZEVEDO NETTO, José M. de. Manual de Hidráulica. Editora Edgard Bluncher. São Paulo, 8ª ed., 1998, 669 p.

BARBOSA, P. S. F., FRANCATO, A., L. e ALMEIDA, R. Algoritmo de Otimização para a Operação em tempo real de Sistemas Urbanos de Abastecimento de Água. Anais do XIX Congresso Latino-americano de Hidráulica. Tomo I. Córdoba, Argentina, 2000.

BELLMAN, R. E. Dynamic Programming. New Jersey, Princeton University Press, 1957.

BILLINGS, R. Bruce & AGTHE, D. E. State-Space Multiple Regression for Forecasting Urban Water Demand - Journal of Water Resources Planning and Management, vol. 124, Nº 2, março/abril, 1998, p. 113-117.

BAZARAA, Mokhtar S., SHERALI, Hanif e SHETTY, C. M. Nonlinear Programming: Theory and Algorithms. 2ª Edição, Ed. John Wiley & Sons, inc. New York, NY, USA, 1999.

CIRILO, José Almir. Programação Não Linear Aplicada a Recursos Hídricos, in: Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos, Organizador; Rubem La Laina Porto. Editora Universidade/UFRS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, RS, 1997, p. 305 - 356.

COELHO, A. C. Manual de Economia de Água. Olinda, Pernambuco. Ed. do Autor, 2001, 264 p.

DACACH, N. G. Sistemas Urbanos de Água . Editora Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, RJ, 1975, 389 p.

DZIEGIELEWSKI, Ben & BOLAND, J. J. Forecasting Urban Water Use: the IWE-MAIN MODEL. Water Resources Bulletin, nº 88075, 1989, p. 101-109.

EL BAHARAWY, A., SMITH, A. A. Methodology for Optimal Design of Pipe Distribution Networks. Canadian Joint of Civil Engineering, vol. 14, p. 207-215. Canadá, 1987.

FERNANDES, Carlos. Esgotos Sanitários. João Pessoa. Editora Universitária/UFPB, 1997, 435 p.

FORMIGA, Kleber Teodomiro. Metodologia de Otimização de Redes Malhadas Através da Programação Não Linear. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal da Paraíba- Campina Grande, 1999, 159 p.

FRITZCHE, Helmut. Programação Não Linear e Métodos. Editora Blucher, São Paulo, SP, 1978.

FRIZZONE, José Antonio & SILVEIRA, Fátima Ramos. Análise Econômica de Projetos Hidroagrícolas, in: Gestão de Recursos Hídricos: Aspectos Legais, Econômicos, Administrativos e Sociais. Pruski, Editora - Brasília - DF: Secretaria de Recursos Hídricos. Viçosa MG: Universidade Federal de Viçosa. ABRH, 2000, p. 449-508.

GOLDBERG, D. E. Genetic Algorithm in Search, Optimization and Machine Learning. Addison-Wesley Publishing Co. Reading. Massachusetts, USA, 1989.

GOMES, Heber Pimentel. Engenharia de Irrigação: Hidráulica dos Sistemas Pressurizados, Aspersão e Gotejamento. UFPB, Campina Grande, 3ª ed., 1999, 409 p.

GOMES, HEBER Pimentel. PNL 2000 - Método Prático de Dimensionamento Econômico de Redes Malhadas de Abastecimento de Água. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, 2001, vol. 6, nº 4, p. 91 - 108.

GOMES, Heber Pimentel. Sistemas de Abastecimento de Água - Dimensionamento Econômico. Editora Universitária - UFPB, 1ª ed., João Pessoa, 2002, 192 p.

GOUTER, Ian C. Systems Analysis Water-Distribution Network Design: From Theory to Practice. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, vol. 118, nº3, New York, NY, USA, 1992, p. 238 - 248.

HOLLAND, J. H. Adaptation in Natural and Artificial Systems. MIT Press, Cambridge, Massachussets, USA, 1975.

IBGE. Estimativas de população do Brasil, grandes regiões, unidades da federação e municípios. Departamento de População e Indicadores Sociais - Rio de Janeiro, 2002, 24 p.

ILAB- TECNOLOGIA. Inteligência Artificial e Sistema Especialista. Disponível no Site da Web:<http://www.ilab.com.Br/tecnolog.htm>. Data:01/01/2001.

KARMELI, D., GADISH, Y. e MEYERS, S. Design of Optimal Water Distribution. Journal of Pipeline Division, ASCE Press, vol. 94, New York, NY - USA, 1968, p.1-10.

LANNA, A. E. Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos. Organizador: Ruben Laina Porto. Editora da Universidade- UFRGS, ABRH. Porto Alegre, 1997, p. 15 - 41.

LANSEY, Kevin E., MAYS, Larry W. Optimization Model for Water Distribution System Design. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, vol. 115, nº 10, New York, NY,USA,1989, p. 1401 - 1419.

LASDON, L. S., WARREN, A. D. e RATNER, M. S. GRG2 User's Guide. University of Texas at Austin, Austin, Texas, USA, 1984.

LEAL, Antonio Farias. Estudo Comparativo do Método de Otimização de Redes Malhadas Pressurizadas. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande - PB, 1995, 141 p.

LOUBSER, B. F. e JESSLER, J. Computer Aided Optimization of Water Distribution Networks. The Civil Engeneering in South Africa, Johannesburg, South Africa, 1990.

LOPES, Alan Vaz. Otimização do Dimensionamento e Análise de Confiabilidade de Redes de Distribuição de Água. Dissertação de Mestrado. Publicação PTARH.DM - 051 A/2002, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, 147 p.

LOEWENTHAL, Richard E., WIECHERS, Herman N. S. & MARAIS, Gert V. R. Softening and Stabilization of Municipal Waters. Water Research Commission. P.O.Box 824. Pretoria 0001. Republic of South Africa. Junho de 1986.

LOEWENTHAL, Richard E. & MARAIS, Gert V. R. Carbonate Chemistry of Aquatic Systems: Theory and Applications. An Arbor Sci Publishers, Michigan, 1976.

LOURENÇO, Carlos E. B. Algoritmos Genéticos, Disponível no Site da Web:<http://black.rc.unesp.br/ccomp/algoritmo/direito.html>. Data: 9/11/2001.

MADEIRA, JoãoLira, SIMÕES, Celso Cardoso da Silva. Estimativas Preliminares da População Urbana e Rural segundo Unidades da Federação, de 1960/1980, por uma Nova Metodologia. Revista Brasileira de Estatística, Rio de Janeiro, vol.33, nº 129, jan./mar. 1972, p. 3-11.

MATEUS, Geraldo Robson e LUNA, Henrique Pacca. Programação Não Linear. V Escola de Computação, Belo Horizonte, MG, 1987.

MELO, Dimitri Pinto de. Otimização de Redes Malhadas Abastecidas com Múltiplos Reservatórios, Bombas e Boosters Através da Programação Não Linear. Dissertação de Mestrado, UFPB - Campina Grande - PB, 2000, 158 p.

MORGAN, D. e GOULTER, J. Optimal Urban Water Distribution Design. Water Resources Research. Vol. 21, nº 5, 1985, p. 642-652.

MUNEM, Mustafá A., e FOULIS, David J. Cálculo Livros Técnicos e Científicos Editora S. A. Rio de Janeiro, RJ, 1986.

OLIVEIRA, Jorge Ivan de. Caracterização do Consumo per Capita de Água na Cidade do Natal: uma Análise Sócio-Econômica. Dissertação de Mestrado, UFRN - Natal - RN, 2002, p. 166.

OLIVEIRA, Juarez de C. e FERNANDES, Fernando. Metodologia e Considerações acerca da Projeção de População do Brasil: 1980-2020. São Paulo em Perspectiva. São Paulo: Fundação SEADE, vol. 10, ano 2, abr./jun. 1996, p. 116-123.

PORTO, Rodrigo de M. Hidráulica Básica. S. Carlos, Publicação EESC-USP, 1998, 519p.

SANTOS, Marcus C. Costa. Simulação de Cenários de Operação de Sistemas de Distribuição de Água Através do Método PNL 2000. Dissertação de Mestrado, UFBP-

Campina Grande, 2002, 118 p.

SAVIC, Dragn A, WALTERS, Goldfrey A. Genetic Algorithms for Least-Cost of Water System on Networks. Journal of Water Resource Planning and Management, ASCE, vol. 123, New York, NY, USA, 1997, p. 67 - 77.

SHARP, W. W. & WALSKI, T. M. Predicting Roughness in Water Mains, Journal AWWA-Management and Operations, November / 1988, p. 34-40.

SILVA, Rossana C. Araújo. Otimização de Redes Ramificadas Através do Método da Programação Não Linear. Dissertação de Mestrado, UFPB- Campina Grande, 1997, 148 p.

STREET, V. L. Fluid Mechanics. Mc Graw-Hill, New York, 1971.

SU, Yu-Chun, MAYS, Larry, DUAN, Ning, LANSEY, Kevin E. Reliability Band Optimization Model for Water Distribution Systems. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE. New York, NY, USA, 1987, vol. 114, nº 12, p. 1539-1555.

SWAMEE, P. K. Design of a Submarine Pipeline. J. Transp Eng. ASCE, 119 (1), P. 159 – 170, 1993.

SWAMEE, P. K. & JAIN, A. K. Explicit Equations for Pipe-Flow Problems. Journal of Hydraulics Division - ASCE, May, 1976.

TOMAZ, P. Previsão de Consumo de Água - Interface das Instalações Prediais de Água e Esgoto com os Serviços Públicos. São Paulo: Comercial Editora Hermano & Bugelli, 2000, 250 p.

TSUTIYA, M. T. Redução do Custo de Energia Elétrica em Sistemas de Abastecimento de Água, 1ª ed., São Paulo: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2001, 185 p.

VIANNA, Marcos Rocha. Hidráulica Aplicada às Estações de Tratamento de Água. 3ª Ed. - Belo Horizonte: Imprimatur, 1997, 576 p.

WALSKI, Thomas M. et al. Battle of the Network Models Epilogue. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, vol. 113, nº 2, 1987, p. 191 - 203.

YEH, William W. G. Reservoir Management and Operations Models: A State-of-the-Art Review. Water Resources Research, vol. 21, nº 12, December, 1995, USA, p.1787-1818.

APÊNDICES

APÊNDICE A - Verificação do efeito do custo da estrutura da caixa d'água, dos pilares e das fundações no dimensionamento econômico da rede

A verificação do efeito do custo do concreto estrutural do reservatório, dos pilares e das fundações, no dimensionamento econômico dos projetos de redes de abastecimento de água é um problema bastante complexo, tendo em vista a grande variedade de tipos de reservatórios e pilares existentes, sendo, inclusive, impossível se prever os tipos que serão projetados no futuro. Desta forma, é praticamente impossível se obter uma equação geral que represente o problema. Diante desta constatação, sugere-se que, para os tipos de reservatórios e pilares já definidos no projeto, o projetista pode fazer suposições que permitam obter uma equação que represente a função de variação do volume do concreto em função da variação da altura do pilar.

Neste estudo, para se fazer a estimativa do custo da estrutura (constituída de reservatório, pilares e fundações), variando-se as alturas dos pilares, considerou-se uma reservatório circular com capacidade para $50,0 \text{ m}^3$, apoiada em 06 pilares de seções transversais retangulares, variando-se as suas dimensões a cada 5,0 m de aumento da altura do pilar. Para as sapatas se adotou seção quadrada de $1,0 \text{ m} \times 1,0 \text{ m}$ e 0,25 m de altura média, para pilares com 5,0 m de altura, aumentando-se o seu volume em 20%, para cada aumento de 5,0 m nas alturas dos pilares.

As seções transversais adotadas para os pilares foram as seguintes:

alturas dos pilares:	seções transversais dos pilares:
0,0 m - 5,0 m	0,20 m x 0,20 m
5,0 m - 10,0 m	0,30 m x 0,30 m
10,0 m - 15,0 m	0,35 m x 0,35 m
15,0 m - 20,0 m	0,40 m x 0,40 m
20,0 m - 25,0 m	0,50 m x 0,50 m
25,0 m - 30,0 m	0,65 m x 0,65 m
30,0 m - 35,0 m	0,80 m x 0,80 m

Desta forma, calculou-se o volume do concreto da estrutura, para um número representativo de alturas dos pilares, conforme o Quadro 1.

Quadro 1 - Volume do concreto da estrutura x altura do pilar

Altura H (m)	Volume V (m ³)	Altura H (m)	Volume V (m ³)
7	5,6	23	37,6
10	7,2	25	40,6
13	11,7	26	69,6
15	13,2	28	74,7
16	17,9	30	79,8
18	19,9	31	123,5
20	21,8	33	131,2
21	34,6	35	138,9

Com os dados do Quadro 1 fez-se um ajuste de curvas através da ferramenta linha de tendência do Excel, obtendo-se a curva da figura 1.

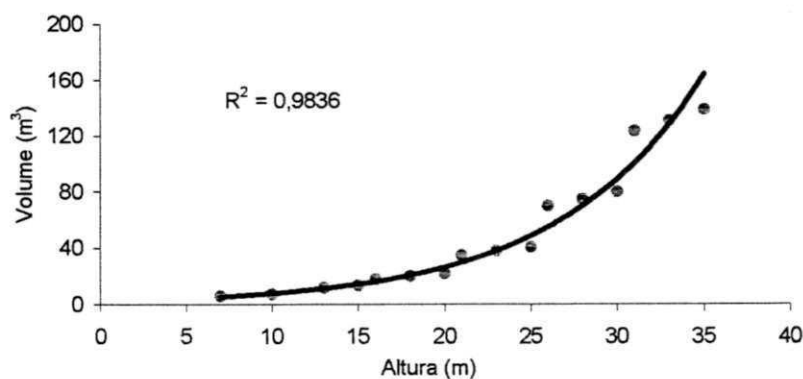


Figura 1 - Curva de ajuste da altura do pilar versus volume de concreto estrutural

$$V = 2,293 \cdot e^{0,1221 \cdot H} \quad (1)$$

sendo:

V - volume do concreto da estrutura, em m³;

H - altura média dos pilares, em m.

APÊNDICE B - Cálculo dos custos unitários de instalação das tubulações do Exemplo 7.3

Os custos unitários de implantação das tubulações são calculados pela fórmula:

$$C(D) = P(D) + M(D) \quad (2)$$

sendo:

$C(D)$ - custo unitário de instalação das tubulações;

$P(D)$ - custo unitário do material mais o frete;

$M(D)$ - soma dos custos unitários de escavação, aterro das valas, retirada e reposição de pavimento, bota-fora, transporte da tubulação até o local de instalação e mão de obra da instalação.

Considerando-se que a tubulação esteja enterrada em uma vala trapezoidal, conforme a Figura 1, tem-se:

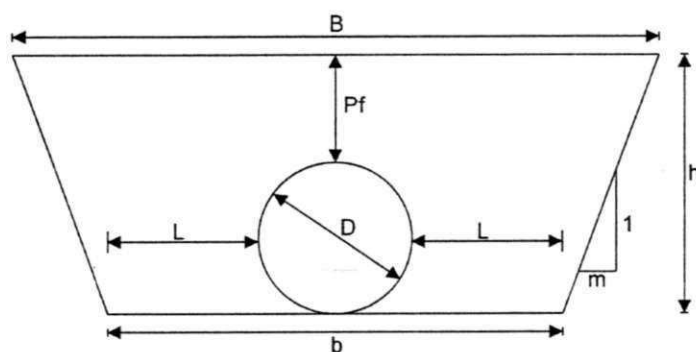


Figura 1 - Seção de vala trapezoidal (Extraída de Gomes, 2002)

Os volumes de escavação ($V_{esc.}$) e de aterro ($V_{at.}$) são dados por:

$$V_{esc.} = [(D + 2L) + m(D + P_f)](D + P_f) \quad (3)$$

$$V_{at.} = V_{esc.} - \frac{\pi D^2}{4} \quad (4)$$

Adotar os seguintes dados:

dados da vala: $h = 1,40$ m; $m = 0,20$ m; $L = 0,30$ m;

escavação em terra;

reaterro com aproveitamento;

desprezar os custos com bota-fora;

não há retirada nem reposição de pavimento;

custos unitários fornecidos por técnico da CAGEPA - PB, em outubro de 2003:

escavação em terra: $9,85 \text{ R\$/m}^3$;

reaterro com aproveitamento: $6,95 \text{ R\$/m}^3$;

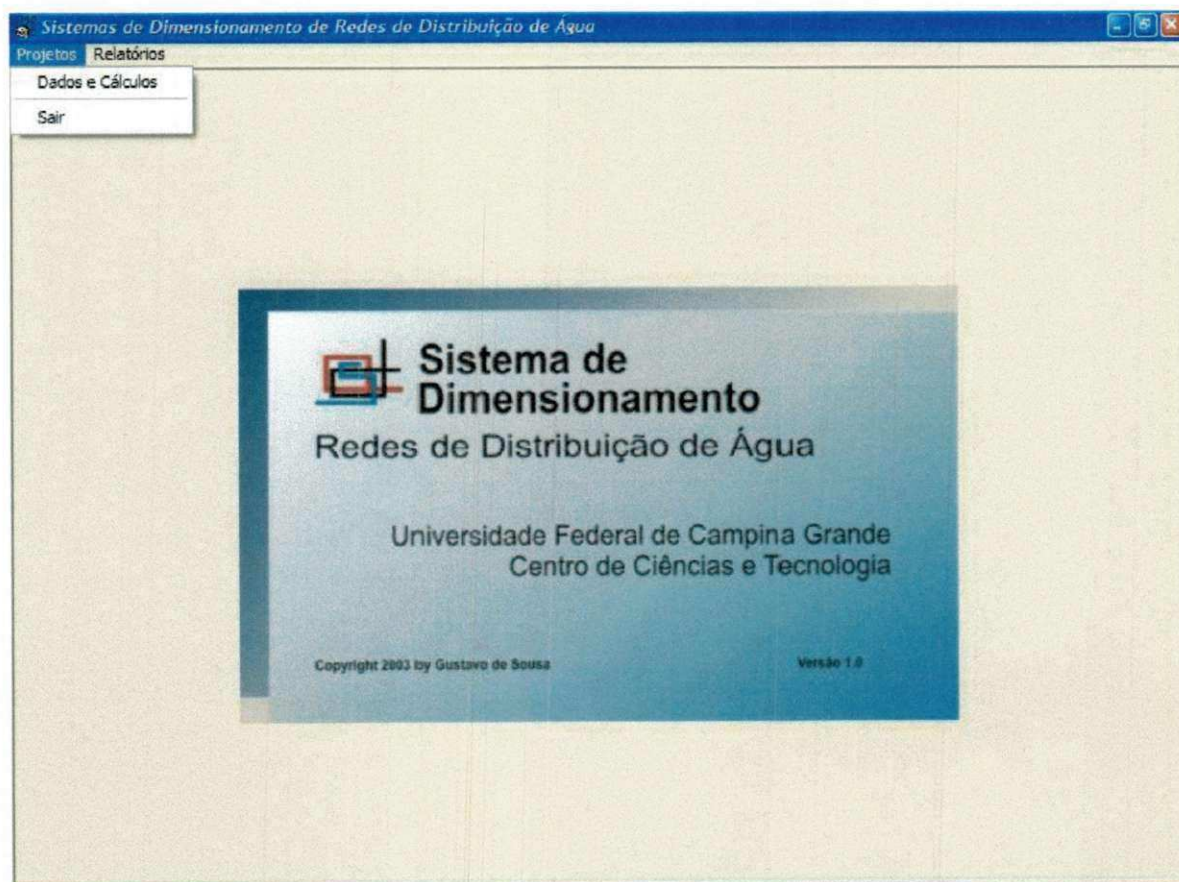
Os custos do transporte da tubulação até o local e mão de obra de instalação se encontram no Quadro 2, que foi formulado com os dados acima e contém a composição dos custos de instalação das tubulações.

Quadro 2 - Composição dos custos de instalação das tubulações

DN	Escavação em terra		Reaterro (c/ aproveitamento)		Mão-de-obra (R\$/m)	Transporte (R\$/m)	Custo unitário de Instalação (R\$/m)
	Escavação (m^3/m)	Custo unitário (R\$/m)	Reaterro (m^3/m)	Custo (R\$/m)			
50	1.302	12.82	1.300	9.04	1.01	0.50	35,30
75	1.337	13.17	1.333	9.26	1.22	0.61	36,10
100	1.372	13.51	1.364	9.48	1.36	0.68	36,90
150	1.442	14.20	1.424	9.90	1.86	0.93	38,40
200	1.512	14.89	1.481	10.29	2.40	1.20	40,00
250	1.582	15.58	1.533	10.65	2.81	1.41	41,60
300	1.652	16.27	1.581	10.99	3.30	1.65	43,20
400	1.792	17.65	1.66	11.58	4.26	2.15	46,20
500	1.932	19.03	1.736	12.06	5.02	2.51	49,10

APÊNDICE C – Módulos e código fonte do programa computacional desenvolvido neste trabalho.

A figura abaixo refere-se ao módulo principal do projeto. Na página seguinte, segue o código fonte deste módulo escrito em Delphi.



```

unit Principal;

interface

uses
  Windows, Messages, SysUtils, Classes, Graphics, Controls, Forms, Dialogs,
  Menus, Db, DBTables, Math, StdCtrls, Buttons, Grids, DBGrids, ComCtrls,
  ExtCtrls, jpeg;

type
  TfrmPrincipal = class(TForm)
    Database1: TDatabase;
    MainMenu1: TMainMenu;
    Arquivo1: TMenuItem;
    DadosCalculos1: TMenuItem;
    Sair1: TMenuItem;
    Relatorios1: TMenuItem;
    ProjetosCadastrados1: TMenuItem;
    N5: TMenuItem;
    tblNos: TTable;
    tblNosRegistros: TAutoIncField;
    tblNosCodProjeto: TStringField;
    tblNosVazao: TFloatField;
    tblTrechos: TTable;
    tblTrechosRegistros: TAutoIncField;
    tblTrechosCodProjeto: TStringField;
    tblTrechosTrecho: TStringField;
    tblTrechosVazaoCalculada: TFloatField;
    tblTrechosDiametro: TFloatField;
    tblTrechosComprimento: TFloatField;
    tblTrechosPerdaCarga: TFloatField;
    tblTrechosCustoUnitario: TFloatField;
    tblTrechosCustoTotal: TFloatField;
    tblNosTrecho: TStringField;
    tblNosCota: TFloatField;
    tblNosPercurso: TStringField;
    tblNosNo: TStringField;
    Panel1: TPanel;
    Image1: TImage;
    tblProjetos: TTable;
    tblProjetosCodProjeto: TStringField;
    tblProjetosDescricao: TStringField;
    tblProjetosCotaPiezometrica: TFloatField;
    tblProjetosRendimento: TFloatField;
    procedure FormCreate(Sender: TObject);
    procedure Sair1Click(Sender: TObject);
    procedure DadosCalculos1Click(Sender: TObject);
    procedure ProjetosCadastrados1Click(Sender: TObject);
  private
    Calcular: Boolean;
  public
    CodProjeto: String;
    VAzao: Array[1..10000] of real;
    function Potencia(Base, Expoente: Double): Double;
    function PerdaCargaDW(n, D, V, E, L: Real): Real;
    function PerdaCargaHW(Q, L, D: Real): Real;
    function Path: String;
    function FormatarTexto(Texto: String; Tamanho: Integer): String;
    function Substituir(Texto: String; S1, S2: Char): String;
  end;

var
  frmPrincipal: TfrmPrincipal;

implementation

uses
  CalcularProjeto, Diametros, RelProjetos;

{$R *.DFM}

function TfrmPrincipal.Substituir(Texto: String; S1, S2: Char): String;
var
  i: Integer;
begin
  for i := 1 to Length(Texto) do
    begin
      if Texto[i] = S1 then Texto[i] := S2;
    end;
  Result := Texto;
end;

function TfrmPrincipal.Potencia(Base, Expoente: Double): Double;
begin
  if Base = 0 then

```



```

begin
    Result := 0
end
else
begin
    if Base < 0 then
        Result := Exp(ln(-Base)*Expoente)
    else
begin
        Result := Exp(ln(Base)*Expoente);
    end;
end;
end;

function TfrmPrincipal.PerdadeCargaDW(n, D, V, E, L: Real): Real;
var
    Re: Real;
    Den: Real;
    f: Real;
begin
    // Número de Reynolds
    Re := (n*D)/V;
    // Denominador da expressão a ser calculada
    Den := log10((E/3.7*D) + (5.74/Potencia(Re, 0.9)));
    // Cálculo do fator de atrito
    f := 0.25 / Potencia(Den, 2);
    // Cálculo da perda de carga
    Result := f*(L/D)*(Potencia(V, 2)/19.62);
end;

function TfrmPrincipal.PerdadeCargaHW(Q, L, D: Real): Real;
var
    C: Integer;
    P1, P2: Real;
begin
    Q := Q/1000;
    D := D/1000;
    if D <= 0.300 then
begin
        C := 145;
    end
    else
begin
        C := 130;
    end;
    P1 := Potencia(Q/C, 1.852);
    P2 := 1/Potencia(D, 4.87);
    // Cálculo da perda de carga
    Result := 10.66 * L * P1 * P2;
end;

function TfrmPrincipal.Path: String;
begin
    Result := ExtractFilePath(ParamStr(0));
end;

function TfrmPrincipal.FormatarTexto(Texto: String; Tamanho: Integer): String;
var
    i: Integer;
    S: String;
begin
    S := '';
    for i := 1 to Tamanho-Length(Texto) do
begin
        S := S + ' ';
    end;
    Result := Texto + S;
end;

procedure TfrmPrincipal.FormCreate(Sender: TObject);
begin
    Calcular := True;
    //
    Panel1.Left := (Screen.Width - Panel1.Width) div 2;
    Panel1.Top := (Screen.Height - Panel1.Height) div 2;
    try
        Database1.Connected := True;
    except
        on EDatabaseError do
begin
            Application.MessageBox('Não foi possível conectar a base de dados ODBC "Dimensionamento"',
            'Atenção', MB_ICONWARNING);
        end;
    end;
end;
end;

```

```

procedure TfrmPrincipal.Sair1Click(Sender: TObject);
begin
    Self.Close;
end;

procedure TfrmPrincipal.DadosCalculos1Click(Sender: TObject);
begin
    Application.CreateForm(TfrmCalcularProjeto, frmCalcularProjeto);
    frmPrincipal.DadosCalculos1.Enabled := False;
end;

procedure TfrmPrincipal.ProjetosCadastrados1Click(Sender: TObject);
begin
    with TqrProjetos.Create(Self) do
    begin
        with sqlProjetos do
        begin
            Close;
            SQL.Clear;
            SQL.Add('SELECT * FROM PROJETOS ORDER BY DESCRICAO');
            Prepare;
            Open;
        end;
        //
        PreviewModal;
        Destroy;
    end;
end;

end.

```

A figura abaixo refere-se ao módulo de cadastro de novos projetos. Na página seguinte, segue o código fonte deste módulo.

Sistemas de Dimensionamento de Redes de Distribuição de Água

Projetos Relatórios

Dados Iniciais do Projeto

Dados de Entrada do Projeto

Código: 000002 Nome do Projeto: EXEMPLO ILUSTRATIVO 7.2

Altura Inicial (m): 24,0 Cota do Terreno(m): 30,0 Rug. Inicial PVC (mm): 0,1000 Diam. Lim. (mm): 300

Rug. Inicial FoFo (mm): 0,3000 Coef. Var. Rug (mm): 0,0100 Pop. Inicial: 60901 Ano Inicial: 2000 Horiz.: 20

PH: 8,50 Custo do Kw/h (R\$): 0,071 Rendimento(%): 75,00 N° de Nós: 6 N° de Trechos: 8

Juros (%): 12,00 Taxa de Energia (%): 6,00 KB: 47,57 K1: 1,20 K2: 1,50 Dem.(m3/hab): 0,20

Equação da População (Linear)

$P = 60952 + 1997,47 \cdot t$

Fórmula Para o Cálculo da Perda de Carga

☒ Hazen-Williams ☐ Darcy-Weissbach

$$\Delta H = 10,66 \left(\frac{Q}{C} \right)^{1,852} \frac{L}{D^{4,87}}$$

Utilização de Estrutura de Concreto na Caixa D'Água

☒ Utilizar Caixa de Concreto

Volume da Caixa (m3): 20,00 Custo Unitário do Concreto (R\$/m3): 950,00

Gravar Cancelar

```

unit DadosProjeto;

interface

uses
  Windows, Messages, SysUtils, Classes, Graphics, Controls, Forms, Dialogs,
  StdCtrls, Buttons, Db, DBTables, ExtCtrls;

type
  TfrmDadosProjeto = class(TForm)
    GroupBox1: TGroupBox;
    Label2: TLabel;
    Label9: TLabel;
    Label10: TLabel;
    Label11: TLabel;
    Label12: TLabel;
    EditRugosidadePVC: TEdit;
    EditCotaReservatorio: TEdit;
    EditAltura: TEdit;
    EditCodProjeto: TEdit;
    EditNomeProjeto: TEdit;
    butGravar: TBitBtn;
    butCancelar: TBitBtn;
    GroupBox4: TGroupBox;
    imgEquacao: TImage;
    rbHazenWilliams: TRadioButton;
    rbDarcy: TRadioButton;
    EditCustoKWH: TEdit;
    Label7: TLabel;
    Label13: TLabel;
    EditRendimento: TEdit;
    EditNumNos: TEdit;
    Label15: TLabel;
    EditNumTrechos: TEdit;
    Label16: TLabel;
    EditPH: TEdit;
    Label8: TLabel;
    EditTaxaJuros: TEdit;
    EditTaxaEnergia: TEdit;
    Label14: TLabel;
    Label17: TLabel;
    GroupBox2: TGroupBox;
    cbColunaConcreto: TCheckBox;
    EditVolumeCaixa: TEdit;
    Label18: TLabel;
    EditCustoConcreto: TEdit;
    Label19: TLabel;
    Label1: TLabel;
    EditRugosidadeFoFo: TEdit;
    Label3: TLabel;
    EditPopulacaoInicial: TEdit;
    EditAnoInicial: TEdit;
    Label4: TLabel;
    EditK: TEdit;
    EditK1: TEdit;
    EditK2: TEdit;
    Label5: TLabel;
    Label6: TLabel;
    Label20: TLabel;
    EditHorizonte: TEdit;
    Label21: TLabel;
    Label22: TLabel;
    EditDemanda: TEdit;
    EditDiametroMaterial: TEdit;
    Label23: TLabel;
    EditCoefVarRug: TEdit;
    Label24: TLabel;
    GroupBox3: TGroupBox;
    Label25: TLabel;
    EditParamB: TEdit;
    Label26: TLabel;
    EditParamA: TEdit;
    Label27: TLabel;
    procedure butCancelarClick(Sender: TObject);
    procedure rbHazenWilliamsClick(Sender: TObject);
    procedure rbDarcyClick(Sender: TObject);
    procedure EditAlturaKeyDown(Sender: TObject; var Key: Word;
      Shift: TShiftState);
    procedure EditCotaReservatorioKeyDown(Sender: TObject; var Key: Word;
      Shift: TShiftState);
    procedure EditRugosidadePVCKeyDown(Sender: TObject; var Key: Word;
      Shift: TShiftState);
    procedure butGravarClick(Sender: TObject);
    procedure FormClose(Sender: TObject; var Action: TCloseAction);
    procedure rbHazenWilliamsKeyDown(Sender: TObject; var Key: Word;

```

```

    Shift: TShiftState);
procedure rbDarcyKeyDown(Sender: TObject; var Key: Word;
    Shift: TShiftState);
procedure EditCustoKWHKeyDown(Sender: TObject; var Key: Word;
    Shift: TShiftState);
procedure EditRendimentoKeyDown(Sender: TObject; var Key: Word;
    Shift: TShiftState);
procedure EditNumNosKeyDown(Sender: TObject; var Key: Word;
    Shift: TShiftState);
procedure EditNumTrechosKeyDown(Sender: TObject; var Key: Word;
    Shift: TShiftState);
procedure EditPKKeyDown(Sender: TObject; var Key: Word;
    Shift: TShiftState);
procedure EditTaxaJurosKeyDown(Sender: TObject; var Key: Word;
    Shift: TShiftState);
procedure EditTaxaEnergiaKeyDown(Sender: TObject; var Key: Word;
    Shift: TShiftState);
procedure cbColunaConcretoClick(Sender: TObject);
procedure EditRugosidadeFoFoKeyDown(Sender: TObject; var Key: Word;
    Shift: TShiftState);
procedure EditPopulacaoInicialKeyDown(Sender: TObject; var Key: Word;
    Shift: TShiftState);
procedure EditAnoInicialKeyDown(Sender: TObject; var Key: Word;
    Shift: TShiftState);
procedure EditNomeProjetoKeyDown(Sender: TObject; var Key: Word;
    Shift: TShiftState);
procedure EditHorizonteKeyDown(Sender: TObject; var Key: Word;
    Shift: TShiftState);
procedure EditDemandaKeyDown(Sender: TObject; var Key: Word;
    Shift: TShiftState);
procedure EditKKeyDown(Sender: TObject; var Key: Word;
    Shift: TShiftState);
procedure EditK1KeyDown(Sender: TObject; var Key: Word;
    Shift: TShiftState);
procedure EditK2KeyDown(Sender: TObject; var Key: Word;
    Shift: TShiftState);
procedure FormShow(Sender: TObject);
procedure EditVolumeCaixaKeyDown(Sender: TObject; var Key: Word;
    Shift: TShiftState);
procedure EditCustoConcretoKeyDown(Sender: TObject; var Key: Word;
    Shift: TShiftState);
procedure EditDiametroMaterialKeyDown(Sender: TObject; var Key: Word;
    Shift: TShiftState);
procedure EditCoefVarRugKeyDown(Sender: TObject; var Key: Word;
    Shift: TShiftState);
procedure EditParamAKeyDown(Sender: TObject; var Key: Word;
    Shift: TShiftState);
procedure EditParamBKeyDown(Sender: TObject; var Key: Word;
    Shift: TShiftState);
private

public

end;

var
    frmDadosProjeto: TfrmDadosProjeto;

implementation

uses
    Principal, CalcularProjeto;

{$R *.DFM}

procedure TfrmDadosProjeto.butCancelarClick(Sender: TObject);
begin
    Self.Close;
end;

procedure TfrmDadosProjeto.rbHazenWilliamsClick(Sender: TObject);
var
    Imagem: TBitmap;
begin
    Imagem := TBitmap.Create;
    Imagem.LoadFromFile(frmPrincipal.Path + 'Imagens\Hazen-Williams.bmp');
    imgEquacao.Picture.Bitmap := Imagem;
    //
    Imagem.Destroy;
end;

procedure TfrmDadosProjeto.rbDarcyClick(Sender: TObject);
var
    Imagem: TBitmap;
begin

```

```

        Imagem := TBitmap.Create;
        Imagem.LoadFromFile(frmPrincipal.Path + 'Imagens\Darcy-Weissbach.bmp');
        imgEquacao.Picture.Bitmap := Imagem;
        //
        Imagem.Destroy;
    end;

procedure TfrmDadosProjeto.EditAlturaKeyDown(Sender: TObject;
    var Key: Word; Shift: TShiftState);
begin
    if Key = VK_RETURN then
    begin
        try
            EditAltura.Text := Format('%0.1f', [StrToFloat(EditAltura.Text)]);
            EditCotaReservatorio.SetFocus;
        except
            on EConvertError do
            begin
                Application.MessageBox('Separador decimal inválido!',
                    'Atenção', MB_ICONWARNING);
                //
                EditAltura.SelectAll;
                EditAltura.SetFocus;
            end;
        end;
    end;
end;

procedure TfrmDadosProjeto.EditCotaReservatorioKeyDown(Sender: TObject;
    var Key: Word; Shift: TShiftState);
begin
    if Key = VK_RETURN then
    begin
        try
            EditCotaReservatorio.Text := Format('%0.1f', [StrToFloat(EditCotaReservatorio.Text)]);
            EditRugosidadePVC.SetFocus;
        except
            on EConvertError do
            begin
                Application.MessageBox('Separador decimal inválido!',
                    'Atenção', MB_ICONWARNING);
                //
                EditCotaReservatorio.SelectAll;
                EditCotaReservatorio.SetFocus;
            end;
        end;
    end;
end;

procedure TfrmDadosProjeto.EditRugosidadePVCKeyDown(Sender: TObject;
    var Key: Word; Shift: TShiftState);
begin
    if Key = VK_RETURN then
    begin
        try
            EditRugosidadePVC.Text := Format('%0.4f', [StrToFloat(EditRugosidadePVC.Text)]);
            EditDiametroMaterial.SetFocus;
        except
            on EConvertError do
            begin
                Application.MessageBox('Separador decimal inválido!',
                    'Atenção', MB_ICONWARNING);
                //
                EditRugosidadePVC.SelectAll;
                EditRugosidadePVC.SetFocus;
            end;
        end;
    end;
end;

procedure TfrmDadosProjeto.butGravarClick(Sender: TObject);
var
    i: Integer;
begin
    i := Application.MessageBox('Deseja salvar os dados deste projeto?',
        'Confirmação', MB_ICONQUESTION + MB_YESNOCANCEL);
    if i = ID_YES then
    begin
        if EditNomeProjeto.Text = '' then
        begin
            Application.MessageBox('Digite o nome do projeto!',
                'Atenção', MB_ICONWARNING);
            //
            EditNomeProjeto.SetFocus;
            Exit;
        end;
    end;
end;

```

```

end;
//
frmCalcularProjeto.tblProjetos.Edit;
frmCalcularProjeto.tblProjetos.CodProjeto.Value := EditCodProjeto.Text;
frmCalcularProjeto.tblProjetos.Descricao.Value := EditNomeProjeto.Text;
frmCalcularProjeto.tblProjetos.CotaPiezometrica.Value := StrToFloat(EditAltura.Text);
frmCalcularProjeto.tblProjetos.CotaReservatorio.Value := StrToFloat(EditCotaReservatorio.Text);
frmCalcularProjeto.tblProjetos.RugInicialPVC.Value := StrToFloat(EditRugosidadePVC.Text);
frmCalcularProjeto.tblProjetos.DiametroMaterial.Value := StrToFloat(EditDiametroMaterial.Text);
frmCalcularProjeto.tblProjetos.RugInicialFoFo.Value := StrToFloat(EditRugosidadeFoFo.Text);
frmCalcularProjeto.tblProjetos.CoeVarRugPVC.Value := StrToFloat(EditCoeVarRug.Text);
frmCalcularProjeto.tblProjetos.PopulacaoInicial.Value := StrToFloat(EditPopulacaoInicial.Text);
frmCalcularProjeto.tblProjetos.AnoInicial.Value := StrToInt(EditAnoInicial.Text);
frmCalcularProjeto.tblProjetos.Horizonte.Value := StrToInt(EditHorizonte.Text);
frmCalcularProjeto.tblProjetos.PH.Value := StrToFloat(EditPH.Text);
frmCalcularProjeto.tblProjetos.CustoKWH.Value := StrToFloat(EditCustoKWH.Text);
frmCalcularProjeto.tblProjetos.Rendimento.Value := StrToFloat(EditRendimento.Text);
frmCalcularProjeto.tblProjetos.NumNos.Value := StrToInt(EditNumNos.Text);
frmCalcularProjeto.tblProjetos.NumTrechos.Value := StrToInt(EditNumTrechos.Text);
frmCalcularProjeto.tblProjetos.Taxa.Value := StrToFloat(EditTaxaJuros.Text);
frmCalcularProjeto.tblProjetos.TaxaEnergia.Value := StrToFloat(EditTaxaEnergia.Text);
frmCalcularProjeto.tblProjetos.K.Value := StrToFloat(EditK.Text);
frmCalcularProjeto.tblProjetos.K1.Value := StrToFloat(EditK1.Text);
frmCalcularProjeto.tblProjetos.K2.Value := StrToFloat(EditK2.Text);
frmCalcularProjeto.tblProjetos.DemandaHabitante.Value := StrToFloat(EditDemanda.Text);
frmCalcularProjeto.tblProjetos.ParametroPopA.Value := StrToFloat(EditParamA.Text);
frmCalcularProjeto.tblProjetos.ParametroPopB.Value := StrToFloat(EditParamB.Text);
frmCalcularProjeto.tblProjetos.CaixaConcreto.Value := cbColunaConcreto.Checked;
frmCalcularProjeto.tblProjetos.VolumeCaixaConcreto.Value := StrToFloat(EditVolumeCaixa.Text);
frmCalcularProjeto.tblProjetos.CustoConcreto.Value := StrToFloat(EditCustoConcreto.Text);

if rbHazenWilliams.Checked = True then frmCalcularProjeto.tblProjetos.PerdaCarga.Value := 'HW';
if rbDarcy.Checked = True then frmCalcularProjeto.tblProjetos.PerdaCarga.Value := 'DW';
//
frmCalcularProjeto.tblProjetos.Post;
//
Self.Close;
end;
if i = ID_NO then
begin
Self.Close;
end;
if i = ID_CANCEL then
begin
EditNomeProjeto.SetFocus;
end;
end;

procedure TfrmDadosProjeto.FormClose(Sender: TObject;
var Action: TCloseAction);
begin
frmCalcularProjeto.tblProjetos.Cancel;
frmPrincipal.CodProjeto := '';
frmCalcularProjeto.Tag := 0;
frmCalcularProjeto.Enabled := True;
frmCalcularProjeto.OnShow(Self);
end;

procedure TfrmDadosProjeto.rbHazenWilliamsKeyDown(Sender: TObject;
var Key: Word; Shift: TShiftState);
begin
if Key = VK_RETURN then cbColunaConcreto.SetFocus;
end;

procedure TfrmDadosProjeto.rbDarcyKeyDown(Sender: TObject; var Key: Word;
Shift: TShiftState);
begin
if Key = VK_RETURN then butGravar.SetFocus;
end;

procedure TfrmDadosProjeto.EditCustoKWHKeyDown(Sender: TObject;
var Key: Word; Shift: TShiftState);
begin
if Key = VK_RETURN then
begin
try
EditCustoKWH.Text := Format('%0.3f', [StrToFloat(EditCustoKWH.Text)]);
EditRendimento.SetFocus;
except
on EConvertError do
begin
Application.MessageBox('Separador decimal inválido',
'Atenção', MB_ICONWARNING);
//
EditCustoKWH.SelectAll;
end;
end;
end;

```

```

        EditCustoKWH.SetFocus;
    end;
end;

end;

procedure TfrmDadosProjeto.EditRendimentoKeyDown(Sender: TObject;
var Key: Word; Shift: TShiftState);
begin
    if Key = VK_RETURN then
    begin
        try
            EditRendimento.Text := Format('%0.2f', [StrToFloat(EditRendimento.Text)]);
            EditNumNos.SetFocus;
        except
            on EConvertError do
            begin
                Application.MessageBox('Separador decimal inválido!',
                'Atenção', MB_ICONWARNING);
                //
                EditRendimento.SelectAll;
                EditRendimento.SetFocus;
            end;
        end;
    end;
end;

procedure TfrmDadosProjeto.EditNumNosKeyDown(Sender: TObject;
var Key: Word; Shift: TShiftState);
begin
    if Key = VK_RETURN then
    begin
        try
            EditNumNos.Text := Format('%0.0f', [StrToFloat(EditNumNos.Text)]);
            EditNumTrechos.SetFocus;
        except
            on EConvertError do
            begin
                Application.MessageBox('Valor inválido para este campo!',
                'Atenção', MB_ICONWARNING);
                //
                EditNumNos.SelectAll;
                EditNumNos.SetFocus;
            end;
        end;
    end;
end;

procedure TfrmDadosProjeto.EditNumTrechosKeyDown(Sender: TObject;
var Key: Word; Shift: TShiftState);
begin
    if Key = VK_RETURN then
    begin
        try
            EditNumTrechos.Text := Format('%0.0f', [StrToFloat(EditNumTrechos.Text)]);
            EditTaxaJuros.SetFocus;
        except
            on EConvertError do
            begin
                Application.MessageBox('Valor inválido para este campo!',
                'Atenção', MB_ICONWARNING);
                //
                EditNumTrechos.SelectAll;
                EditNumTrechos.SetFocus;
            end;
        end;
    end;
end;

procedure TfrmDadosProjeto.EditPHKeyDown(Sender: TObject; var Key: Word;
Shift: TShiftState);
begin
    if Key = VK_RETURN then
    begin
        try
            EditPH.Text := Format('%0.2f', [StrToFloat(EditPH.Text)]);
            EditCustoKWH.SetFocus;
        except
            on EConvertError do
            begin
                Application.MessageBox('Separador decimal inválido!',
                'Atenção', MB_ICONWARNING);
                //
                EditPH.SelectAll;
                EditPH.SetFocus;
            end;
        end;
    end;
end;

```



```

        end;
    end;
end;

procedure TfrmDadosProjeto.EditTaxaJurosKeyDown(Sender: TObject;
var Key: Word; Shift: TShiftState);
begin
    if Key = VK_RETURN then
    begin
        try
            EditTaxaJuros.Text := Format('%0.2n', [StrToFloat(EditTaxaJuros.Text)]);
            EditTaxaEnergia.SetFocus;
        except
            on EConvertError do
            begin
                Application.MessageBox('Valor inválido para este campo!',
                'Atenção', MB_ICONWARNING);
                //
                EditTaxaJuros.SelectAll;
                EditTaxaJuros.SetFocus;
            end;
        end;
    end;
end;

procedure TfrmDadosProjeto.EditTaxaEnergiaKeyDown(Sender: TObject;
var Key: Word; Shift: TShiftState);
begin
    if Key = VK_RETURN then
    begin
        try
            EditTaxaEnergia.Text := Format('%0.2n', [StrToFloat(EditTaxaEnergia.Text)]);
            EditK.SetFocus;
        except
            on EConvertError do
            begin
                Application.MessageBox('Valor inválido para este campo!',
                'Atenção', MB_ICONWARNING);
                //
                EditTaxaEnergia.SelectAll;
                EditTaxaEnergia.SetFocus;
            end;
        end;
    end;
end;

procedure TfrmDadosProjeto.cbColunaConcretoClick(Sender: TObject);
begin
    if cbColunaConcreto.Checked = False then
    begin
        //
        EditVolumeCaixa.Enabled := False;
        EditCustoConcreto.Enabled := False;
    end
    else
    begin
        //
        EditVolumeCaixa.Enabled := True;
        EditCustoConcreto.Enabled := True;
        //
        EditVolumeCaixa.SetFocus;
    end;
end;

procedure TfrmDadosProjeto.EditRugosidadeFoFoKeyDown(Sender: TObject;
var Key: Word; Shift: TShiftState);
begin
    if Key = VK_RETURN then
    begin
        try
            EditRugosidadeFoFo.Text := Format('%0.4f', [StrToFloat(EditRugosidadeFoFo.Text)]);
            EditCoeVarRug.SetFocus;
        except
            on EConvertError do
            begin
                Application.MessageBox('Separador decimal inválido!',
                'Atenção', MB_ICONWARNING);
                //
                EditRugosidadeFoFo.SelectAll;
                EditRugosidadeFoFo.SetFocus;
            end;
        end;
    end;
end;
end;

```

```

procedure TfrmDadosProjeto.EditPopulacaoInicialKeyDown(Sender: TObject;
var Key: Word; Shift: TShiftState);
begin
    if Key = VK_RETURN then
    begin
        try
            EditPopulacaoInicial.Text := Format('%0.0f', [StrToFloat(EditPopulacaoInicial.Text)]);
            EditAnoInicial.SetFocus;
        except
            on EConvertError do
            begin
                Application.MessageBox('Separador decimal inválido!',
                'Atenção', MB_ICONWARNING);
                //
                EditPopulacaoInicial.SelectAll;
                EditPopulacaoInicial.SetFocus;
            end;
        end;
    end;
end;

```

```

procedure TfrmDadosProjeto.EditAnoInicialKeyDown(Sender: TObject;
var Key: Word; Shift: TShiftState);
begin
    if Key = VK_RETURN then
    begin
        try
            StrToInt(EditAnoInicial.Text);
            EditHorizonte.SetFocus;
        except
            on EConvertError do
            begin
                Application.MessageBox('Separador decimal inválido!',
                'Atenção', MB_ICONWARNING);
                //
                EditAnoInicial.SelectAll;
                EditAnoInicial.SetFocus;
            end;
        end;
    end;
end;

```

```

procedure TfrmDadosProjeto.EditNomeProjetoKeyDown(Sender: TObject;
var Key: Word; Shift: TShiftState);
begin
    if Key = VK_RETURN then EditAltura.SetFocus;
end;

```

```

procedure TfrmDadosProjeto.EditHorizonteKeyDown(Sender: TObject;
var Key: Word; Shift: TShiftState);
begin
    if Key = VK_RETURN then
    begin
        try
            StrToInt(EditHorizonte.Text);
            EditPH.SetFocus;
        except
            on EConvertError do
            begin
                Application.MessageBox('Separador decimal inválido!',
                'Atenção', MB_ICONWARNING);
                //
                EditHorizonte.SelectAll;
                EditHorizonte.SetFocus;
            end;
        end;
    end;
end;

```

```

procedure TfrmDadosProjeto.EditDemandaKeyDown(Sender: TObject;
var Key: Word; Shift: TShiftState);
begin
    if Key = VK_RETURN then
    begin
        try
            EditDemanda.Text := Format('%0.2n', [StrToFloat(EditDemanda.Text)]);
            EditParamB.SetFocus;
        except
            on EConvertError do
            begin
                Application.MessageBox('Valor inválido para este campo!',
                'Atenção', MB_ICONWARNING);
                //
                EditDemanda.SelectAll;
            end;
        end;
    end;
end;

```

```

        EditDemanda.SetFocus;
    end;
end;
end;

procedure TfrmDadosProjeto.EditKKeyDown(Sender: TObject; var Key: Word;
  Shift: TShiftState);
begin
    if Key = VK_RETURN then
    begin
        try
            EditK.Text := Format('%0.2n', [StrToFloat(EditK.Text)]);
            EditK1.SetFocus;
        except
            on EConvertError do
            begin
                Application.MessageBox('Valor inválido para este campo!',
                  'Atenção', MB_ICONWARNING);
                //
                EditK.SelectAll;
                EditK.SetFocus;
            end;
        end;
    end;
end;

procedure TfrmDadosProjeto.EditK1KeyDown(Sender: TObject; var Key: Word;
  Shift: TShiftState);
begin
    if Key = VK_RETURN then
    begin
        try
            EditK1.Text := Format('%0.2n', [StrToFloat(EditK1.Text)]);
            EditK2.SetFocus;
        except
            on EConvertError do
            begin
                Application.MessageBox('Valor inválido para este campo!',
                  'Atenção', MB_ICONWARNING);
                //
                EditK1.SelectAll;
                EditK1.SetFocus;
            end;
        end;
    end;
end;

procedure TfrmDadosProjeto.EditK2KeyDown(Sender: TObject; var Key: Word;
  Shift: TShiftState);
begin
    if Key = VK_RETURN then
    begin
        try
            EditK2.Text := Format('%0.2n', [StrToFloat(EditK2.Text)]);
            EditDemanda.SetFocus;
        except
            on EConvertError do
            begin
                Application.MessageBox('Valor inválido para este campo!',
                  'Atenção', MB_ICONWARNING);
                //
                EditK2.SelectAll;
                EditK2.SetFocus;
            end;
        end;
    end;
end;

procedure TfrmDadosProjeto.FormShow(Sender: TObject);
var
    S: String;
    Codigo: Integer;
    Imagem: TBitmap;
begin
    if frmCalcularProjeto.Tag = 1 then
    begin
        frmCalcularProjeto.tblProjetos.Last;
        Codigo := StrToInt(frmCalcularProjeto.tblProjetosCodProjeto.Value);
        Codigo := Codigo + 1;
        //
        if Length(IntToStr(Codigo)) = 1 then S := '00000' + IntToStr(Codigo);
        if Length(IntToStr(Codigo)) = 2 then S := '0000' + IntToStr(Codigo);
        if Length(IntToStr(Codigo)) = 3 then S := '000' + IntToStr(Codigo);
        if Length(IntToStr(Codigo)) = 4 then S := '00' + IntToStr(Codigo);
    end;
end;

```

```

if Length(IntToStr(Codigo)) = 5 then S := '0' + IntToStr(Codigo);
if Length(IntToStr(Codigo)) = 6 then S := " " + IntToStr(Codigo);
//
frmCalcularProjeto.tblProjetos.Append;
frmCalcularProjeto.tblProjetosCaixaConcreto.Value := False;
frmCalcularProjeto.tblProjetosCodProjeto.Value := S;
//
EditCodProjeto.Text := S;
end
else
begin
EditCodProjeto.Text := frmCalcularProjeto.tblProjetosCodProjeto.Value;
EditNomeProjeto.Text := frmCalcularProjeto.tblProjetosDescricao.Value;
EditAltura.Text := Format('%0.1f', [frmCalcularProjeto.tblProjetosCotaPiezometrica.Value]);
EditCotaReservatorio.Text := Format('%0.1f', [frmCalcularProjeto.tblProjetosCotaReservatorio.Value]);
EditRugosidadePVC.Text := Format('%0.4f', [frmCalcularProjeto.tblProjetosRugInicialPVC.Value]);
EditDiametroMaterial.Text := Format('%0.0f', [frmCalcularProjeto.tblProjetosDiametroMaterial.Value]);
EditRugosidadeFoFo.Text := Format('%0.4f', [frmCalcularProjeto.tblProjetosRugInicialFoFo.Value]);
EditCoefVarRug.Text := Format('%0.4f', [frmCalcularProjeto.tblProjetosCoefVarRugPVC.Value]);
EditPopulacaoInicial.Text := Format('%0.0f', [frmCalcularProjeto.tblProjetosPopulacaoInicial.Value]);
EditAnoInicial.Text := IntToStr(frmCalcularProjeto.tblProjetosAnoInicial.Value);
EditHorizonte.Text := IntToStr(frmCalcularProjeto.tblProjetosHorizonte.Value);
EditPH.Text := Format('%0.2f', [frmCalcularProjeto.tblProjetosPH.Value]);
EditCustoKWH.Text := Format('%0.3f', [frmCalcularProjeto.tblProjetosCustoKWH.Value]);
EditRendimento.Text := Format('%0.2f', [frmCalcularProjeto.tblProjetosRendimento.Value]);
EditNumNos.Text := IntToStr(frmCalcularProjeto.tblProjetosNumNos.Value);
EditNumTrechos.Text := IntToStr(frmCalcularProjeto.tblProjetosNumTrechos.Value);
EditTaxaJuros.Text := Format('%0.2n', [frmCalcularProjeto.tblProjetosTaxa.Value]);
EditTaxaEnergia.Text := Format('%0.2n', [frmCalcularProjeto.tblProjetosTaxaEnergia.Value]);
EditK.Text := Format('%0.2n', [frmCalcularProjeto.tblProjetosK.Value]);
EditK1.Text := Format('%0.2n', [frmCalcularProjeto.tblProjetosK1.Value]);
EditK2.Text := Format('%0.2n', [frmCalcularProjeto.tblProjetosK2.Value]);
EditDemanda.Text := Format('%0.2n', [frmCalcularProjeto.tblProjetosDemandaHabitante.Value]);
EditParamA.Text := Format('%0.2f', [frmCalcularProjeto.tblProjetosParametroPopA.Value]);
EditParamB.Text := Format('%0.0f', [frmCalcularProjeto.tblProjetosParametroPopB.Value]);
cbColunaConcreto.Checked := frmCalcularProjeto.tblProjetosCaixaConcreto.Value;
EditVolumeCaixa.Text := Format('%0.2n', [frmCalcularProjeto.tblProjetosVolumeCaixaConcreto.Value]);
EditCustoConcreto.Text := Format('%0.2f', [frmCalcularProjeto.tblProjetosCustoConcreto.Value]);
//
Imagem := TBitmap.Create;
if frmCalcularProjeto.tblProjetosPerdaCarga.Value = 'HW' then
begin
rbHazenWilliams.Checked := True;
Imagem.LoadFromFile(frmPrincipal.Path + 'Imagens\Hazen-Williams.bmp');
end;
if frmCalcularProjeto.tblProjetosPerdaCarga.Value = 'DW' then
begin
rbDarcy.Checked := True;
Imagem.LoadFromFile(frmPrincipal.Path + 'Imagens\Darcy-Weissbach.bmp');
end;
imgEquacao.Picture.Bitmap := Imagem;
//
Imagem.Destroy;
//
EditDemanda.SetFocus;
end;
end;

procedure TfrmDadosProjeto.EditVolumeCaixaKeyDown(Sender: TObject;
var Key: Word; Shift: TShiftState);
begin
if Key = VK_RETURN then
begin
try
EditVolumeCaixa.Text := Format('%0.2n', [StrToFloat(EditVolumeCaixa.Text)]);
EditCustoConcreto.SetFocus;
except
on EConvertError do
begin
Application.MessageBox('Valor inválido para este campo!',
'Atenção', MB_ICONWARNING);
//
EditVolumeCaixa.SelectAll;
EditVolumeCaixa.SetFocus;
end;
end;
end;

end;

procedure TfrmDadosProjeto.EditCustoConcretoKeyDown(Sender: TObject;
var Key: Word; Shift: TShiftState);
begin
if Key = VK_RETURN then
begin
try

```

```

        EditCustoConcreto.Text := Format('%0.2f', [StrToFloat(EditCustoConcreto.Text)]);
        butGravar.SetFocus;
    except
        on EConvertError do
            begin
                Application.MessageBox('Valor inválido para este campo!',
                    'Atenção', MB_ICONWARNING);
                //
                EditCustoConcreto.SelectAll;
                EditCustoConcreto.SetFocus;
            end;
        end;
    end;
end;

procedure TfrmDadosProjeto.EditDiametroMaterialKeyDown(Sender: TObject;
    var Key: Word; Shift: TShiftState);
begin
    if Key = VK_RETURN then
        begin
            try
                EditDiametroMaterial.Text := Format('%0.4f', [StrToFloat(EditDiametroMaterial.Text)]);
                EditRugosidadeFoFo.SetFocus;
            except
                on EConvertError do
                    begin
                        Application.MessageBox('Separador decimal inválido!',
                            'Atenção', MB_ICONWARNING);
                        //
                        EditDiametroMaterial.SelectAll;
                        EditDiametroMaterial.SetFocus;
                    end;
                end;
            end;
        end;
end;

procedure TfrmDadosProjeto.EditCoefVarRugKeyDown(Sender: TObject;
    var Key: Word; Shift: TShiftState);
begin
    if Key = VK_RETURN then
        begin
            try
                EditCoefVarRug.Text := Format('%0.4f', [StrToFloat(EditCoefVarRug.Text)]);
                EditPopulacaoInicial.SetFocus;
            except
                on EConvertError do
                    begin
                        Application.MessageBox('Separador decimal inválido!',
                            'Atenção', MB_ICONWARNING);
                        //
                        EditCoefVarRug.SelectAll;
                        EditCoefVarRug.SetFocus;
                    end;
                end;
            end;
        end;
end;

procedure TfrmDadosProjeto.EditParamAKeyDown(Sender: TObject;
    var Key: Word; Shift: TShiftState);
begin
    if Key = VK_RETURN then
        begin
            try
                EditParamA.Text := Format('%0.2f', [StrToFloat(EditParamA.Text)]);
                if rbHazenWilliams.Checked = True then rbHazenWilliams.SetFocus;
                if rbDarcy.Checked = True then rbDarcy.SetFocus;
            except
                on EConvertError do
                    begin
                        Application.MessageBox('Valor inválido para este campo!',
                            'Atenção', MB_ICONWARNING);
                        //
                        EditParamA.SelectAll;
                        EditParamA.SetFocus;
                    end;
                end;
            end;
        end;
end;

procedure TfrmDadosProjeto.EditParamBKeyDown(Sender: TObject;
    var Key: Word; Shift: TShiftState);
begin
    if Key = VK_RETURN then
        begin

```

```

        try
            EditParamB.Text := Format('%0.0f', [StrToFloat(EditParamB.Text)]);
            EditParamA.SetFocus;
        except
            on EConvertError do
                begin
                    Application.MessageBox("Valor inválido para este campo!",
                        'Atenção', MB_ICONWARNING);
                    //
                    EditParamB.SelectAll;
                    EditParamB.SetFocus;
                end;
            end;
        end;
    end;
end;
end.

```

A figura abaixo refere-se ao módulo de cadastro dos trechos de tubulação. Na página seguinte, segue o código fonte deste módulo.

Dados dos Trechos - [Projeto-000002]

Seleção dos Trechos da Tubulação

Trecho Vazão Requerida Comprimento do Trecho

Cod. Projeto	Trecho	Vazão Requerida (l/s)	Comprimento (m)
000002	R-1	420,43	2540,0
000002	1-2	188,10	1230,0
000002	2-3	140,32	1430,0
000002	3-4	60,00	1300,0
000002	1-4	85,00	1490,0
000002	1-5	147,33	1210,0
000002	5-6	103,89	1460,0
000002	6-4	63,60	1190,0

```

unit Trechos;

interface

uses
  Windows, Messages, SysUtils, Classes, Graphics, Controls, Forms, Dialogs,
  StdCtrls, Buttons, Db, DBTables, Grids, DBGrids, ExtCtrls, Math;

type
  TfrmTrechos = class(TForm)
    GroupBox3: TGroupBox;
    Label3: TLabel;
    Label1: TLabel;
    Label4: TLabel;
    EditVazaoRequerida: TEdit;
    EditTrecho: TEdit;
    EditComprimento: TEdit;
    DBGrid1: TDBGrid;
    sqlTrechos: TQuery;
    dstsqlTrechos: TDataSource;
    sqlTrechosRegistros: TIntegerField;
    sqlTrechosCodProjeto: TStringField;
    sqlTrechosTrecho: TStringField;
    sqlTrechosVazaoCalculada: TFloatField;
    sqlTrechosComprimento: TFloatField;
    tblTrechos: TTable;
    tblTrechosRegistros: TAutoIncField;
    tblTrechosCodProjeto: TStringField;
    tblTrechosTrecho: TStringField;
    tblTrechosVazaoCalculada: TFloatField;
    tblTrechosComprimento: TFloatField;
    sqlTrechosPerdaCarga: TFloatField;
    tblTrechosPerdaCarga: TFloatField;
    tblProjetos: TTable;
    tblTrechosDiametro: TFloatField;
    tblTrechosCustoUnitario: TFloatField;
    tblTrechosCustoTotal: TFloatField;
    Panel1: TPanel;
    butAdicionarTrecho: TBitBtn;
    butRemoverTrecho: TBitBtn;
    butFechar: TBitBtn;
    tblProjetosCodProjeto: TStringField;
    tblProjetosDescricao: TStringField;
    tblProjetosCotaReservatorio: TFloatField;
    tblProjetosCotaPiezometrica: TFloatField;
    tblProjetosPerdaCarga: TStringField;
    tblProjetosRugInicialPVC: TFloatField;
    tblProjetosRugInicialFoFo: TFloatField;
    tblProjetosCustoKWh: TFloatField;
    tblProjetosRendimento: TFloatField;
    tblProjetosNumTrechos: TIntegerField;
    tblProjetosNumNos: TIntegerField;
    tblProjetosPH: TFloatField;
    tblProjetosHorizonte: TIntegerField;
    tblProjetosAnoInicial: TIntegerField;
    tblProjetosPopulacaoInicial: TFloatField;
    tblProjetosDemandaHabitante: TFloatField;
    tblProjetosK1: TFloatField;
    tblProjetosK2: TFloatField;
    tblProjetosK: TFloatField;
    tblProjetosTaxa: TFloatField;
    tblProjetosTaxaEnergia: TFloatField;
    tblProjetosCaixaConcreto: TBooleanField;
    tblProjetosVolumeCaixaConcreto: TFloatField;
    tblProjetosCustoConcreto: TFloatField;
    tblProjetosCoeVarRugPVC: TFloatField;
    tblProjetosDiametroMaterial: TFloatField;
    procedure FormCreate(Sender: TObject);
    procedure EditTrechoKeyDown(Sender: TObject; var Key: Word;
      Shift: TShiftState);
    procedure EditVazaoRequeridaKeyDown(Sender: TObject; var Key: Word;
      Shift: TShiftState);
    procedure EditComprimentoKeyDown(Sender: TObject; var Key: Word;
      Shift: TShiftState);
    procedure butAdicionarTrechoClick(Sender: TObject);
    procedure DBGrid1DblClick(Sender: TObject);
    procedure butRemoverTrechoClick(Sender: TObject);
    procedure FormClose(Sender: TObject; var Action: TCloseAction);
    procedure butFecharClick(Sender: TObject);
  private
    { Private declarations }
  public
end;

```



```

var
  frmTrechos: TfrmTrechos;

implementation

uses
  Principal, CalcularProjeto;

{$R *.DFM}

procedure TfrmTrechos.FormCreate(Sender: TObject);
begin
  with sqlTrechos do
  begin
    Close;
    SQL.Clear;
    SQL.Add('SELECT * FROM TRECHOS WHERE CODPROJETO=' + frmPrincipal.CodProjeto + ' ORDER BY REGISTROS');
    Prepare;
    Open;
    Last;
  end;
end;

procedure TfrmTrechos.EditTrechoKeyDown(Sender: TObject; var Key: Word;
  Shift: TShiftState);
begin
  if Key = VK_RETURN then EditVazaoRequerida.SetFocus;
end;

procedure TfrmTrechos.EditVazaoRequeridaKeyDown(Sender: TObject;
  var Key: Word; Shift: TShiftState);
begin
  if Key = VK_RETURN then
  begin
    try
      EditVazaoRequerida.Text := Format('%0.2f', [StrToFloat(EditVazaoRequerida.Text)]);
      EditComprimento.SetFocus;
    except
      on EConvertError do
      begin
        Application.MessageBox('Separador decimal inválido!',
          'Atenção', MB_ICONWARNING);
        //
        EditVazaoRequerida.SelectAll;
        EditVazaoRequerida.SetFocus;
      end;
    end;
  end;
end;

procedure TfrmTrechos.EditComprimentoKeyDown(Sender: TObject;
  var Key: Word; Shift: TShiftState);
begin
  if Key = VK_RETURN then
  begin
    try
      EditComprimento.Text := Format('%0.2f', [StrToFloat(EditComprimento.Text)]);
      butAdicionarTrecho.SetFocus;
    except
      on EConvertError do
      begin
        Application.MessageBox('Separador decimal inválido!',
          'Atenção', MB_ICONWARNING);
        //
        EditComprimento.SelectAll;
        EditComprimento.SetFocus;
      end;
    end;
  end;
end;

procedure TfrmTrechos.butAdicionarTrechoClick(Sender: TObject);
var
  D: Real;
  CustoUnitario: Real;
begin
  //
  tblProjetos.Open;
  tblTrechos.Open;
  //
  if tblProjetos.FindKey([frmPrincipal.CodProjeto]) then
  begin
    //
    tblTrechos.IndexName := 'Trecho';
    //
  end;
end;

```

```

tblTrechos.Filter := 'CodProjeto=' + frmPrincipal.CodProjeto + '';
tblTrechos.Filtered := True;
//
if DBGGrid1.Tag = 0 then
begin
//
if tblTrechos.FindKey([EditTrecho.Text]) then
begin
Application.MessageBox('Este trecho já existe!',
'Atenção', MB_ICONWARNING);
//
EditTrecho.SelectAll;
EditTrecho.SetFocus;
Exit;
end
else
begin
tblTrechos.Append;
tblTrechosCodProjeto.Value := frmPrincipal.CodProjeto;
tblTrechosTrecho.Value := EditTrecho.Text;
tblTrechosVazaoCalculada.Value := StrToFloat(EditVazaoRequerida.Text);
tblTrechosComprimento.Value := StrToFloat(EditComprimento.Text);
D := Sqrt((0.004*StrToFloat(EditVazaoRequerida.Text))/(3.14));
tblTrechosDiametro.Value := D*1000;
CustoUnitario := 0.0129 * Power(D*1000, 1.6165);
tblTrechosCustoUnitario.Value := CustoUnitario;
tblTrechosCustoTotal.Value := CustoUnitario * StrToFloat(EditComprimento.Text);
//
if tblProjetosPerdaCarga.Value = 'HW' then
tblTrechosPerdaCarga.Value :=
frmPrincipal.PerdadeCargaHW(StrToFloat(EditVazaoRequerida.Text), StrToFloat(EditComprimento.Text), D);
if tblProjetosPerdaCarga.Value = 'DW' then
tblTrechosPerdaCarga.Value :=
frmPrincipal.PerdadeCargaDW(1.007E-6, D, 1, tblProjetosRugInicialPVC.Value,
StrToFloat(EditComprimento.Text));
tblTrechos.Post;
end;
end
else
begin
if tblTrechos.FindKey([EditTrecho.Text]) then
begin
tblTrechos.Edit;
tblTrechosCodProjeto.Value := frmPrincipal.CodProjeto;
tblTrechosTrecho.Value := EditTrecho.Text;
tblTrechosVazaoCalculada.Value := StrToFloat(EditVazaoRequerida.Text);
tblTrechosComprimento.Value := StrToFloat(EditComprimento.Text);
D := Sqrt((0.004*StrToFloat(EditVazaoRequerida.Text))/(3.14));
tblTrechosDiametro.Value := D*1000;
CustoUnitario := 0.0129 * frmPrincipal.Potencia(D*1000,
1.6165);
tblTrechosCustoUnitario.Value := CustoUnitario;
tblTrechosCustoTotal.Value := CustoUnitario * StrToFloat(EditComprimento.Text);
//
if tblProjetosPerdaCarga.Value = 'HW' then
tblTrechosPerdaCarga.Value :=
frmPrincipal.PerdadeCargaHW(StrToFloat(EditVazaoRequerida.Text), StrToFloat(EditComprimento.Text), D);
if tblProjetosPerdaCarga.Value = 'DW' then
tblTrechosPerdaCarga.Value :=
frmPrincipal.PerdadeCargaDW(1.007E-6, D, 1.00, tblProjetosRugInicialPVC.Value,
StrToFloat(EditComprimento.Text));
tblTrechos.Post;
end;
end;
end
else
begin
Application.MessageBox('Os dados do projeto não foram encontrados.',
'Erro', MB_ICONEXCLAMATION);
//
Exit;
end;
//
DBGGrid1.Tag := 0;
//
EditTrecho.ReadOnly := False;
//
tblTrechos.IndexName := '';
//
tblTrechos.Close;
tblProjetos.Close;
//
with sqlTrechos do
begin
Close;

```

```

SQL.Clear;
SQL.Add('SELECT * FROM TRECHOS WHERE CODPROJETO = "" +
frmPrincipal.CodProjeto + "" ORDER BY REGISTROS');
Prepare;
Open;
Last;
end;
//
EditTrecho.Text := "";
EditVazaoRequerida.Text := "";
EditComprimento.Text := "";
//
EditTrecho.SetFocus;
end;

procedure TfrmTrehos.DBGrid1DbClick(Sender: TObject);
begin
    DBGrid1.Tag := 1;
    //
    EditTrecho.Text := sqlTrehosTrecho.Value;
    EditVazaoRequerida.Text := Format('%0.2f', [sqlTrehosVazaoCalculada.Value]);
    EditComprimento.Text := Format('%0.2f', [sqlTrehosComprimento.Value]);
    //
    EditTrecho.ReadOnly := True;
    //
    EditVazaoRequerida.SelectAll;
    EditVazaoRequerida.SetFocus;
end;

procedure TfrmTrehos.butRemoverTrechoClick(Sender: TObject);
begin
    //
    tblTrehos.Open;
    //
    tblTrehos.Filter := 'CodProjeto="" + frmPrincipal.CodProjeto + ""';
    tblTrehos.Filtered := True;
    //
    tblTrehos.IndexName := 'Trecho';
    if tblTrehos.FindKey([sqlTrehosTrecho.Value]) then
    begin
        if Application.MessageBox('Tem certeza que deseja excluir este trecho?',
        'Confirmação', MB_YESNO + MB_ICONQUESTION) = ID_YES then
        begin
            tblTrehos.Delete;
            //
            with sqlTrehos do
            begin
                Close;
                SQL.Clear;
                SQL.Add('SELECT * FROM TRECHOS WHERE CODPROJETO="" + frmPrincipal.CodProjeto + "" ORDER BY
REGISTROS');
                Prepare;
                Open;
                end;
            end;
            //
            tblTrehos.Close;
        end;
    end;

procedure TfrmTrehos.FormClose(Sender: TObject; var Action: TCloseAction);
begin
    frmCalcularProjeto.Enabled := True;
    frmCalcularProjeto.OnShow(Self);
    frmPrincipal.CodProjeto := "";
end;

procedure TfrmTrehos.butFecharClick(Sender: TObject);
begin
    Self.Close;
end;
end.

```

A figura abaixo refere-se ao módulo de cadastro dos nós da rede de tubulação. Na página seguinte, segue o código fonte deste módulo.

Dados dos Nós

Determinação dos Nós da Tubulação

Nó Vazão de Demanda Cota do Nó

1 0,00 6,00

Equação da Continuidade(Ex.:B5-B6-B9-B10)

B3-B4-B7-B8

Equação da Altura Piezométrica(Ex.:C12-G3)

C12-G3

Gravar Editar Remover Fechar

Código	Nó	Demanda (l/s)	Cota (m)	Eq. da Continuidade	Eq. da Altura Píez.
000002	6	40,29	4,00	B9-B10-40,29	B21-G9
000002	5	43,44	4,50	B8-B9-43,44	B17-G8
000002	4	208,60	6,00	B6-B7-B10-208,6	B17-G7
000002	3	80,32	5,50	B5-B6-80,32	B18-G5
000002	2	47,78	5,50	B4-B5-47,78	B17-G4
000002	1	0,00	6,00	B3-B4-B7-B8	C12-G3

```

unit Nos;

interface

uses
  Windows, Messages, SysUtils, Classes, Graphics, Controls, Forms, Dialogs,
  StdCtrls, Buttons, Db, DBTables, Grids, DBGrids, ExtCtrls;

type
  TfrmNos = class(TForm)
    GroupBox2: TGroupBox;
    Label13: TLabel;
    Label15: TLabel;
    Label14: TLabel;
    EditNo: TEdit;
    EditCotaNo: TEdit;
    EditDemandaNo: TEdit;
    DBGrid1: TDBGrid;
    dstsqiNos: TDataSource;
    sqiNos: TQuery;
    sqiNosRegistros: TIntegerField;
    sqiNosCodProjeto: TStringField;
    sqiNosNo: TStringField;
    sqiNosVazao: TFloatField;
    sqiNosCota: TFloatField;
    butFechar: TBitBtn;
    EditEqContinuidade: TEdit;
    Label1: TLabel;
    sqiNosEqContinuidade: TStringField;
    butAdicionarNo: TBitBtn;
    butRemoverNo: TBitBtn;
    EditEqAlturaPiezometrica: TEdit;
    Label2: TLabel;
    sqiNosEqAlturaPiezometrica: TStringField;
    butEditar: TBitBtn;
    tblNos: TTable;
    tblNosRegistros: TAutoIncField;
    tblNosCodProjeto: TStringField;
    tblNosNo: TStringField;
    tblNosVazao: TFloatField;
    tblNosCota: TFloatField;
    tblNosEqContinuidade: TStringField;
    tblNosEqAlturaPiezometrica: TStringField;
    procedure butAdicionarNoClick(Sender: TObject);
    procedure FormCreate(Sender: TObject);
    procedure EditNoKeyDown(Sender: TObject; var Key: Word;
      Shift: TShiftState);
    procedure EditDemandaNoKeyDown(Sender: TObject; var Key: Word;
      Shift: TShiftState);
    procedure EditCotaNoKeyDown(Sender: TObject; var Key: Word;
      Shift: TShiftState);
    procedure DBGrid1DblClick(Sender: TObject);
    procedure butRemoverNoClick(Sender: TObject);
    procedure FormClose(Sender: TObject; var Action: TCloseAction);
    procedure butFecharClick(Sender: TObject);
    procedure EditEqContinuidadeKeyDown(Sender: TObject; var Key: Word;
      Shift: TShiftState);
    procedure EditEqContinuidadeKeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
    procedure EditEqAlturaPiezometricaKeyPress(Sender: TObject;
      var Key: Char);
    procedure EditEqAlturaPiezometricaKeyDown(Sender: TObject;
      var Key: Word; Shift: TShiftState);
  private
    { Private declarations }
  public

  end;

var
  frmNos: TfrmNos;

implementation

uses
  Principal, CalcularProjeto;

{$R *.DFM}

procedure TfrmNos.butAdicionarNoClick(Sender: TObject);
begin
  //
  if EditDemandaNo.Text = '' then
  begin
    Application.MessageBox('Digite a demanda no nó.',
      'Atenção', MB_ICONWARNING);
  end;
end;

```

```

    EditDemandaNo.SelectAll;
    Exit;
end;
if EditCotaNo.Text = "" then
begin
    Application.MessageBox('Digite a cota do nó.',
    'Atenção', MB_ICONWARNING);
    EditCotaNo.SelectAll;
    Exit;
end;
if EditEqContinuidade.Text = "" then
begin
    Application.MessageBox('Digite a equação da continuidade.',
    'Atenção', MB_ICONWARNING);
    EditEqContinuidade.SelectAll;
    Exit;
end;
if EditEqAlturaPiezometrica.Text = "" then
begin
    Application.MessageBox('Digite a equação da altura piezométrica.',
    'Atenção', MB_ICONWARNING);
    EditEqAlturaPiezometrica.SelectAll;
    Exit;
end;
//
    tbiNos.Open;
    tbiNos.IndexName := 'No';
    if DBGrid1.Tag = 0 then
    begin
        //
        tbiNos.Filter := 'CodProjeto=' + frmPrincipal.CodProjeto + '';
        tbiNos.Filtered := True;
        //
        if tbiNos.FindKey([EditNo.Text]) then
        begin
            Application.MessageBox('Este nó já existe!',
            'Atenção', MB_ICONWARNING);
            //
            EditNo.SelectAll;
            EditNo.SetFocus;
        end
        else
        begin
            tbiNos.Append;
            tbiNosCodProjeto.Value := frmPrincipal.CodProjeto;
            tbiNosNo.Value := EditNo.Text;
            tbiNosVazao.Value := StrToFloat(EditDemandaNo.Text);
            tbiNosCota.Value := StrToFloat(EditCotaNo.Text);
            tbiNosEqContinuidade.Value := EditEqContinuidade.Text;
            tbiNosEqAlturaPiezometrica.Value := EditEqAlturaPiezometrica.Text;
            tbiNos.Post;
        end;
    end
    else
    begin
        if tbiNos.FindKey([EditNo.Text]) then
        begin
            tbiNos.Edit;
            tbiNosCodProjeto.Value := frmPrincipal.CodProjeto;
            tbiNosVazao.Value := StrToFloat(EditDemandaNo.Text);
            tbiNosCota.Value := StrToFloat(EditCotaNo.Text);
            tbiNosEqContinuidade.Value := EditEqContinuidade.Text;
            tbiNosEqAlturaPiezometrica.Value := EditEqAlturaPiezometrica.Text;
            tbiNos.Post;
        end;
    end;
    //
    DBGrid1.Tag := 0;
    DBGrid1.Enabled := True;
    //
    EditNo.ReadOnly := False;
end;
//
tbiNos.IndexName := '';
tbiNos.Close;
//
with sqlNos do
begin
    Close;
    SQL.Clear;
    SQL.Add('SELECT * FROM NOS WHERE CODPROJETO = ' +
    frmPrincipal.CodProjeto + ' ORDER BY NO ASC');
    Prepare;
    Open;
    Last;
end;

```

```

end;
//
EditNo.Text := "";
EditDemandaNo.Text := "";
EditCotaNo.Text := "";
EditEqContinuidade.Text := "";
EditEqAlturaPiezometrica.Text := "";
//
butAdicionarNo.Caption := '&Adicionar';
//
EditNo.SetFocus;
end;

procedure TfrmNos.FormCreate(Sender: TObject);
begin
    with sqlNos do
    begin
        Close;
        SQL.Clear;
        SQL.Add('SELECT * FROM NOS WHERE CODPROJETO="" +
        frmPrincipal.CodProjeto + "" ORDER BY NO ASC');
        Prepare;
        Open;
        Last;
    end;
end;

procedure TfrmNos.EditNoKeyDown(Sender: TObject; var Key: Word;
Shift: TShiftState);
begin
    if Key = VK_RETURN then EditDemandaNo.SetFocus;
end;

procedure TfrmNos.EditDemandaNoKeyDown(Sender: TObject; var Key: Word;
Shift: TShiftState);
begin
    if Key = VK_RETURN then
    begin
        try
            EditDemandaNo.Text := Format('%0.2f', [StrToFloat(EditDemandaNo.Text)]);
            EditCotaNo.SetFocus;
        except
            on EConvertError do
            begin
                Application.MessageBox('Separador decimal inválido!',
                'Atenção', MB_ICONWARNING);
                //
                EditDemandaNo.SelectAll;
                EditDemandaNo.SetFocus;
            end;
        end;
    end;
end;

procedure TfrmNos.EditCotaNoKeyDown(Sender: TObject; var Key: Word;
Shift: TShiftState);
begin
    if Key = VK_RETURN then
    begin
        try
            EditCotaNo.Text := Format('%0.2f', [StrToFloat(EditCotaNo.Text)]);
            EditEqContinuidade.SetFocus;
        except
            on EConvertError do
            begin
                Application.MessageBox('Separador decimal inválido!',
                'Atenção', MB_ICONWARNING);
                //
                EditDemandaNo.SelectAll;
                EditDemandaNo.SetFocus;
            end;
        end;
    end;
end;

procedure TfrmNos.DBGrid1DbClick(Sender: TObject);
begin
    //
    DBGrid1.Tag := 1;
    DBGrid1.Enabled := False;
    //
    butAdicionarNo.Caption := '&Gravar';
    //
    EditNo.Text := sqlNosNo.Value;
    EditDemandaNo.Text := Format('%0.2f', [sqlNosVazao.Value]);

```

```

EditCotaNo.Text := Format('%0.2f', [sqlNosCota.Value]);
EditEqContinuidade.Text := sqlNosEqContinuidade.Value;
EditEqAlturaPiezometrica.Text := sqlNosEqAlturaPiezometrica.Value;
//
EditNo.ReadOnly := True;
//
EditDemandaNo.SelectAll;
EditDemandaNo.SetFocus;
end;

procedure TfrmNos.butRemoverNoClick(Sender: TObject);
begin
    //
    tblNos.Open;
    //
    tblNos.Filter := 'CodProjeto=' + frmPrincipal.CodProjeto + '';
    tblNos.Filtered := True;
    //
    tblNos.IndexName := 'No';
    if tblNos.FindKey([sqlNosNo.Value]) then
    begin
        if Application.MessageBox('Tem certeza que deseja excluir este nó?',
        'Confirmação', MB_YESNO + MB_ICONQUESTION) = ID_YES then
        begin
            tblNos.Delete;
            //
            with sqlNos do
            begin
                Close;
                SQL.Clear;
                SQL.Add('SELECT * FROM NOS WHERE CODPROJETO=' + frmPrincipal.CodProjeto + '' ORDER BY
                REGISTROS');
                Prepare;
                Open;
            end;
        end;
    end;
    //
    tblNos.Close;
end;

procedure TfrmNos.FormClose(Sender: TObject; var Action: TCloseAction);
begin
    frmCalcularProjeto.Enabled := True;
    frmCalcularProjeto.OnShow(Self);
    frmPrincipal.CodProjeto := '';
end;

procedure TfrmNos.butFecharClick(Sender: TObject);
begin
    Self.Close;
end;

procedure TfrmNos.EditEqContinuidadeKeyDown(Sender: TObject; var Key: Word;
Shift: TShiftState);
begin
    if Key = VK_RETURN then EditEqAlturaPiezometrica.SetFocus;
end;

procedure TfrmNos.EditEqContinuidadeKeyPress(Sender: TObject;
var Key: Char);
begin
    case Key of
        'A':
        begin
            Application.MessageBox('As letras da planilha que podem ser digitadas são: "B" e "C"',
            'Atenção', MB_ICONWARNING);
            EditEqContinuidade.SetFocus;
        end;
        'a':
        begin
            Application.MessageBox('As letras da planilha que podem ser digitadas são: "B" e "C"',
            'Atenção', MB_ICONWARNING);
            EditEqContinuidade.SetFocus;
        end;
        'C'..'Z':
        begin
            Application.MessageBox('As letras da planilha que podem ser digitadas são: "B" e "C"',
            'Atenção', MB_ICONWARNING);
            EditEqContinuidade.SetFocus;
        end;
        'c'..'z':
        begin
            Application.MessageBox('As letras da planilha que podem ser digitadas são: "B" e "C"',
            'Atenção', MB_ICONWARNING);
        end;
    end;
end;

```



```

    EditEqContinuidade.SetFocus;
end;
';
begin
    Application.MessageBox('O caractere separador decimal deve ser a vírgula ",".',
        'Atenção', MB_ICONWARNING);
    EditEqContinuidade.SetFocus;
end;
end;

end;

procedure TfrmNos.EditEqAlturaPiezometricaKeyPress(Sender: TObject;
    var Key: Char);
begin
    case Key of
        'A':
            begin
                Application.MessageBox('As ledras da planilha que podem ser digitadas são: "C" e "G".',
                    'Atenção', MB_ICONWARNING);
                EditEqAlturaPiezometrica.SetFocus;
            end;
        'a':
            begin
                Application.MessageBox('As ledras da planilha que podem ser digitadas são: "C" e "G".',
                    'Atenção', MB_ICONWARNING);
                EditEqAlturaPiezometrica.SetFocus;
            end;
        'D'..'F':
            begin
                Application.MessageBox('As ledras da planilha que podem ser digitadas são: "C" e "G".',
                    'Atenção', MB_ICONWARNING);
                EditEqAlturaPiezometrica.SetFocus;
            end;
        'd'..'f':
            begin
                Application.MessageBox('As ledras da planilha que podem ser digitadas são: "C" e "G".',
                    'Atenção', MB_ICONWARNING);
                EditEqAlturaPiezometrica.SetFocus;
            end;
        'H'..'Z':
            begin
                Application.MessageBox('As ledras da planilha que podem ser digitadas são: "C" e "G".',
                    'Atenção', MB_ICONWARNING);
                EditEqAlturaPiezometrica.SetFocus;
            end;
        'h'..'z':
            begin
                Application.MessageBox('As ledras da planilha que podem ser digitadas são: "C" e "G".',
                    'Atenção', MB_ICONWARNING);
                EditEqAlturaPiezometrica.SetFocus;
            end;
        ',':
            begin
                Application.MessageBox('Neste equação não deve existir sepadores decimais ou espaços vazios.',
                    'Atenção', MB_ICONWARNING);
                EditEqContinuidade.SetFocus;
            end;
        '.':
            begin
                Application.MessageBox('Neste equação não deve existir sepadores decimais ou espaços vazios.',
                    'Atenção', MB_ICONWARNING);
                EditEqContinuidade.SetFocus;
            end;
    end;
end;

procedure TfrmNos.EditEqAlturaPiezometricaKeyDown(Sender: TObject;
    var Key: Word; Shift: TShiftState);
begin
    if Key = VK_RETURN then butAdicionarNo.SetFocus;
end;

end;

```

A figura abaixo refere-se ao módulo de cadastro da tabela de diâmetros comerciais da tubulação. Na página seguinte, segue o código fonte deste módulo.

Tabela de Diâmetros Comerciais Internos

Novo Excluir Fechar

Dados do Tubo

Diâmetro Nominal Diâmetro Interno Custo Unitário/Metro

Diametro Nominal	Diametro Interno	Custo Unit./Metro
50	53,4	R\$ 29,44
75	75,6	R\$ 36,50
100	108,4	R\$ 45,33
150	156,4	R\$ 60,69
200	204,2	R\$ 86,40
250	252,0	R\$ 118,95
300	299,8	R\$ 154,45
400	432,0	R\$ 242,69
500	553,0	R\$ 358,06

```

unit Diametros;

interface

uses
  Windows, Messages, SysUtils, Classes, Graphics, Controls, Forms, Dialogs,
  Db, DBTables, Grids, DBGrids, StdCtrls, Buttons, ExtCtrls, DBCtrls, Variants;

type
  TfrmDiametros = class(TForm)
    DBGrid1: TDBGrid;
    tblDiametros: TTable;
    dstsqlDiametros: TDataSource;
    tblDiametrosRegistros: TAutoIncField;
    tblDiametrosDiametroExterno: TIntegerField;
    tblDiametrosDiametroInterno: TFloatField;
    tblDiametrosCusto: TFloatField;
    tblDiametrosCodProjeto: TStringField;
    Panel1: TPanel;
    butNovo: TBitBtn;
    butExcluir: TBitBtn;
    GroupBox1: TGroupBox;
    EditDiametroNominal: TLabeledEdit;
    EditDiametroInterno: TLabeledEdit;
    EditCusto: TLabeledEdit;
    sqlDiametros: TQuery;
    sqlDiametrosRegistros: TIntegerField;
    sqlDiametrosCodProjeto: TStringField;
    sqlDiametrosDiametroExterno: TIntegerField;
    sqlDiametrosDiametroInterno: TFloatField;
    sqlDiametrosCusto: TFloatField;
    butFechar: TBitBtn;
    procedure FormCreate(Sender: TObject);
    procedure FormClose(Sender: TObject; var Action: TCloseAction);
    procedure butNovoClick(Sender: TObject);
    procedure butExcluirClick(Sender: TObject);
    procedure EditDiametroNominalKeyDown(Sender: TObject; var Key: Word;
      Shift: TShiftState);
    procedure EditDiametroInternoKeyDown(Sender: TObject; var Key: Word;
      Shift: TShiftState);
    procedure EditCustoKeyDown(Sender: TObject; var Key: Word;
      Shift: TShiftState);
    procedure DBGrid1KeyDown(Sender: TObject; var Key: Word;
      Shift: TShiftState);
    procedure DBGrid1DbClick(Sender: TObject);
    procedure butFecharClick(Sender: TObject);
  private
    procedure Atualizar;
  public
    { Public declarations }
  end;

var
  frmDiametros: TfrmDiametros;

implementation

uses
  Principal, CalcularProjeto;

{$R *.DFM}

procedure TfrmDiametros.Atualizar;
begin
  //
  tblDiametros.Open;
  //
  with sqlDiametros do
    begin
      Close;
      SQL.Clear;
      SQL.Add('Select * from Diametros Where CodProjeto="" + frmPrincipal.CodProjeto + "" Order By Registros');
      Prepare;
      Open;
    end;
end;

procedure TfrmDiametros.FormCreate(Sender: TObject);
begin
  Atualizar;
end;

procedure TfrmDiametros.FormClose(Sender: TObject;
  var Action: TCloseAction);
begin

```

```

        tblDiametros.Close;
        frmCalcularProjeto.Enabled := True;
        frmCalcularProjeto.OnShow(Self);
        frmPrincipal.CodProjeto := '';
    end;

procedure TfrmDiametros.butNovoClick(Sender: TObject);
begin
    //
    EditDiametroNominal.Text := '';
    EditDiametroInterno.Text := '';
    EditCusto.Text := '';
    //
    Atualizar;
    //
    EditDiametroNominal.SetFocus;
end;

procedure TfrmDiametros.butExcluirClick(Sender: TObject);
begin
    if Application.MessageBox('Deseja excluir o diâmetro selecionado?',
        'Atenção', MB_YESNO + MB_ICONWARNING) = ID_YES then
    begin
        //
        if tblDiametros.Locate('CodProjeto;DiametroExterno',
            VarArrayOf([frmPrincipal.CodProjeto,DBGrid1.Columns.Items[0].Field.Text]),
            [loPartialKey]) then
        begin
            tblDiametros.Delete;

            //
            Atualizar;
        end;
    end;
end;

procedure TfrmDiametros.EditDiametroNominalKeyDown(Sender: TObject;
    var Key: Word; Shift: TShiftState);
begin
    if Key = vk_return then EditDiametroInterno.SetFocus;
end;

procedure TfrmDiametros.EditDiametroInternoKeyDown(Sender: TObject;
    var Key: Word; Shift: TShiftState);
begin
    if Key = vk_return then EditCusto.SetFocus;
end;

procedure TfrmDiametros.EditCustoKeyDown(Sender: TObject; var Key: Word;
    Shift: TShiftState);
begin
    if Key = vk_return then
    begin
        //
        if (tblDiametros.Locate('CodProjeto;DiametroInterno',
            VarArrayOf([
                sqlDiametrosCodProjeto.Value, sqlDiametrosDiametroExterno.Value]), [loPartialKey])) and
            (DBGrid1.Tag = 2) then
        begin
            tblDiametros.Edit;
        end
        else
        begin
            tblDiametros.Append;
        end;
        tblDiametrosCodProjeto.Value := frmPrincipal.CodProjeto;
        tblDiametrosDiametroExterno.Value := StrToInt(EditDiametroNominal.Text);
        tblDiametrosDiametroInterno.Value := StrToFloat(EditDiametroInterno.Text);
        tblDiametrosCusto.Value := StrToFloat(EditCusto.Text);
        tblDiametros.Post;

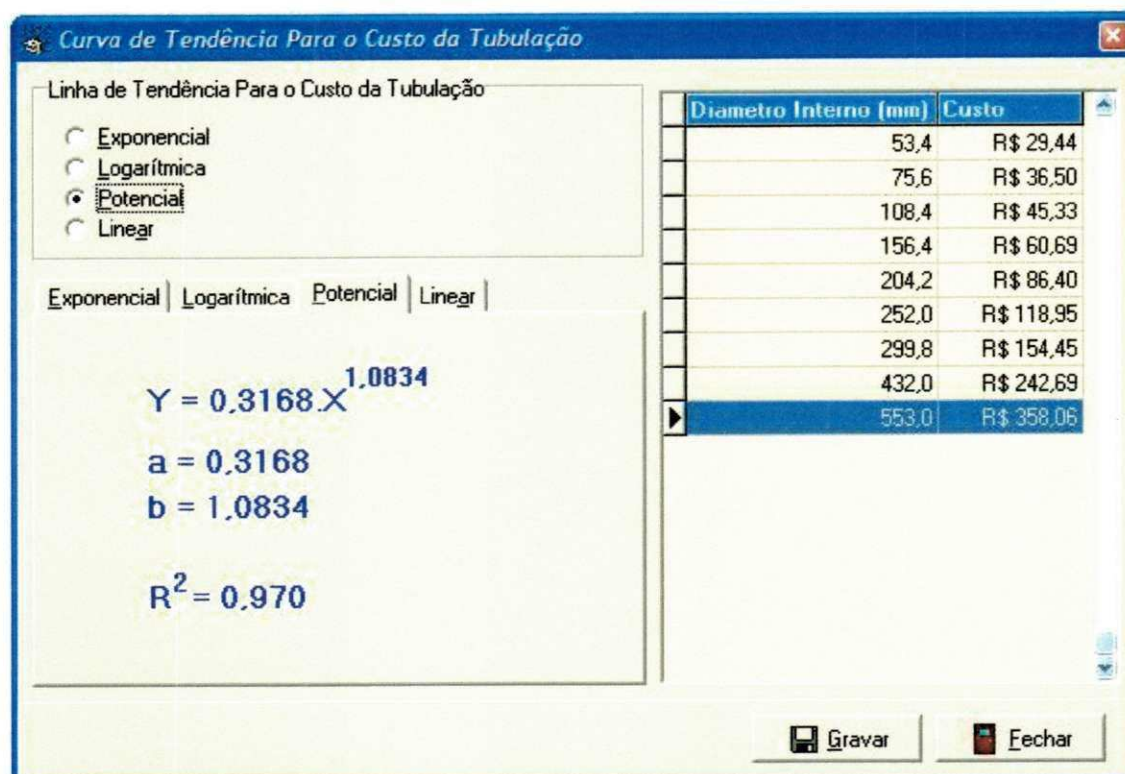
        //
        butNovo.OnClick(Self);
        //
        DBGrid1.Tag := 0;
    end;
end;

procedure TfrmDiametros.DBGrid1KeyDown(Sender: TObject; var Key: Word;
    Shift: TShiftState);
begin
    if Key = VK_DELETE then butExcluir.OnClick(Self);
end;

procedure TfrmDiametros.DBGrid1DbClick(Sender: TObject);
begin
    if tblDiametros.Locate('CodProjeto;DiametroInterno',

```

A figura abaixo refere-se ao módulo de curva de tendência para o cálculo do custo da tubulação. Na página seguinte, segue o código fonte deste módulo.



```

unit CustoSdmetros;

interface

uses
  Windows, Messages, SysUtils, Classes, Graphics, Controls, Forms, Dialogs,
  Grids, DBGrids, Db, DBTables, ComCtrls, StdCtrls, Math, ExtCtrls, Buttons;

type
  TfrmCustoSdmetros = class(TForm)
    GroupBox1: TGroupBox;
    rbExponencial: TRadioButton;
    rbLogaritmica: TRadioButton;
    rbPotencial: TRadioButton;
    rbLinear: TRadioButton;
    PageControl1: TPageControl;
    TabSheet1: TTabSheet;
    TabSheet2: TTabSheet;
    TabSheet3: TTabSheet;
    TabSheet4: TTabSheet;
    sqlSdmetros: TQuery;
    dstsqlSdmetros: TDataSource;
    DBGrid1: TDBGrid;
    lblLinear: TLabel;
    sqlSdmetrosRegistros: TIntegerField;
    sqlSdmetrosCodProjeto: TStringField;
    sqlSdmetrosSdmetroInterno: TFloatField;
    sqlSdmetrosCusto: TFloatField;
    lblLinearParamA: TLabel;
    lblLinearParamB: TLabel;
    lblLinearR2: TLabel;
    lblExponencial: TLabel;
    lblExponencialParamA: TLabel;
    lblExponencialParamB: TLabel;
    lblExponencialR2: TLabel;
    lblExponencialExpoente: TLabel;
    Label1: TLabel;
    Label5: TLabel;
    lblLogaritmica: TLabel;
    lblLogaritmicaParamA: TLabel;
    lblLogaritmicaParamB: TLabel;
    lblLogaritmicaR2: TLabel;
    Label8: TLabel;
    lblPotencial: TLabel;
    lblPotencialParamA: TLabel;
    lblPotencialParamB: TLabel;
    lblPotencialR2: TLabel;
    Label7: TLabel;
    lblPotencialExpoente: TLabel;
    Panel1: TPanel;
    BitBtn1: TBitBtn;
    BitBtn2: TBitBtn;
    procedure FormCreate(Sender: TObject);
    procedure rbLinearClick(Sender: TObject);
    procedure rbExponencialClick(Sender: TObject);
    procedure rbLogaritmicaClick(Sender: TObject);
    procedure rbPotencialClick(Sender: TObject);
    procedure PageControl1Change(Sender: TObject);
    procedure BitBtn1Click(Sender: TObject);
    procedure BitBtn2Click(Sender: TObject);
    procedure FormClose(Sender: TObject; var Action: TCloseAction);
  private
    a, b: Real;
    procedure Calcular;
  public
    { Public declarations }
  end;

var
  frmCustoSdmetros: TfrmCustoSdmetros;

implementation

uses Principal, CalcularProjeto;

{$R *.DFM}

procedure TfrmCustoSdmetros.Calcular;
var
  i, n: Integer;
  a_old, R2: Real;
  x, y, x2, y2, xy: Real;
  x_med, y_med: Real;
begin
  with sqlSdmetros do

```

```

begin
    Close;
    SQL.Clear;
    SQL.Add('Select * from Diametros Where CodProjeto="" + frmPrincipal.CodProjeto + "");
    Prepare;
    Open;
end;
x:=0; y:=0; x2:=0; y2:=0; xy:=0; n := sqlDiametros.RecordCount;
for i := 1 to n do
begin
    if rbExponencial.Checked = True then
    begin
        // Variaveis de x
        x := x + sqlDiametrosDiametroInterno.Value;
        x2 := x2 + Power(sqlDiametrosDiametroInterno.Value, 2);
        // Variaveis de y
        y := y + Ln(sqlDiametrosCusto.Value);
        y2 := y2 + Power(Ln(sqlDiametrosCusto.Value), 2);
        // Variaveis de xy
        xy := xy + (sqlDiametrosDiametroInterno.Value * Ln(sqlDiametrosCusto.Value));
    end;
    if rbLogaritmica.Checked = True then
    begin
        // Variaveis de x
        x := x + Ln(sqlDiametrosDiametroInterno.Value);
        x2 := x2 + Power(Ln(sqlDiametrosDiametroInterno.Value), 2);
        // Variaveis de y
        y := y + sqlDiametrosCusto.Value;
        y2 := y2 + Power(sqlDiametrosCusto.Value, 2);
        // Variaveis de xy
        xy := xy + (Ln(sqlDiametrosDiametroInterno.Value) * sqlDiametrosCusto.Value);
    end;
    if rbPotencial.Checked = True then
    begin
        // Variaveis de x
        x := x + Ln(sqlDiametrosDiametroInterno.Value);
        x2 := x2 + Power(Ln(sqlDiametrosDiametroInterno.Value), 2);
        // Variaveis de y
        y := y + Ln(sqlDiametrosCusto.Value);
        y2 := y2 + Power(Ln(sqlDiametrosCusto.Value), 2);
        // Variaveis de xy
        xy := xy + (Ln(sqlDiametrosDiametroInterno.Value) * Ln(sqlDiametrosCusto.Value));
    end;
    if rbLinear.Checked = True then
    begin
        // Variaveis de x
        x := x + sqlDiametrosDiametroInterno.Value;
        x2 := x2 + Power(sqlDiametrosDiametroInterno.Value, 2);
        // Variaveis de y
        y := y + sqlDiametrosCusto.Value;
        y2 := y2 + Power(sqlDiametrosCusto.Value, 2);
        // Variaveis de xy
        xy := xy + (sqlDiametrosDiametroInterno.Value * sqlDiametrosCusto.Value);
    end;
    sqlDiametros.Next;
end;
// Valores médios de X e Y
x_med := x / n;
y_med := y / n;
// Cálculo dos parâmetros
a := (xy - (n * x_med * y_med)) / (x2 - n * Power(x_med, 2));
b := y_med - a * x_med;
// Cálculo do R2
R2 := Power((n * xy - x * y), 2) / ((n * x2 - Power(x, 2)) * (n * y2 - Power(y, 2)));
// Exibe função com parâmetros calculados
if rbExponencial.Checked = True then
begin
    a_old := b;
    b := a;
    a := Exp(a_old);
    //
    lblExponencial.Caption := Format('Y = %.4f, [a]) * '.e';
    lblExponencialExpoente.Caption := Format('%.4f, [b]) * '.X';
    lblExponencialParamA.Caption := Format('a = %.4f, [a]);
    lblExponencialParamB.Caption := Format('b = %.4f, [b]);
    lblExponencialR2.Caption := Format('R = %.3f, [R2]);
end;
if rbLogaritmica.Checked = True then
begin
    //
    if b > 0 then
        lblLogaritmica.Caption := Format('Y = %.4f, [a]) + '.Ln(X) + ' + Format('%.4f, [b]);
    else
        lblLogaritmica.Caption := Format('Y = %.4f, [a]) + '.Ln(X) + ' + Format('%.4f, [b]);
    //

```

```

lblLogaritmicaParamA.Caption := Format('a = %.4f', [a]);
lblLogaritmicaParamB.Caption := Format('b = %.4f', [b]);
lblLogaritmicaR2.Caption := Format('R = %.3f', [R2]);
end;
if rbPotencial.Checked = True then
begin
    a_old := b;
    b := a;
    a := Exp(a_old);
    //
    lblPotencial.Caption := Format('Y = %.4f, [a] + '.X';
    lblPotencialExpoente.Caption := Format('%.4f', [b]);
    lblPotencialParamA.Caption := Format('a = %.4f', [a]);
    lblPotencialParamB.Caption := Format('b = %.4f', [b]);
    lblPotencialR2.Caption := Format('R = %.3f', [R2]);
end;
if rbLinear.Checked = True then
begin
    if b > 0 then
        lblLinear.Caption := 'Y = ' + Format('%.4f', [a]) + '.X' + ' + ' + Format('%.4f', [b]);
    else
        lblLinear.Caption := 'Y = ' + Format('%.4f', [a]) + '.X' + ' + ' + Format('%.4f', [b]);
    lblLinearParamA.Caption := Format('a = %.4f', [a]);
    lblLinearParamB.Caption := Format('b = %.4f', [b]);
    lblLinearR2.Caption := Format('R = %.3f', [R2]);
end;
end;

procedure TfrmCustoDiametros.FormCreate(Sender: TObject);
begin
    with sqlDiametros do
    begin
        Close;
        SQL.Clear;
        SQL.Add('Select * from Diametros Where CodProjeto=' + frmPrincipal.CodProjeto + '');
        Prepare;
        Open;
    end;
    if frmCalcularProjeto.tblProjetos.FindKey([frmPrincipal.CodProjeto]) then
    begin
        if frmCalcularProjeto.tblProjetosEquacao.Value = 1 then
            rbExponencial.Checked := True;
        if frmCalcularProjeto.tblProjetosEquacao.Value = 2 then
            rbLogaritmica.Checked := True;
        if frmCalcularProjeto.tblProjetosEquacao.Value = 3 then
            rbPotencial.Checked := True;
        if frmCalcularProjeto.tblProjetosEquacao.Value = 4 then
            rbLinear.Checked := True;
        end;
    end;

procedure TfrmCustoDiametros.rbLinearClick(Sender: TObject);
begin
    Calcular;
    PageControl1.ActivePageIndex := 3;
end;

procedure TfrmCustoDiametros.rbExponencialClick(Sender: TObject);
begin
    Calcular;
    PageControl1.ActivePageIndex := 0;
end;

procedure TfrmCustoDiametros.rbLogaritmicaClick(Sender: TObject);
begin
    Calcular;
    PageControl1.ActivePageIndex := 1;
end;

procedure TfrmCustoDiametros.rbPotencialClick(Sender: TObject);
begin
    Calcular;
    PageControl1.ActivePageIndex := 2;
end;

procedure TfrmCustoDiametros.PageControl1Change(Sender: TObject);
begin
    if PageControl1.ActivePageIndex = 0 then rbExponencial.Checked := True;
    if PageControl1.ActivePageIndex = 1 then rbLogaritmica.Checked := True;
    if PageControl1.ActivePageIndex = 2 then rbPotencial.Checked := True;
    if PageControl1.ActivePageIndex = 3 then rbLinear.Checked := True;
end;

procedure TfrmCustoDiametros.BitBtn1Click(Sender: TObject);
begin

```



```

        Self.Close;
end;

procedure TfrmCustoDiametros.BitBtn2Click(Sender: TObject);
begin
    //frmCalcularProjeto.tblProjetos.Open;
    if frmCalcularProjeto.tblProjetos.FindKey([frmPrincipal.CodProjeto]) then
    begin
        Calcular;
        frmCalcularProjeto.tblProjetos.Edit;
        if rbExponencial.Checked = True then
            frmCalcularProjeto.tblProjetos.Equacao.Value := 1;
        if rbLogaritmica.Checked = True then
            frmCalcularProjeto.tblProjetos.Equacao.Value := 2;
        if rbPotencial.Checked = True then
            frmCalcularProjeto.tblProjetos.Equacao.Value := 3;
        if rbLinear.Checked = True then
            frmCalcularProjeto.tblProjetos.Equacao.Value := 4;

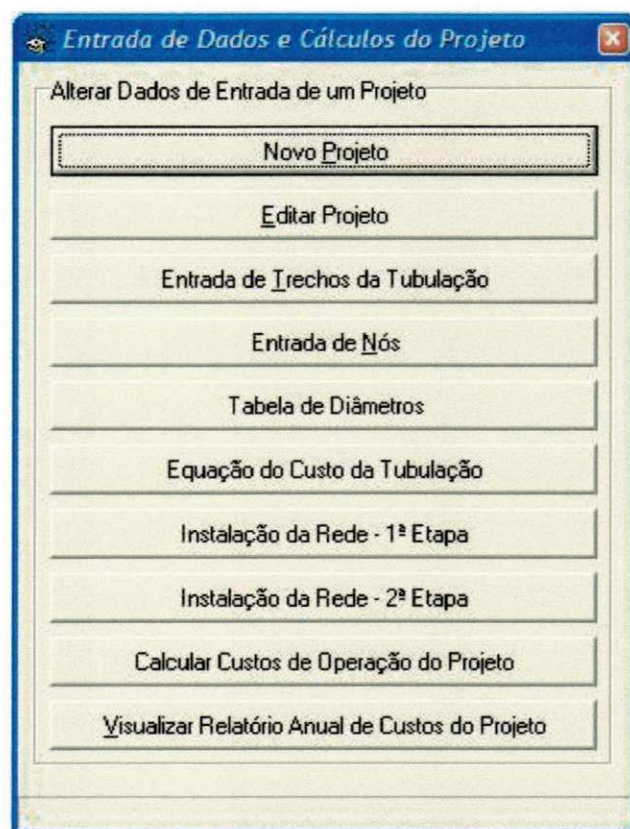
        frmCalcularProjeto.tblProjetos.ParametroA.Value := StrToFloat(Format('%4f', [a]));
        frmCalcularProjeto.tblProjetos.ParametroB.Value := StrToFloat(Format('%4f', [b]));
        frmCalcularProjeto.tblProjetos.Post;
    end;
    //frmCalcularProjeto.tblProjetos.Close;
    Self.Close;
end;

procedure TfrmCustoDiametros.FormClose(Sender: TObject;
var Action: TCloseAction);
begin
    frmPrincipal.CodProjeto := '';
    frmCalcularProjeto.Enabled := True;
    frmCalcularProjeto.OnShow(Self);
end;

end.

```

A figura abaixo refere-se ao módulo de básico de geração e cálculo das planilhas e custos de operação dos projetos. Na página seguinte, segue o código fonte deste módulo.



unit CalcularProjeto;

interface

uses

Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls, Forms,
Dialogs, DB, DBTables, StdCtrls, Buttons, ExtCtrls, Grids, DBGrids,
Menus, ToolWin, ComCtrls, Excel2000, OleServer, Math;

type

TfrmCalcularProjeto = class(TForm)
 GroupBox1: TGroupBox;
 butDadosdoProjeto: TBitBtn;
 butCalcularPrimeiraEtapa: TBitBtn;
 butEntradadeTrechos: TBitBtn;
 butCalcularCustos: TBitBtn;
 butEntradadeNos: TBitBtn;
 tblTrechos: TTable;
 tblNos: TTable;
 butCalcularSegundaEtapa: TBitBtn;
 ExcelApplication1: TExcelApplication;
 ExcelWorksheet1: TExcelWorksheet;
 tblNosRegistros: TAutoIncField;
 tblNosCodProjeto: TStringField;
 tblNosNo: TStringField;
 tblNosVazao: TFloatField;
 tblNosCota: TFloatField;
 tblNosEqContinuidade: TStringField;
 tblNosEqAlturaPiezometrica: TStringField;
 tblNosEqAlturaPiezometrica2: TStringField;
 tblTrechosRegistros: TAutoIncField;
 tblTrechosCodProjeto: TStringField;
 tblTrechosTrecho: TStringField;
 tblTrechosVazaoCalculada: TFloatField;
 tblTrechosDiametro: TFloatField;
 tblTrechosComprimento: TFloatField;
 tblTrechosPerdaCarga: TFloatField;
 tblTrechosCustoUnitario: TFloatField;
 tblTrechosCustoTotal: TFloatField;
 ExcelApplication2: TExcelApplication;
 ExcelWorksheet2: TExcelWorksheet;
 sqlDiametros: TQuery;
 sqlDiametrosRegistros: TIntegerField;
 sqlDiametrosDiametroExterno: TIntegerField;
 sqlDiametrosDiametroInterno: TFloatField;
 sqlDiametrosCusto: TFloatField;
 butRelatorio: TBitBtn;
 BitBtn1: TBitBtn;
 Timer1: TTimer;
 tblOperacao: TTable;
 tblOperacaoRegistros: TAutoIncField;
 tblOperacaoCodProjeto: TStringField;
 tblOperacaoDescricao: TStringField;
 tblOperacaoAno: TSmallIntField;
 tblOperacaoPopulacaoAnual: TFloatField;
 tblOperacaoVazaoAnual: TFloatField;
 tblOperacaoHorasBombeamento: TFloatField;
 tblOperacaoPotencia: TFloatField;
 tblOperacaoRugosidade: TFloatField;
 tblOperacaoCustoAnual: TFloatField;
 tblProjetos: TTable;
 tblProjetosCodProjeto: TStringField;
 tblProjetosDescricao: TStringField;
 tblProjetosCotaReservatorio: TFloatField;
 tblProjetosCotaPiezometrica: TFloatField;
 tblProjetosPerdaCarga: TStringField;
 tblProjetosRugInicialPVC: TFloatField;
 tblProjetosRugInicialFoFo: TFloatField;
 tblProjetosCustoKWh: TFloatField;
 tblProjetosRendimento: TFloatField;
 tblProjetosNumTrechos: TIntegerField;
 tblProjetosNumNos: TIntegerField;
 tblProjetosPH: TFloatField;
 tblProjetosHorizonte: TIntegerField;
 tblProjetosAnoInicial: TIntegerField;
 tblProjetosPopulacaoInicial: TFloatField;
 tblProjetosDemandaHabitante: TFloatField;
 tblProjetosK1: TFloatField;
 tblProjetosK2: TFloatField;
 tblProjetosK: TFloatField;
 tblProjetosTaxa: TFloatField;
 tblProjetosTaxaEnergia: TFloatField;
 tblProjetosCaixaConcreto: TBooleanField;
 tblProjetosVolumeCaixaConcreto: TFloatField;
 tblProjetosCustoConcreto: TFloatField;

```

tblProjetosDiametroMaterial: TFloatField;
tblProjetosCoefVarRugPVC: TFloatField;
butDiametros: TBitBtn;
StatusBar1: TStatusBar;
sqlDiametrosCodProjeto: TStringField;
butCurvaTendencia: TBitBtn;
tblProjetosEquacao: TIntegerField;
tblProjetosParametroA: TFloatField;
tblProjetosParametroB: TFloatField;
tblProjetosParametroPopA: TFloatField;
tblProjetosParametroPopB: TFloatField;
procedure butDadosdoProjetoClick(Sender: TObject);
procedure butCalcularPrimeiraEtapaClick(Sender: TObject);
procedure butEntradadeTrechosClick(Sender: TObject);
procedure FormShow(Sender: TObject);
procedure butCalcularCustosClick(Sender: TObject);
procedure butEntradadeNosClick(Sender: TObject);
procedure butCalcularSegundaEtapaClick(Sender: TObject);
procedure FormCreate(Sender: TObject);
procedure BitBtn1Click(Sender: TObject);
procedure butRelatorioClick(Sender: TObject);
procedure Timer1Timer(Sender: TObject);
procedure FormClose(Sender: TObject; var Action: TCloseAction);
procedure butDiametrosClick(Sender: TObject);
procedure butCurvaTendenciaClick(Sender: TObject);
private
    function Localizar: Boolean;
        function DiametroSuperior(Valor: Real): Real;
        function DiametroInferior(Valor: Real): Real;
        function Incrementar(Equacao: String; Incremento: Integer): String;
public

end;

var
    frmCalcularProjeto: TfrmCalcularProjeto;

implementation

uses
    DadosProjeto, Principal, Nos, Trechos, RelOperacao, Diametros,
    CustoDiametros;

{$R *.DFM}

function TfrmCalcularProjeto.Localizar: Boolean;
var
    i: Integer;
    Codigo, S: String;
begin
    Result := False;
    ///////////////////////////////////////////////////////////////////
    if frmPrincipal.CodProjeto = '' then
        begin
            if InputQuery('Selecionar Projeto', 'Digite o Código do Projeto', Codigo) then
                begin
                    for i := 1 to (6-Length(Codigo)) do
                        begin
                            S := S + '0';
                        end;
                        Codigo := S + Codigo;
                    //
                    if tblProjetos.FindKey([Codigo]) then
                        begin
                            frmPrincipal.CodProjeto := Codigo;
                            tblTrechos.Open;
                            tblTrechos.Filter := 'CodProjeto=' + frmPrincipal.CodProjeto + '';
                            tblTrechos.Filtered := True;
                            //
                            tblNos.Open;
                            tblNos.Filter := 'CodProjeto=' + frmPrincipal.CodProjeto + '';
                            tblNos.Filtered := True;
                            //
                            Result := True;
                        end
                    else
                        begin
                            Application.MessageBox('Projeto não cadastrado',
                                'Atenção', MB_ICONWARNING);
                            S := '';
                        end;
                    end;
                end;
            end
        else
            begin
                end
            end;
end
end
end
begin

```

```

tblTrechos.Open;
tblTrechos.Filter := 'CodProjeto=' + frmPrincipal.CodProjeto + '';
tblTrechos.Filtered := True;
//
tblNos.Open;
tblNos.Filter := 'CodProjeto=' + frmPrincipal.CodProjeto + '';
tblNos.Filtered := True;
//
tblProjetos.Close;
tblProjetos.Open;
tblProjetos.FindKey([frmPrincipal.CodProjeto]);
//
Result := True;
end;
////////////////////////////////////
end;

function TfrmCalcularProjeto.DiametroSuperior(Valor: Real): Real;
var
    i: Integer;
    Diametro,
    Diferenca: Array[1..50] of Double;
begin
    with sqlDiametros do
        begin
            Close;
            SQL.Clear;
            SQL.Add('SELECT * FROM Diametros WHERE CodProjeto = ' + frmPrincipal.CodProjeto + ' ORDER BY Registros');
            Prepare;
            Open;
        end;
        for i := 1 to 50 do
            begin
                Diametro[i] := -10000;
                Diferenca[i] := -10000;
            end;
        sqlDiametros.First;
        for i := 1 to sqlDiametros.RecordCount do
            begin
                Diametro[i] := StrToFloat(Format('%1n', [sqlDiametros.DiametroInterno.Value]));
                sqlDiametros.Next;
            end;
        //
        sqlDiametros.First; Valor := StrToFloat(Format('%1n', [Valor]));
        for i := 1 to sqlDiametros.RecordCount do
            begin
                if (Valor - Diametro[i]) < 0 then
                    begin
                        Diferenca[i] := Valor - Diametro[i];
                    end;
                sqlDiametros.Next;
            end;
        if ((MaxValue(Diametro) - Valor) > 0) and
            ((MaxValue(Diametro) - Valor) < 0.01) then
            begin
                Result := MaxValue(Diametro);
                Exit;
            end;
        for i := 1 to sqlDiametros.RecordCount do
            begin
                //
                if MaxValue(Diferenca) = Diferenca[i] then
                    begin
                        Result := Diametro[i];
                    end;
            end;
        end;
    end;

function TfrmCalcularProjeto.DiametroInferior(Valor: Real): Real;
var
    i: Integer;
    Diametro,
    Diferenca: Array[1..50] of Double;
begin
    with sqlDiametros do
        begin
            Close;
            SQL.Clear;
            SQL.Add('SELECT * FROM Diametros WHERE CodProjeto = ' + frmPrincipal.CodProjeto + ' ORDER BY Registros');
            Prepare;
            Open;
        end;
        for i := 1 to 50 do
            begin
                Diametro[i] := 10000;
            end;
        sqlDiametros.First;
        for i := 1 to sqlDiametros.RecordCount do
            begin
                Diametro[i] := StrToFloat(Format('%1n', [sqlDiametros.DiametroInterno.Value]));
                sqlDiametros.Next;
            end;
        //
        sqlDiametros.First; Valor := StrToFloat(Format('%1n', [Valor]));
        for i := 1 to sqlDiametros.RecordCount do
            begin
                if (Valor - Diametro[i]) > 0 then
                    begin
                        Diferenca[i] := Valor - Diametro[i];
                    end;
                sqlDiametros.Next;
            end;
        if ((MaxValue(Diametro) - Valor) > 0) and
            ((MaxValue(Diametro) - Valor) < 0.01) then
            begin
                Result := MaxValue(Diametro);
                Exit;
            end;
        for i := 1 to sqlDiametros.RecordCount do
            begin
                //
                if MaxValue(Diferenca) = Diferenca[i] then
                    begin
                        Result := Diametro[i];
                    end;
            end;
        end;
    end;
end;

```

```

        Diferenca[i] := 10000;
    end;
    sqlDiametros.First;
    for i := 1 to sqlDiametros.RecordCount do
    begin
        Diametro[i] := StrToFloat(Format('%1n', [sqlDiametrosDiametroInterno.Value]));
        sqlDiametros.Next;
    end;
    //
    sqlDiametros.First; Valor := StrToFloat(Format('%1n', [Valor]));
    for i := 1 to sqlDiametros.RecordCount do
    begin
        if (Valor - Diametro[i]) > 0 then
        begin
            Diferenca[i] := Valor - Diametro[i];
        end;
        sqlDiametros.Next;
    end;
    if ((MaxValue(Diametro) - Valor) > 0) and
    ((Valor - MinValue(Diametro)) < 0.01) then
    begin
        Result := MinValue(Diametro);
    end;
    Exit;
end;
for i := 1 to sqlDiametros.RecordCount do
begin
    //
    if MinValue(Diferenca) = Diferenca[i] then
    begin
        Result := Diametro[i];
    end;
end;
end;

function TfrmCalcularProjeto.Incrementar(Equacao: String; Incremento: Integer): String;
var
    i: Integer;
    Celula, Resultado: String;
    Continua: Boolean;
begin
    Celula := ''; Result := ''; Resultado := ''; Continua := True;
    Equacao := Equacao + '-';
    for i := 1 to Length(Equacao) do
    begin
        case Equacao[i] of
            '-', '+':
            begin
                try
                    Celula := IntToStr((StrToInt(Celula) + Incremento));
                except
                    on EConvertError do
                        ;
                end;
            end;
            if i < Length(Equacao) then
                Resultado := Resultado + Celula + Equacao[i]
            else
                Resultado := Resultado + Celula ;
            Celula := '';
        end
        else
            begin
                case Equacao[i] of
                    'A'..'Z':
                    begin
                        Resultado := Resultado + Equacao[i];
                    end
                    else
                    begin
                        Celula := Celula + Equacao[i];
                    end;
                end;
            end;
        end;
    end;
    Result := Resultado;
end;

procedure TfrmCalcularProjeto.butDadosdoProjetoClick(Sender: TObject);
var
    Codigo, S: String;
    i: Integer;
begin
    if InputQuery('Alterar Projeto', 'Digite o Código do Projeto', Codigo) then
    begin
        for i := 1 to (6-Length(Codigo)) do

```

```

begin
    S := S + '0';
    end;
    Codigo := S + Codigo;
//
if tblProjetos.FindKey([Codigo]) then
begin
    frmPrincipal.CodProjeto := Codigo;
    frmCalcularProjeto.Caption := 'Projeto' + frmPrincipal.CodProjeto + ' - ' + frmCalcularProjeto.tblProjetos.Descricao.Value;
    Application.CreateForm(TfrmDadosProjeto, frmDadosProjeto);
    frmCalcularProjeto.Tag := 2;
    frmCalcularProjeto.Enabled := False;
end
else
begin
    Application.MessageBox('Projeto não cadastrado!',
        'Atenção', MB_ICONWARNING);
    S := "";
end;
end;
end;

procedure TfrmCalcularProjeto.butCalcularPrimeiraEtapaClick(Sender: TObject);
var
    i, j, t, lcid : Integer;
    wkbk : _Workbook;
    Arquivo: WideString;
    PopulacaoAnual, a, b,
    VazaoAnual, CustoKWh, TaxaJuros, TaxaEnergia, ValorPresente,
    Rendimento, NumHoras, CustoTotal, K, Pt: Real;
    Alpha: Real;
begin
    frmPrincipal.CodProjeto := "";
    if Localizar = False then Exit;
    // Pega o usuário logado
    lcid := GetUserDefaultLCID;
    // Torna a aplicação visível
    ExcelApplication1.Visible[lcid] := True;
    // Remove alertas do excel
    ExcelApplication1.DisplayAlerts[lcid] := False;
    // Cria um arquivo do excel
    Arquivo := frmPrincipal.Path + 'Planilhas' + tblProjetos.CodProjeto.Value + ' - 1ª Etapa.xls';
    //
    if FileExists(Arquivo) then
    begin
        Wkbk := ExcelApplication1.Workbooks.Open(Arquivo,
            EmptyParam, EmptyParam, EmptyParam, EmptyParam, EmptyParam,
            EmptyParam, EmptyParam, EmptyParam, EmptyParam, EmptyParam,
            EmptyParam, EmptyParam, LCID);
    end
    else
    begin
        wkbk := ExcelApplication1.Workbooks.Add(EmptyParam, lcid);
        end;
        // Conecta a planilha (1) que será a planilha a receber os dados
        ExcelWorksheet1.ConnectTo(Wkbk.Worksheets[1] as _Worksheet);
    // Ativa a planilha conectada
        ExcelWorksheet1.Activate(LCID);
    // Torna possível fazer alterações
        ExcelApplication1.ScreenUpdating[lcid] := True;
        //ExcelWorksheet1.Name := 'Planilha1';
        ///////////////////////////////////////////////////////////////////
        ExcelWorksheet1.Range['A1','A1'].Value := 'Trechos';
        ExcelWorksheet1.Range['A2','A2'].Value := "";
        //
        ExcelWorksheet1.Range['B1','B1'].Value := 'Vazão';
        ExcelWorksheet1.Range['B2','B2'].Value := '(l/s)';
        //
        ExcelWorksheet1.Range['C1','C1'].Value := 'Diametro';
        ExcelWorksheet1.Range['C2','C2'].Value := '(mm)';
        //
        ExcelWorksheet1.Range['D1','D1'].Value := 'Rugosidade';
        ExcelWorksheet1.Range['D2','D2'].Value := '(mm) - ' + IntToStr(tblProjetos.Horizonte.Value) + ' Anos';
        //
        ExcelWorksheet1.Range['E1','E1'].Value := 'Coeficiente';
        ExcelWorksheet1.Range['E2','E2'].Value := "";
        //
        ExcelWorksheet1.Range['F1','F1'].Value := 'Comp. do Trecho';
        ExcelWorksheet1.Range['F2','F2'].Value := '(m)';
        //
        ExcelWorksheet1.Range['G1','G1'].Value := 'Perdas';
        ExcelWorksheet1.Range['G2','G2'].Value := '(m.c.a)';
        //
        ExcelWorksheet1.Range['H1','H1'].Value := 'Custo Unitário';
        ExcelWorksheet1.Range['H2','H2'].Value := '(R$/m)';
    end;
end;

```

```

//
ExcelWorksheet1.Range["I1","I1"].Value := 'Custo Total';
ExcelWorksheet1.Range["I2","I2"].Value := '(R$)';
//
ExcelWorksheet1.Range["J1","J1"].Value := 'Velocidade';
ExcelWorksheet1.Range["J2","J2"].Value := '(m3/s)';
//
// Coleta informações do projeto
CustoKWh := tblProjetosCustoKWh.Value;
TaxaJuros := tblProjetosTaxa.Value/100;
TaxaEnergia := tblProjetosTaxaEnergia.Value/100;
Rendimento := tblProjetosRendimento.Value;
K := tblProjetosK.Value;
a := tblProjetosParametroPopA.Value;
b := tblProjetosParametroPopB.Value;
// Inicia cálculo do projeto
Pt := 0; VazaoAnual := 0; CustoTotal := 0; ValorPresente := 0; PopulacaoAnual := 0;
for t := 0 to tblProjetosHorizonte.Value do
begin
// Calcula a população para um tempo t=i
PopulacaoAnual := b + (a*t);
// Calcula a vazao para cada ano p/ população
VazaoAnual := (PopulacaoAnual * tblProjetosK1.Value *
tblProjetosK2.Value * tblProjetosDemandaHabitante.Value)/86400;
// Calcula o fator de valor atual (CORREÇÃO)
if t > 0 then
begin
Pt := CustoKwh *
(Power((1+TaxaEnergia), (t-1))) /
(Power((1+TaxaJuros), t));
end;
// Calcula o valor presente
ValorPresente := ValorPresente + Pt;
// Calcula o número de horas de bombeamento por dia
NumHoras := 365 * K * VazaoAnual;
CustoTotal := CustoTotal + (NumHoras*VazaoAnual*Pt*9.81/(Rendimento/100));
end;
//
tblTrechos.First;
for i := 1 to tblTrechos.RecordCount do
begin
// Trechos
ExcelWorksheet1.Range["A"+IntToStr(i+2), "A"+IntToStr(i+2)].Value := IntToStr(i);
// Vazão
ExcelWorksheet1.Range["B"+IntToStr(i+2), "B"+IntToStr(i+2)].NumberFormat := '0,00';
ExcelWorksheet1.Range["B"+IntToStr(i+2), "B"+IntToStr(i+2)].Value := tblTrechosVazaoCalculada.Value;
// Diâmetro
ExcelWorksheet1.Range["C"+IntToStr(i+2), "C"+IntToStr(i+2)].NumberFormat := '0,0';
ExcelWorksheet1.Range["C"+IntToStr(i+2), "C"+IntToStr(i+2)].Value := tblTrechosDiâmetro.Value;
// Rugosidade
ExcelWorksheet1.Range["D"+IntToStr(i+2), "D"+IntToStr(i+2)].NumberFormat := '0,00';
//
Alpha := Power(10, (3.3 - 0.5*tblProjetosPH.Value));
//
ExcelWorksheet1.Range["D"+IntToStr(i+2), "D"+IntToStr(i+2)].FormulaArray :=
'=SE(C'+IntToStr(i+2)+'<='+FloatToStr(tblProjetosDiâmetroMaterial.Value)+'+',
Format('%3n', [tblProjetosRugInicialPVC.Value])+'(' +
Format('%3n', [tblProjetosCoefVarRugPVC.Value])+'^'+
IntToStr(tblProjetosHorizonte.Value)+'^'+
Format('%3n', [tblProjetosRugInicialFoFo.Value])+'^'+
Format('%3n', [Alpha])+'^'+
IntToStr(tblProjetosHorizonte.Value)+'^)';
// Comprimento
ExcelWorksheet1.Range["F"+IntToStr(i+2), "F"+IntToStr(i+2)].NumberFormat := '0,00';
ExcelWorksheet1.Range["F"+IntToStr(i+2), "F"+IntToStr(i+2)].Value := tblTrechosComprimento.Value;
// Coeficiente e Perda de Carga
if tblProjetosPerdaCarga.Value = 'HW' then
begin
// Coeficiente de Hazen Williams (C)
ExcelWorksheet1.Range["E2","E2"].Value := 'de Hazen Williams';
ExcelWorksheet1.Range["E"+IntToStr(i+2), "E"+IntToStr(i+2)].NumberFormat := '0,0000';
ExcelWorksheet1.Range["E"+IntToStr(i+2), "E"+IntToStr(i+2)].FormulaArray :=
'=SE(C'+IntToStr(i+2)+'<='+FloatToStr(tblProjetosDiâmetroMaterial.Value)+'+',
(29,7*((LOG(0,27*D'+IntToStr(i+2))+1/C'+
IntToStr(i+2)+1)^2)^0,54)/(((0,001*C'+IntToStr(i+2)+1)^0,0891)*J'+
IntToStr(i+2)+1)^0,081));(29,7*((LOG(0,27*D'+IntToStr(i+2))+1/C'+
IntToStr(i+2)+1)^2)^0,54)/(((0,001*C'+IntToStr(i+2)+1)^0,0891)*J'+
IntToStr(i+2)+1)^0,081));';
// Perda de Carga por Hazen-Williams
ExcelWorksheet1.Range["G"+IntToStr(i+2), "G"+IntToStr(i+2)].NumberFormat := '0,00';
ExcelWorksheet1.Range["G"+IntToStr(i+2), "G"+IntToStr(i+2)].Formula :=
'=10.66*((0,001*ABS(B'+IntToStr(i+2)+1))/E'+IntToStr(i+2)+1)^1.852*(F'+IntToStr(i+2)+1/(0,001*C'+IntToStr(i+2)+1)^4.87));
end
else
begin
// Coeficiente de Darcy-Weisbach (f)

```



```

ExcelWorksheet1.Range["E2", "E2"].Value := 'de Darcy-Weisbach';
ExcelWorksheet1.Range["E" + IntToStr(i+2), "E" + IntToStr(i+2)].NumberFormat := "0,0000";
ExcelWorksheet1.Range["E" + IntToStr(i+2), "E" + IntToStr(i+2)].FormulaArray :=
'=SE(C' + IntToStr(i+2) + '<=' + FloatToText(tblProjetosDiametroMaterial.Value) + ';0,25*((LOG(0,27*D' + IntToStr(i+2) + '/C' +
IntToStr(i+2) + '^2);0,25*((LOG(0,27*D' + IntToStr(i+2) + '/C' +
IntToStr(i+2) + '^2)))';
// Perda de carga por Darcy-Weisbach
ExcelWorksheet1.Range["G" + IntToStr(i+2), "G" + IntToStr(i+2)].NumberFormat := "0,00";
ExcelWorksheet1.Range["G" + IntToStr(i+2), "G" + IntToStr(i+2)].Formula :=
'=E' + IntToStr(i+2) + '*(F' + IntToStr(i+2) + '/(0,001*C' + IntToStr(i+2) + '^2)*(J' + IntToStr(i+2) + '^2)/19,62)';
end;
// Custo Unitário
ExcelWorksheet1.Range["H" + IntToStr(i+2), "H" + IntToStr(i+2)].NumberFormat := "#.##0,00_";(##0,00);
if tblProjetosEquacao.Value = 1 then // Exponencial
begin
ExcelWorksheet1.Range["H" + IntToStr(i+2), "H" + IntToStr(i+2)].Formula := '=' + frmPrincipal.Substituir(Format("%4n",
[tblProjetosParametroA.Value]), '...',') + "EXP(" + frmPrincipal.Substituir(Format("%4n", [tblProjetosParametroB.Value]), '...',') + "C' +
IntToStr(i+2) + '^)";
end;
if tblProjetosEquacao.Value = 2 then // Logarítmica
begin
ExcelWorksheet1.Range["H" + IntToStr(i+2), "H" + IntToStr(i+2)].Formula := '=' + frmPrincipal.Substituir(Format("%4n",
[tblProjetosParametroA.Value]), '...',') + "LN(C' + IntToStr(i+2) + '^)-" + frmPrincipal.Substituir(Format("%4n", [tblProjetosParametroB.Value]),
'...',');
end;
if tblProjetosEquacao.Value = 3 then // Potência
begin
ExcelWorksheet1.Range["H" + IntToStr(i+2), "H" + IntToStr(i+2)].Formula := '=' + frmPrincipal.Substituir(Format("%4n",
[tblProjetosParametroA.Value]), '...',') + "C' + IntToStr(i+2) + '^" + frmPrincipal.Substituir(Format("%4n", [tblProjetosParametroB.Value]), '...',');
end;
if tblProjetosEquacao.Value = 4 then // Linear
begin
ExcelWorksheet1.Range["H" + IntToStr(i+2), "H" + IntToStr(i+2)].Formula := '=' + frmPrincipal.Substituir(Format("%4n",
[tblProjetosParametroA.Value]), '...',') + "C' + IntToStr(i+2) + '+' + frmPrincipal.Substituir(Format("%4n", [tblProjetosParametroB.Value]), '...',');
end;
// Custo Total
ExcelWorksheet1.Range["I" + IntToStr(i+2), "I" + IntToStr(i+2)].NumberFormat := "#.##0,00_";(##0,00);
ExcelWorksheet1.Range["I" + IntToStr(i+2), "I" + IntToStr(i+2)].Formula := "F' + IntToStr(i+2) + "H' + IntToStr(i+2);
// Velocidade
ExcelWorksheet1.Range["J" + IntToStr(i+2), "J" + IntToStr(i+2)].NumberFormat := "0,00";
ExcelWorksheet1.Range["J" + IntToStr(i+2), "J" + IntToStr(i+2)].Formula := "=(0,004*ABS(B' + IntToStr(i+2) + '^))/(3,14*0,001*C' +
IntToStr(i+2) + '^2)*1000";
//
tblTrechos.Next;
end;
////////////////////////////////////
// Formata Soma
ExcelWorksheet1.Range["H" + IntToStr(i+2), "H" + IntToStr(i+2)].Value := 'Total =';
ExcelWorksheet1.Range["I" + IntToStr(i+2), "I" + IntToStr(i+2)].NumberFormat := "#.##0,00_";(##0,00);
ExcelWorksheet1.Range["I" + IntToStr(i+2), "I" + IntToStr(i+2)].FormulaArray := "SOMA(I3:" + "I" + IntToStr(i+1) + ")";
// Formata a Altura
ExcelWorksheet1.Range["A" + IntToStr(i+2), "A" + IntToStr(i+2)].Value := 'Altura =';
ExcelWorksheet1.Range["C" + IntToStr(i+2), "C" + IntToStr(i+2)].NumberFormat := "0,00";
ExcelWorksheet1.Range["C" + IntToStr(i+2), "C" + IntToStr(i+2)].Value := tblProjetosCotaPiezometrica.Value;
// Cota do Terreno
ExcelWorksheet1.Range["A" + IntToStr(i+3), "A" + IntToStr(i+3)].Value := 'Cota Piezométrica de cab.(mca) =';
ExcelWorksheet1.Range["C" + IntToStr(i+3), "C" + IntToStr(i+3)].NumberFormat := "0,00";
ExcelWorksheet1.Range["C" + IntToStr(i+3), "C" + IntToStr(i+3)].Formula := "C' + IntToStr(i+2) + '+' +
FloatToText(tblProjetosCotaReservatorio.Value);
// Nós
ExcelWorksheet1.Range["A" + IntToStr(i+6), "A" + IntToStr(i+6)].Value := 'Nó';
// Altura piezométrica
ExcelWorksheet1.Range["B" + IntToStr(i+6), "B" + IntToStr(i+6)].Value := 'Altura Piezométrica';
ExcelWorksheet1.Range["B" + IntToStr(i+7), "B" + IntToStr(i+7)].Value := '(m)';
// Demanda
ExcelWorksheet1.Range["C" + IntToStr(i+6), "C" + IntToStr(i+6)].Value := 'Demanda';
ExcelWorksheet1.Range["C" + IntToStr(i+7), "C" + IntToStr(i+7)].Value := '(l/s)';
// Cota do Nó
ExcelWorksheet1.Range["D" + IntToStr(i+6), "D" + IntToStr(i+6)].Value := 'Cota do Nó';
ExcelWorksheet1.Range["D" + IntToStr(i+7), "D" + IntToStr(i+7)].Value := '(m)';
// Pressão Disponível
ExcelWorksheet1.Range["E" + IntToStr(i+6), "E" + IntToStr(i+6)].Value := 'Pressão Disponível.';
ExcelWorksheet1.Range["E" + IntToStr(i+7), "E" + IntToStr(i+7)].Value := '(mca)';
// Equação da Continuidade
ExcelWorksheet1.Range["F" + IntToStr(i+6), "F" + IntToStr(i+6)].Value := 'Equação da Cont.';
ExcelWorksheet1.Range["F" + IntToStr(i+7), "F" + IntToStr(i+7)].Value := " ";
// conservação da energia nos Anéis
ExcelWorksheet1.Range["G" + IntToStr(i+6), "G" + IntToStr(i+6)].Value := 'Equação da Cons.';
ExcelWorksheet1.Range["G" + IntToStr(i+7), "G" + IntToStr(i+7)].Value := 'de Energia';
// Equação da Continuidade
ExcelWorksheet1.Range["H" + IntToStr(i+8), "H" + IntToStr(i+8)].Value := 'Anel 1';
ExcelWorksheet1.Range["H" + IntToStr(i+9), "H" + IntToStr(i+9)].Value := 'Anel 2';
if tblProjetosCaixaConcreto.Value = True then
begin
// Custo do Concreto

```

```

ExcelWorksheet1.Range['I'+ IntToStr(i+6), 'I'+ IntToStr(i+6)].Value := 'Custo do Concreto';
ExcelWorksheet1.Range['I'+ IntToStr(i+7), 'I'+ IntToStr(i+7)].Value := '(R$/m3)';
ExcelWorksheet1.Range['I'+ IntToStr(i+8), 'I'+ IntToStr(i+8)].NumberFormat := '#,##0,00_';(##0,00)';
ExcelWorksheet1.Range['I'+ IntToStr(i+8), 'I'+ IntToStr(i+8)].Value := tblProjetosCustoConcreto.Value;
// Vol. de Conc. da Caixa D'Água
ExcelWorksheet1.Range['J'+ IntToStr(i+6), 'J'+ IntToStr(i+6)].Value := 'Caixa D'Água';
ExcelWorksheet1.Range['J'+ IntToStr(i+7), 'J'+ IntToStr(i+7)].Value := '(m3)';
ExcelWorksheet1.Range['J'+ IntToStr(i+8), 'J'+ IntToStr(i+8)].NumberFormat := '0,00';
ExcelWorksheet1.Range['J'+ IntToStr(i+8), 'J'+ IntToStr(i+8)].Value := tblProjetosVolumeCaixaConcreto.Value;
// Pilar + Fundação + Estrutura
ExcelWorksheet1.Range['I'+ IntToStr(i+10), 'I'+ IntToStr(i+10)].Value := 'Pilar + Fundação';
ExcelWorksheet1.Range['I'+ IntToStr(i+11), 'I'+ IntToStr(i+11)].Value := '(m3)';
ExcelWorksheet1.Range['I'+ IntToStr(i+12), 'I'+ IntToStr(i+12)].NumberFormat := '0,00';
ExcelWorksheet1.Range['I'+ IntToStr(i+12), 'I'+ IntToStr(i+12)].Formula := '=2.2928*EXP(0.1221*C'+ IntToStr(i+2) + ')';
// Custo da Estrutura
ExcelWorksheet1.Range['J'+ IntToStr(i+10), 'J'+ IntToStr(i+10)].Value := 'Custo da Estrutura';
ExcelWorksheet1.Range['J'+ IntToStr(i+11), 'J'+ IntToStr(i+11)].Value := '(R$)';
ExcelWorksheet1.Range['J'+ IntToStr(i+12), 'J'+ IntToStr(i+12)].NumberFormat := '#,##0,00_';(##0,00)';
ExcelWorksheet1.Range['J'+ IntToStr(i+12), 'J'+ IntToStr(i+12)].Formula := '=(I'+ IntToStr(i+12) + '+J'+ IntToStr(i+8) + ')*I'+
IntToStr(i+8);
end
else
begin
// Custo do Concreto
ExcelWorksheet1.Range['I'+ IntToStr(i+6), 'I'+ IntToStr(i+6)].Value := '';
ExcelWorksheet1.Range['I'+ IntToStr(i+7), 'I'+ IntToStr(i+7)].Value := '';
ExcelWorksheet1.Range['I'+ IntToStr(i+8), 'I'+ IntToStr(i+8)].Value := '';
// Vol. de Conc. da Caixa D'Água
ExcelWorksheet1.Range['J'+ IntToStr(i+6), 'J'+ IntToStr(i+6)].Value := '';
ExcelWorksheet1.Range['J'+ IntToStr(i+7), 'J'+ IntToStr(i+7)].Value := '';
ExcelWorksheet1.Range['J'+ IntToStr(i+8), 'J'+ IntToStr(i+8)].Value := '';
// Pilar + Fundação + Estrutura
ExcelWorksheet1.Range['I'+ IntToStr(i+10), 'I'+ IntToStr(i+10)].Value := '';
ExcelWorksheet1.Range['I'+ IntToStr(i+11), 'I'+ IntToStr(i+11)].Value := '';
ExcelWorksheet1.Range['I'+ IntToStr(i+12), 'I'+ IntToStr(i+12)].Value := '';
// Custo da Estrutura
ExcelWorksheet1.Range['J'+ IntToStr(i+10), 'J'+ IntToStr(i+10)].Value := '';
ExcelWorksheet1.Range['J'+ IntToStr(i+11), 'J'+ IntToStr(i+11)].Value := '';
ExcelWorksheet1.Range['J'+ IntToStr(i+12), 'J'+ IntToStr(i+12)].Value := '';
end;
////////////////////////////////////
tblNos.First, j := 1;
for i := 1 to tblNos.RecordCount do
begin
// Nós
ExcelWorksheet1.Range['A'+ IntToStr(i+j+7), 'A'+ IntToStr(i+j+7)].Value := IntToStr(i);
// Altura piezométrica
ExcelWorksheet1.Range['B'+ IntToStr(i+j+7), 'B'+ IntToStr(i+j+7)].NumberFormat := '0,00';
ExcelWorksheet1.Range['B'+ IntToStr(i+j+7), 'B'+ IntToStr(i+j+7)].Formula := '=' + tblNosEqAlturaPiezometrica.Value;
// Demanda
ExcelWorksheet1.Range['C'+ IntToStr(i+j+7), 'C'+ IntToStr(i+j+7)].NumberFormat := '0,00';
ExcelWorksheet1.Range['C'+ IntToStr(i+j+7), 'C'+ IntToStr(i+j+7)].Value := tblNosVazao.Value;
// Cota do Nó
ExcelWorksheet1.Range['D'+ IntToStr(i+j+7), 'D'+ IntToStr(i+j+7)].NumberFormat := '0,00';
ExcelWorksheet1.Range['D'+ IntToStr(i+j+7), 'D'+ IntToStr(i+j+7)].Value := tblNosCota.Value;
// Pressão Disponível
ExcelWorksheet1.Range['E'+ IntToStr(i+j+7), 'E'+ IntToStr(i+j+7)].NumberFormat := '0,00';
ExcelWorksheet1.Range['E'+ IntToStr(i+j+7), 'E'+ IntToStr(i+j+7)].Formula := '=B'+ IntToStr(i+j+7) + '-D'+ IntToStr(i+j+7);
// Equação da Continuidade
ExcelWorksheet1.Range['F'+ IntToStr(i+j+7), 'F'+ IntToStr(i+j+7)].NumberFormat := '0,00';
ExcelWorksheet1.Range['F'+ IntToStr(i+j+7), 'F'+ IntToStr(i+j+7)].FormulaArray := '=' + tblNosEqContinuidade.Value;
tblNos.Next;
end;
////////////////////////////////////
i := i+j+7;
// Cota do Terreno
ExcelWorksheet1.Range['B'+ IntToStr(i+2), 'B'+ IntToStr(i+2)].Value := 'Cota do';
ExcelWorksheet1.Range['B'+ IntToStr(i+3), 'B'+ IntToStr(i+3)].Value := 'Terreno';
ExcelWorksheet1.Range['B'+ IntToStr(i+4), 'B'+ IntToStr(i+4)].Value := '(m)';
ExcelWorksheet1.Range['B'+ IntToStr(i+5), 'B'+ IntToStr(i+5)].NumberFormat := '0,00';
ExcelWorksheet1.Range['B'+ IntToStr(i+5), 'B'+ IntToStr(i+5)].Value := tblProjetosCotaReservatorio.Value;
// Horas de Bombeamento
ExcelWorksheet1.Range['C'+ IntToStr(i+2), 'C'+ IntToStr(i+2)].Value := 'Horas de';
ExcelWorksheet1.Range['C'+ IntToStr(i+3), 'C'+ IntToStr(i+3)].Value := 'Bombeamento';
ExcelWorksheet1.Range['C'+ IntToStr(i+4), 'C'+ IntToStr(i+4)].Value := '(h)';
ExcelWorksheet1.Range['C'+ IntToStr(i+5), 'C'+ IntToStr(i+5)].NumberFormat := '0,0';
ExcelWorksheet1.Range['C'+ IntToStr(i+5), 'C'+ IntToStr(i+5)].Value := NumHoras;
// Custo do kWh
ExcelWorksheet1.Range['D'+ IntToStr(i+2), 'D'+ IntToStr(i+2)].Value := 'Custo do';
ExcelWorksheet1.Range['D'+ IntToStr(i+3), 'D'+ IntToStr(i+3)].Value := 'kWh';
ExcelWorksheet1.Range['D'+ IntToStr(i+4), 'D'+ IntToStr(i+4)].Value := '(R$)';
ExcelWorksheet1.Range['D'+ IntToStr(i+5), 'D'+ IntToStr(i+5)].NumberFormat := '#,##0,00_';(##0,00)';
ExcelWorksheet1.Range['D'+ IntToStr(i+5), 'D'+ IntToStr(i+5)].Value := tblProjetosCustoKWH.Value;
// Rendimento do Bombeamento
ExcelWorksheet1.Range['E'+ IntToStr(i+2), 'E'+ IntToStr(i+2)].Value := 'Rendimento do';

```



```

end;

procedure TfrmCalcularProjeto.FormShow(Sender: TObject);
begin
    SetFocus;
end;

procedure TfrmCalcularProjeto.butCalcularCustosClick(Sender: TObject);
var
    t, LCID: Integer;
    AnoInicial, AnoCorrente: Integer;
    a, b, PopulacaoInicial, PopulacaoAnual: Real;
    NumHoras, VazaoAnual, Rugosidade, Potencia: Real;
    K, Fat, Alpha, TaxaJuros, TaxaEnergia: Real;
    CustoKwh, CustoAnual: Real;
    Rendimento: Real;
    Soma: Real;
    Arquivo: String;
    wkbk2: _Workbook;
begin
    if Localizar = False then Exit;
    // Pega o usuário logado
    Lcid := GetUserDefaultLCID;
    // Torna a aplicação visível
    ExcelApplication2.Visible[Lcid] := False;
    // Remove alertas do excel
    ExcelApplication2.DisplayAlerts[Lcid] := False;
    // Cria um arquivo do excel
    Arquivo := frmPrincipal.Path + 'Planilhas\' + tblProjetosCodProjeto.Value + ' - 2ª Etapa.xls';
    //
    if FileExists(Arquivo) then
        begin
            Wkbk2 := ExcelApplication2.Workbooks.Open(Arquivo,
                EmptyParam, EmptyParam, EmptyParam, EmptyParam, EmptyParam,
                EmptyParam, EmptyParam, EmptyParam, EmptyParam, EmptyParam,
                EmptyParam, EmptyParam, LCID);
        end
    else
        begin
            Application.MessageBox('A planilha da 2ª etapa ainda não foi gerada e minimizada.',
                'Atenção', MB_ICONWARNING);
            Exit;
        end;
    // Conecta a planilha (2) que será a planilha a receber os dados
    ExcelWorksheet2.ConnectTo(Wkbk2.Worksheets[1] as _Worksheet);
    // Ativa a planilha conectada
    ExcelWorksheet2.Activate(LCID);
    // Torna possível fazer alterações
    ExcelApplication2.ScreenUpdating[Lcid] := False;

    // Abre tabelas
    tblOperacao.Open;
    tblProjetos.Open;
    // Seleciona projeto
    tblProjetos.FindKey([frmPrincipal.CodProjeto]);
    tblProjetos.Edit;
    tblProjetosCotaPiezometrica.Value := ExcelApplication2.Range['C'+IntToStr((tblTrechos.RecordCount*2)+3),
'C'+IntToStr((tblTrechos.RecordCount*2)+3)].Value;
    tblProjetos.Post;
    ExcelApplication2.Workbooks.Close(Lcid);
    ExcelWorksheet2.Disconnect;
    ///////////////////////////////////////////////////////////////////
    // Seleciona dados do projeto
    tblOperacao.Filter := 'CodProjeto=' + frmPrincipal.CodProjeto + '';
    tblOperacao.Filtered := True;
    //
    tblOperacao.First;
    for t := 1 to tblOperacao.RecordCount do
        begin
            tblOperacao.Delete;
            tblOperacao.Next;
        end;
    // Coleta informações do projeto
    AnoInicial := tblProjetosAnoInicial.Value;
    PopulacaoInicial := tblProjetosPopulacaoInicial.Value;
    a := tblProjetosParametroPopA.Value;
    b := tblProjetosParametroPopB.Value;
    CustoKWh := tblProjetosCustoKWH.Value;
    TaxaJuros := tblProjetosTaxa.Value/100;
    TaxaEnergia := tblProjetosTaxaEnergia.Value/100;
    Rendimento := tblProjetosRendimento.Value/100;
    K := tblProjetosK.Value;
    Alpha := Power(10, (3.3 - 0.5*tblProjetosPH.Value));
    // Move para o primeiro registro
    tblOperacao.First;

```



```

//
ExcelWorksheet2.Range[C' + IntToStr(i+j), 'C' + IntToStr(i+j)].NumberFormat := '0,0';
ExcelWorksheet2.Range[C' + IntToStr(i+j), 'C' + IntToStr(i+j)].Value := StrToFloat(Format('%1f', [DiametroInterior(Diam)]));
ExcelWorksheet2.Range[C' + IntToStr(i+j+1), 'C' + IntToStr(i+j+1)].NumberFormat := '0,0';
ExcelWorksheet2.Range[C' + IntToStr(i+j+1), 'C' + IntToStr(i+j+1)].Value := StrToFloat(Format('%1f',
[DiametroSuperior(Diam)]));
// Rugosidade
Alpha := Power(10, (3.3 - 0.5*tblProjetosPH.Value));
//
ExcelWorksheet2.Range[D' + IntToStr(i+j), 'D' + IntToStr(i+j)].NumberFormat := '0,00';
ExcelWorksheet2.Range[D' + IntToStr(i+j), 'D' + IntToStr(i+j)].FormulaArray :=
'=SE(C' + IntToStr(i+j) + '<=' + FloatToStr(tblProjetosDiametroMaterial.Value) + ',' +
Format('%2n', [tblProjetosRugInicialPVC.Value]) + '+' +
Format('%2n', [tblProjetosCoefVarRugPVC.Value]) + '*' +
IntToStr(tblProjetosHorizonte.Value) + ');' +
Format('%2n', [tblProjetosRugInicialFoFo.Value]) + '+' +
Format('%2n', [Alpha]) + '*' +
IntToStr(tblProjetosHorizonte.Value) + '));'
//
ExcelWorksheet2.Range[D' + IntToStr(i+j+1), 'D' + IntToStr(i+j+1)].NumberFormat := '0,00';
ExcelWorksheet2.Range[D' + IntToStr(i+j+1), 'D' + IntToStr(i+j+1)].FormulaArray :=
'=SE(C' + IntToStr(i+j+1) + '<=' + FloatToStr(tblProjetosDiametroMaterial.Value) + ',' +
Format('%2n', [tblProjetosRugInicialPVC.Value]) + '+' +
Format('%2n', [tblProjetosCoefVarRugPVC.Value]) + '*' +
IntToStr(tblProjetosHorizonte.Value) + ');' +
Format('%2n', [tblProjetosRugInicialFoFo.Value]) + '+' +
Format('%2n', [Alpha]) + '*' +
IntToStr(tblProjetosHorizonte.Value) + '));'
// Comprimento
ExcelWorksheet2.Range[F' + IntToStr(i+j), 'F' + IntToStr(i+j)].NumberFormat := '0,00';
ExcelWorksheet2.Range[F' + IntToStr(i+j), 'F' + IntToStr(i+j)].Value := ExcelWorksheet1.Range[F' + IntToStr(i+2), 'F' +
IntToStr(i+2)].Value * 0.6;
ExcelWorksheet2.Range[F' + IntToStr(i+j+1), 'F' + IntToStr(i+j+1)].NumberFormat := '0,00';
ExcelWorksheet2.Range[F' + IntToStr(i+j+1), 'F' + IntToStr(i+j+1)].Value := ExcelWorksheet1.Range[F' + IntToStr(i+2), 'F' +
IntToStr(i+2)].Value * 0.4;
// seleciona os limites de diâmetros superiores e inferiores
ExcelWorksheet2.Range[C' + IntToStr((tblTrechos.RecordCount*2)+i+8), 'C' +
IntToStr((tblTrechos.RecordCount*2)+i+8)].NumberFormat := '0,00';
ExcelWorksheet2.Range[C' + IntToStr((tblTrechos.RecordCount*2)+i+8), 'C' + IntToStr((tblTrechos.RecordCount*2)+i+8)].Value :=
'='F' + IntToStr(i+j);
//
ExcelWorksheet2.Range[D' + IntToStr((tblTrechos.RecordCount*2)+i+8), 'D' +
IntToStr((tblTrechos.RecordCount*2)+i+8)].NumberFormat := '0,00';
ExcelWorksheet2.Range[D' + IntToStr((tblTrechos.RecordCount*2)+i+8), 'D' + IntToStr((tblTrechos.RecordCount*2)+i+8)].Value :=
'='F' + IntToStr(i+j+1);
//
ExcelWorksheet2.Range[E' + IntToStr((tblTrechos.RecordCount*2)+i+8), 'E' +
IntToStr((tblTrechos.RecordCount*2)+i+8)].NumberFormat := '0,00';
ExcelWorksheet2.Range[E' + IntToStr((tblTrechos.RecordCount*2)+i+8), 'E' + IntToStr((tblTrechos.RecordCount*2)+i+8)].Formula :=
ExcelWorksheet1.Range[F' + IntToStr(i+2), 'F' + IntToStr(i+2)].Value;
//
ExcelWorksheet2.Range[F' + IntToStr((tblTrechos.RecordCount*2)+i+8), 'F' +
IntToStr((tblTrechos.RecordCount*2)+i+8)].NumberFormat := '0,00';
ExcelWorksheet2.Range[F' + IntToStr((tblTrechos.RecordCount*2)+i+8), 'F' + IntToStr((tblTrechos.RecordCount*2)+i+8)].Formula :=
'='E' + IntToStr(i+j) + '*(C' + IntToStr(i+j) + '^2)^0.54)/(((0.001*C' + IntToStr(i+j) + '^0.0891)*(K' + IntToStr(i+j) + '^0.081));(29.7*((LOG(0.27*D' +
IntToStr(i+j) + '^0.081)) + 'C' + IntToStr(i+j) + '^2)^0.54)/(((0.001*C' + IntToStr(i+j) + '^0.0891)*(K' + IntToStr(i+j) + '^0.081))))';
//
ExcelWorksheet2.Range[E' + IntToStr(i+j+1), 'E' + IntToStr(i+j+1)].NumberFormat := '0,0000';
ExcelWorksheet2.Range[E' + IntToStr(i+j+1), 'E' + IntToStr(i+j+1)].FormulaArray := '=SE(C' + IntToStr(i+j+1) +
'<=300*((LOG(0.27*D' + IntToStr(i+j+1) + '^0.081)) + 'C' + IntToStr(i+j+1) + '^2)^0.54)/(((0.001*C' + IntToStr(i+j+1) + '^0.0891)*(K' +
IntToStr(i+j+1) + '^0.081));(29.7*((LOG(0.27*D' + IntToStr(i+j+1) + '^0.081)) + 'C' + IntToStr(i+j+1) + '^2)^0.54)/(((0.001*C' + IntToStr(i+j+1) +
'^0.0891)*(K' + IntToStr(i+j+1) + '^0.081))))';
// Perda de Carga por Hazen-Williams
ExcelWorksheet2.Range[G' + IntToStr(i+j), 'G' + IntToStr(i+j)].NumberFormat := '0,00';
ExcelWorksheet2.Range[G' + IntToStr(i+j), 'G' + IntToStr(i+j)].Formula := '=10.66*((0.001*ABS(B' + IntToStr(i+j) + '))/E' +
IntToStr(i+j) + '^1.852*(F' + IntToStr(i+j) + ')/(0.001*C' + IntToStr(i+j) + '^4.87));'
//
ExcelWorksheet2.Range[H' + IntToStr(i+j), 'H' + IntToStr(i+j)].NumberFormat := '0,00';
ExcelWorksheet2.Range[H' + IntToStr(i+j+1), 'H' + IntToStr(i+j+1)].NumberFormat := '0,00';
ExcelWorksheet2.Range[H' + IntToStr(i+j), 'H' + IntToStr(i+j)].Formula := '=G' + IntToStr(i+j) + '+' + G' + IntToStr(i+j+1);
//
ExcelWorksheet2.Range[G' + IntToStr(i+j+1), 'G' + IntToStr(i+j+1)].NumberFormat := '0,00';
ExcelWorksheet2.Range[G' + IntToStr(i+j+1), 'G' + IntToStr(i+j+1)].Formula := '=10.66*((0.001*ABS(B' + IntToStr(i+j+1) + '))/E' +
IntToStr(i+j+1) + '^1.852*(F' + IntToStr(i+j+1) + ')/(0.001*C' + IntToStr(i+j+1) + '^4.87));'
end
else

```

```

begin
    // Coeficiente de Darcy-Weisbach (f)
    ExcelWorksheet2.Range['E2', 'E2'].Value := 'de Darcy-Weisbach';
    ExcelWorksheet2.Range['E' + IntToStr(i+j), 'E' + IntToStr(i+j)].NumberFormat := '0,0000';
    ExcelWorksheet2.Range['E' + IntToStr(i+j), 'E' + IntToStr(i+j)].FormulaArray := '=SE(C' + IntToStr(i+j) + '<=300;0,25*((LOG(0,27*D' +
IntToStr(i+j) + '/C' + IntToStr(i+j) + '^2);0,25*((LOG(0,27*D' + IntToStr(i+j) + '/C' + IntToStr(i+j) + '^2)))';
    //
    ExcelWorksheet2.Range['E' + IntToStr(i+j+1), 'E' + IntToStr(i+j+1)].NumberFormat := '0,0000';
    ExcelWorksheet2.Range['E' + IntToStr(i+j+1), 'E' + IntToStr(i+j+1)].FormulaArray := '=SE(C' + IntToStr(i+j+1) +
'<=300;0,25*((LOG(0,27*D' + IntToStr(i+j+1) + '/C' + IntToStr(i+j+1) + '^2);0,25*((LOG(0,27*D' + IntToStr(i+j+1) + '/C' + IntToStr(i+j+1) + '^2)))';
    // Perda de carga por Darcy-Weisbach
    ExcelWorksheet2.Range['G' + IntToStr(i+j), 'G' + IntToStr(i+j)].NumberFormat := '0,00';
    ExcelWorksheet2.Range['G' + IntToStr(i+j), 'G' + IntToStr(i+j)].Formula := '=E' + IntToStr(i+j) + '*(F' + IntToStr(i+j) + '/(0,001*C' +
IntToStr(i+j) + '^2)/(K' + IntToStr(i+j) + '^2)/19,62)';
    //
    ExcelWorksheet2.Range['H' + IntToStr(i+j), 'H' + IntToStr(i+j)].NumberFormat := '0,00';
    ExcelWorksheet2.Range['H' + IntToStr(i+j+1), 'H' + IntToStr(i+j+1)].NumberFormat := '0,00';
    ExcelWorksheet2.Range['H' + IntToStr(i+j), 'H' + IntToStr(i+j)].Formula := '=G' + IntToStr(i+j) + '+G' + IntToStr(i+j+1);
    //
    ExcelWorksheet2.Range['G' + IntToStr(i+j+1), 'G' + IntToStr(i+j+1)].NumberFormat := '0,00';
    ExcelWorksheet2.Range['G' + IntToStr(i+j+1), 'G' + IntToStr(i+j+1)].Formula := '=E' + IntToStr(i+j+1) + '*(F' + IntToStr(i+j+1) +
'/(0,001*C' + IntToStr(i+j+1) + '^2)/(K' + IntToStr(i+j+1) + '^2)/19,62)';
end;
// Custo Unitário Por Metro
with sqlDiametros do
begin
    Close;
    SQL.Clear;
    SQL.Add('SELECT * FROM Diametros WHERE CodProjeto = ' + frmPrincipal.CodProjeto + ' AND DiametroInterno = ' +
frmPrincipal.Substituir(Format('%1n', [StrToFloat(ExcelWorksheet2.Range['C' + IntToStr(i+j), 'C' + IntToStr(i+j)].Value)], ', '));
    Prepare;
    Open;
    if RecordCount = 1 then
        begin
            // Custo unitário por metro
            ExcelWorksheet2.Range['I' + IntToStr(i+j), 'I' + IntToStr(i+j)].NumberFormat := '#,##0,00_';(##0,00);
            ExcelWorksheet2.Range['I' + IntToStr(i+j), 'I' + IntToStr(i+j)].Value := sqlDiametros.Custo.Value;
        end
    else
        begin
            // Custo unitário por metro
            ExcelWorksheet2.Range['I' + IntToStr(i+j), 'I' + IntToStr(i+j)].NumberFormat := '#,##0,00_';(##0,00);
            ExcelWorksheet2.Range['I' + IntToStr(i+j), 'I' + IntToStr(i+j)].Value := 0;
        end;
    //=====
    Close;
    SQL.Clear;
    SQL.Add('SELECT * FROM Diametros WHERE CodProjeto = ' + frmPrincipal.CodProjeto + ' AND DiametroInterno = ' +
frmPrincipal.Substituir(Format('%1n', [StrToFloat(ExcelWorksheet2.Range['C' + IntToStr(i+j+1), 'C' + IntToStr(i+j+1)].Value)], ', '));
    Prepare;
    Open;
    if RecordCount = 1 then
        begin
            // Custo unitário por metro
            ExcelWorksheet2.Range['I' + IntToStr(i+j+1), 'I' + IntToStr(i+j+1)].NumberFormat := '#,##0,00_';(##0,00);
            ExcelWorksheet2.Range['I' + IntToStr(i+j+1), 'I' + IntToStr(i+j+1)].Value := sqlDiametros.Custo.Value;
        end
    else
        begin
            // Custo unitário por metro
            ExcelWorksheet2.Range['I' + IntToStr(i+j+1), 'I' + IntToStr(i+j+1)].NumberFormat := '#,##0,00_';(##0,00);
            ExcelWorksheet2.Range['I' + IntToStr(i+j+1), 'I' + IntToStr(i+j+1)].Value := 0;
        end;
end;
//
ExcelWorksheet2.Range['I' + IntToStr(i+j+1), 'I' + IntToStr(i+j+1)].NumberFormat := '#,##0,00_';(##0,00);
ExcelWorksheet2.Range['I' + IntToStr(i+j+1), 'I' + IntToStr(i+j+1)].Value := sqlDiametros.Custo.Value;
// Custo total
ExcelWorksheet2.Range['J' + IntToStr(i+j), 'J' + IntToStr(i+j)].NumberFormat := '#,##0,00_';(##0,00);
ExcelWorksheet2.Range['J' + IntToStr(i+j), 'J' + IntToStr(i+j)].Formula := '=I' + IntToStr(i+j) + '*F' + IntToStr(i+j);
//
ExcelWorksheet2.Range['J' + IntToStr(i+j+1), 'J' + IntToStr(i+j+1)].NumberFormat := '#,##0,00_';(##0,00);
ExcelWorksheet2.Range['J' + IntToStr(i+j+1), 'J' + IntToStr(i+j+1)].Formula := '=I' + IntToStr(i+j+1) + '*F' + IntToStr(i+j+1);
// Velocidade de escoamento
ExcelWorksheet2.Range['K' + IntToStr(i+j), 'K' + IntToStr(i+j)].NumberFormat := '0,00';
ExcelWorksheet2.Range['K' + IntToStr(i+j), 'K' + IntToStr(i+j)].Formula := '=((0,004*ABS(B' + IntToStr(i+j) + '^2))/(3,14*0,001*C' +
IntToStr(i+j) + '^2))*1000';
//
ExcelWorksheet2.Range['K' + IntToStr(i+j+1), 'K' + IntToStr(i+j+1)].NumberFormat := '0,00';
ExcelWorksheet2.Range['K' + IntToStr(i+j+1), 'K' + IntToStr(i+j+1)].Formula := '=((0,004*ABS(B' + IntToStr(i+j+1) + '^2))/(3,14*0,001*C' +
IntToStr(i+j+1) + '^2))*1000';
//
tblTrechos.Next;
end;

```



```

////////////////////////////////////
// Formata Soma
ExcelWorksheet2.Range["I"+IntToStr(i+j+1), "I"+IntToStr(i+j+1)].Value := "Total = ";
ExcelWorksheet2.Range["J"+IntToStr(i+j+1), "J"+IntToStr(i+j+1)].NumberFormat := "#.##0,00";(##0,00);
ExcelWorksheet2.Range["J"+IntToStr(i+j+1), "J"+IntToStr(i+j+1)].FormulaArray := "=SOMA(J3:' + 'J' + IntToStr(i+j) + '))";
// Formata a Altura
ExcelWorksheet2.Range["A"+IntToStr(i+j+1), "A"+IntToStr(i+j+1)].Value := "Altura = ";
ExcelWorksheet2.Range["C"+IntToStr(i+j+1), "C"+IntToStr(i+j+1)].NumberFormat := "0,00";
ExcelWorksheet2.Range["C"+IntToStr(i+j+1), "C"+IntToStr(i+j+1)].Value := ExcelWorksheet1.Range["C"+IntToStr(i+2), "C"+IntToStr(i+2)].Value;
// Cota Piezométrica de Cabeceira
ExcelWorksheet2.Range["A"+IntToStr(i+j+2), "A"+IntToStr(i+j+2)].Value := "Cota Piezométrica de cab.(mca) = ";
ExcelWorksheet2.Range["C"+IntToStr(i+j+2), "C"+IntToStr(i+j+2)].NumberFormat := "0,00";
ExcelWorksheet2.Range["C"+IntToStr(i+j+2), "C"+IntToStr(i+j+2)].Formula := "=C' + IntToStr(i+j+1) + '+' + FloatToStr(tblProjetosCotaReservatorio.Value)";
////////////////////////////////////
// Formata números - VAZÃO MINIMIZADA DA PLANILHA 1
i := (tblTrechos.RecordCount*2)+7;
// Coloca Trecho
ExcelWorksheet2.Range["A"+IntToStr(i), "A"+IntToStr(i)].Value := "Trechos";
// Coloca vazão
ExcelWorksheet2.Range["B"+IntToStr(i), "B"+IntToStr(i)].Value := "Vazão Minimizada";
ExcelWorksheet2.Range["B"+IntToStr(i), "B"+IntToStr(i)].NumberFormat := "0,00";
// Formata números - SOMA DOS COMPRIMENTOS
ExcelWorksheet2.Range["C"+IntToStr(i), "C"+IntToStr(i)].Value := "Comprimento L1";
ExcelWorksheet2.Range["D"+IntToStr(i), "D"+IntToStr(i)].Value := "Comprimento L2";
ExcelWorksheet2.Range["E"+IntToStr(i), "E"+IntToStr(i)].Value := "Soma Lf=(L1+L2)";
ExcelWorksheet2.Range["F"+IntToStr(i), "F"+IntToStr(i)].Value := "Dif. [L-(L1+L2)]";
////////////////////////////////////
k := (tblTrechos.RecordCount*3) + 6;
// Nós
ExcelWorksheet2.Range["A"+IntToStr(k+5), "A"+IntToStr(k+5)].Value := "Nó";
// Altura piezométrica
ExcelWorksheet2.Range["B"+IntToStr(k+5), "B"+IntToStr(k+5)].Value := "Altura Piezométrica";
ExcelWorksheet2.Range["B"+IntToStr(k+6), "B"+IntToStr(k+6)].Value := "(m)";
// Demanda
ExcelWorksheet2.Range["C"+IntToStr(k+5), "C"+IntToStr(k+5)].Value := "Demanda";
ExcelWorksheet2.Range["C"+IntToStr(k+6), "C"+IntToStr(k+6)].Value := "(l/s)";
// Cota do Nó
ExcelWorksheet2.Range["D"+IntToStr(k+5), "D"+IntToStr(k+5)].Value := "Cota do Nó";
ExcelWorksheet2.Range["D"+IntToStr(k+6), "D"+IntToStr(k+6)].Value := "(m)";
// Pressão Disponível
ExcelWorksheet2.Range["E"+IntToStr(k+5), "E"+IntToStr(k+5)].Value := "Pressão Disponível";
ExcelWorksheet2.Range["E"+IntToStr(k+6), "E"+IntToStr(k+6)].Value := "(mca)";
// Equação da Continuidade
ExcelWorksheet2.Range["F"+IntToStr(k+5), "F"+IntToStr(k+5)].Value := "Equação da Cont.";
ExcelWorksheet2.Range["F"+IntToStr(k+6), "F"+IntToStr(k+6)].Value := "";
// conservação da energia nos Anéis
ExcelWorksheet2.Range["G"+IntToStr(k+5), "G"+IntToStr(k+5)].Value := "Equação da Cons.";
ExcelWorksheet2.Range["G"+IntToStr(k+6), "G"+IntToStr(k+6)].Value := "de Energia";
// Equação da Continuidade
ExcelWorksheet2.Range["H"+IntToStr(k+7), "H"+IntToStr(k+7)].Value := "Anel 1";
ExcelWorksheet2.Range["H"+IntToStr(k+8), "H"+IntToStr(k+8)].Value := "Anel 2";
if tblProjetosCaixaConcreto.Value = True then
begin
// Custo do Concreto
ExcelWorksheet2.Range["I"+IntToStr(k+6), "I"+IntToStr(k+6)].Value := "Custo do Concreto";
ExcelWorksheet2.Range["I"+IntToStr(k+7), "I"+IntToStr(k+7)].Value := "(R$/m3)";
ExcelWorksheet2.Range["I"+IntToStr(k+8), "I"+IntToStr(k+8)].NumberFormat := "#.##0,00";(##0,00);
ExcelWorksheet2.Range["I"+IntToStr(k+8), "I"+IntToStr(k+8)].Value := tblProjetosCustoConcreto.Value;
// Vol. de Conc. da Caixa D'Água
ExcelWorksheet2.Range["J"+IntToStr(k+6), "J"+IntToStr(k+6)].Value := "Caixa D'Água";
ExcelWorksheet2.Range["J"+IntToStr(k+7), "J"+IntToStr(k+7)].Value := "(m3)";
ExcelWorksheet2.Range["J"+IntToStr(k+8), "J"+IntToStr(k+8)].NumberFormat := "0,00";
ExcelWorksheet2.Range["J"+IntToStr(k+8), "J"+IntToStr(k+8)].Value := tblProjetosVolumeCaixaConcreto.Value;
// Pilar + Fundação + Estrutura
ExcelWorksheet2.Range["I"+IntToStr(k+10), "I"+IntToStr(k+10)].Value := "Pilar + Fundação";
ExcelWorksheet2.Range["I"+IntToStr(k+11), "I"+IntToStr(k+11)].Value := "(m3)";
ExcelWorksheet2.Range["I"+IntToStr(k+12), "I"+IntToStr(k+12)].NumberFormat := "0,00";
ExcelWorksheet2.Range["I"+IntToStr(k+12), "I"+IntToStr(k+12)].Formula := "=2.2928*EXP(0.1221*C' + IntToStr(tblTrechos.RecordCount*2)+3) + '";
// Custo da Estrutura
ExcelWorksheet2.Range["J"+IntToStr(k+10), "J"+IntToStr(k+10)].Value := "Custo da Estrutura";
ExcelWorksheet2.Range["J"+IntToStr(k+11), "J"+IntToStr(k+11)].Value := "(R$)";
ExcelWorksheet2.Range["J"+IntToStr(k+12), "J"+IntToStr(k+12)].NumberFormat := "#.##0,00";(##0,00);
ExcelWorksheet2.Range["J"+IntToStr(k+12), "J"+IntToStr(k+12)].Formula := "=(I' + IntToStr(k+12) + '+' + J' + IntToStr(k+8) + ')*I' + IntToStr(k+8);
end
else
begin
// Custo do Concreto
ExcelWorksheet2.Range["I"+IntToStr(k+6), "I"+IntToStr(k+6)].Value := "";
ExcelWorksheet2.Range["I"+IntToStr(k+7), "I"+IntToStr(k+7)].Value := "";
ExcelWorksheet2.Range["I"+IntToStr(k+8), "I"+IntToStr(k+8)].Value := "";
// Vol. de Conc. da Caixa D'Água

```

```

ExcelWorksheet2.Range['J'+ IntToStr(k+6), 'J'+ IntToStr(k+6)].Value := "";
ExcelWorksheet2.Range['J'+ IntToStr(k+7), 'J'+ IntToStr(k+7)].Value := "";
ExcelWorksheet2.Range['J'+ IntToStr(k+8), 'J'+ IntToStr(k+8)].Value := "";
// Pilar + Fundação + Estrutura
ExcelWorksheet2.Range['I'+ IntToStr(k+10), 'I'+ IntToStr(k+10)].Value := "";
ExcelWorksheet2.Range['I'+ IntToStr(k+11), 'I'+ IntToStr(k+11)].Value := "";
ExcelWorksheet2.Range['I'+ IntToStr(k+12), 'I'+ IntToStr(k+12)].Value := "";
// Custo da Estrutura
ExcelWorksheet2.Range['J'+ IntToStr(k+10), 'J'+ IntToStr(k+10)].Value := "";
ExcelWorksheet2.Range['J'+ IntToStr(k+11), 'J'+ IntToStr(k+11)].Value := "";
ExcelWorksheet2.Range['J'+ IntToStr(k+12), 'J'+ IntToStr(k+12)].Value := "";
end;
////////////////////////////////////
tblNos.First; k := k + 6;
for i := 1 to tblNos.RecordCount do
begin
    // Nós
    ExcelWorksheet2.Range['A'+ IntToStr(i+k), 'A'+ IntToStr(i+k)].Value := IntToStr(i);
    // Altura piezométrica
    ExcelWorksheet2.Range['B'+ IntToStr(i+k), 'B'+ IntToStr(i+k)].NumberFormat := '0,00';
    ExcelWorksheet2.Range['B'+ IntToStr(i+k), 'B'+ IntToStr(i+k)].Formula := '=' + tblNosEqAlturaPiezometrica2.Value;
    // Demanda
    ExcelWorksheet2.Range['C'+ IntToStr(i+k), 'C'+ IntToStr(i+k)].NumberFormat := '0,00';
    ExcelWorksheet2.Range['C'+ IntToStr(i+k), 'C'+ IntToStr(i+k)].Value := tblNosVazao.Value;
    // Cota do Nó
    ExcelWorksheet2.Range['D'+ IntToStr(i+k), 'D'+ IntToStr(i+k)].NumberFormat := '0,00';
    ExcelWorksheet2.Range['D'+ IntToStr(i+k), 'D'+ IntToStr(i+k)].Value := tblNosCota.Value;
    // Pressão Disponível
    ExcelWorksheet2.Range['E'+ IntToStr(i+k), 'E'+ IntToStr(i+k)].NumberFormat := '0,00';
    ExcelWorksheet2.Range['E'+ IntToStr(i+k), 'E'+ IntToStr(i+k)].Formula := '=B'+ IntToStr(i+k) + '-D'+ IntToStr(i+k);
    // Equação da Continuidade
    ExcelWorksheet2.Range['F'+ IntToStr(i+k), 'F'+ IntToStr(i+k)].NumberFormat := '0,00';
    ExcelWorksheet2.Range['F'+ IntToStr(i+k), 'F'+ IntToStr(i+k)].FormulaArray := '=' + Incrementar(tblNosEqContinuidade.Value,
(tblTrechos.RecordCount*2+6));
    tblNos.Next;
end;
////////////////////////////////////
i := (tblTrechos.RecordCount*3) + tblNos.RecordCount + 13;
j := tblTrechos.RecordCount + tblNos.RecordCount + 14;
// Cota do Terreno
ExcelWorksheet2.Range['B'+ IntToStr(i+2), 'B'+ IntToStr(i+2)].Value := 'Cota do';
ExcelWorksheet2.Range['B'+ IntToStr(i+3), 'B'+ IntToStr(i+3)].Value := 'Terreno';
ExcelWorksheet2.Range['B'+ IntToStr(i+4), 'B'+ IntToStr(i+4)].Value := '(m)';
ExcelWorksheet2.Range['B'+ IntToStr(i+5), 'B'+ IntToStr(i+5)].NumberFormat := '0,00';
ExcelWorksheet2.Range['B'+ IntToStr(i+5), 'B'+ IntToStr(i+5)].Value := tblProjetosCotaReservatorio.Value;
// Horas de Bombeamento
ExcelWorksheet2.Range['C'+ IntToStr(i+2), 'C'+ IntToStr(i+2)].Value := 'Horas de';
ExcelWorksheet2.Range['C'+ IntToStr(i+3), 'C'+ IntToStr(i+3)].Value := 'Bombeamento';
ExcelWorksheet2.Range['C'+ IntToStr(i+4), 'C'+ IntToStr(i+4)].Value := '(h)';
ExcelWorksheet2.Range['C'+ IntToStr(i+5), 'C'+ IntToStr(i+5)].NumberFormat := '0,0';
ExcelWorksheet2.Range['C'+ IntToStr(i+5), 'C'+ IntToStr(i+5)].Value := ExcelWorksheet1.Range['C'+ IntToStr(j), 'C'+ IntToStr(j)].Value;
// Custo do KWh
ExcelWorksheet2.Range['D'+ IntToStr(i+2), 'D'+ IntToStr(i+2)].Value := 'Custo do';
ExcelWorksheet2.Range['D'+ IntToStr(i+3), 'D'+ IntToStr(i+3)].Value := 'kWh';
ExcelWorksheet2.Range['D'+ IntToStr(i+4), 'D'+ IntToStr(i+4)].Value := '(R$)';
ExcelWorksheet2.Range['D'+ IntToStr(i+5), 'D'+ IntToStr(i+5)].NumberFormat := '#,##0,00_';(##0,00);
ExcelWorksheet2.Range['D'+ IntToStr(i+5), 'D'+ IntToStr(i+5)].Value := tblProjetosCustoKWH.Value;
// Rendimento do Bombeamento
ExcelWorksheet2.Range['E'+ IntToStr(i+2), 'E'+ IntToStr(i+2)].Value := 'Rendimento do';
ExcelWorksheet2.Range['E'+ IntToStr(i+3), 'E'+ IntToStr(i+3)].Value := 'Bombeamento';
ExcelWorksheet2.Range['E'+ IntToStr(i+4), 'E'+ IntToStr(i+4)].Value := '%';
ExcelWorksheet2.Range['E'+ IntToStr(i+5), 'E'+ IntToStr(i+5)].NumberFormat := '0,00';
ExcelWorksheet2.Range['E'+ IntToStr(i+5), 'E'+ IntToStr(i+5)].Value := tblProjetosRendimento.Value;
// Custo Anual unitário de Energias Elétrica
ExcelWorksheet2.Range['F'+ IntToStr(i+2), 'F'+ IntToStr(i+2)].Value := 'Custo Anual Unit.';
ExcelWorksheet2.Range['F'+ IntToStr(i+3), 'F'+ IntToStr(i+3)].Value := 'de Energ. Elét.';
ExcelWorksheet2.Range['F'+ IntToStr(i+4), 'F'+ IntToStr(i+4)].Value := '(R$/m)';
ExcelWorksheet2.Range['F'+ IntToStr(i+5), 'F'+ IntToStr(i+5)].NumberFormat := '#,##0,00_';(##0,00);
ExcelWorksheet2.Range['F'+ IntToStr(i+5), 'F'+ IntToStr(i+5)].Value := ExcelWorksheet1.Range['F'+ IntToStr(j), 'F'+ IntToStr(j)].Value;
// Custo Anual do KWh
ExcelWorksheet2.Range['G'+ IntToStr(i+2), 'G'+ IntToStr(i+2)].Value := 'Custo de';
ExcelWorksheet2.Range['G'+ IntToStr(i+3), 'G'+ IntToStr(i+3)].Value := 'Energia Elét.';
ExcelWorksheet2.Range['G'+ IntToStr(i+4), 'G'+ IntToStr(i+4)].Value := '(R$)';
ExcelWorksheet2.Range['G'+ IntToStr(i+5), 'G'+ IntToStr(i+5)].NumberFormat := '#,##0,00_';(##0,00);
ExcelWorksheet2.Range['G'+ IntToStr(i+5), 'G'+ IntToStr(i+5)].Formula := '=F'+ IntToStr(i+5) + '*C'+ IntToStr(i+5) +
IntToStr(tblTrechos.RecordCount*2+3);
if tblProjetosCaixaConcreto.Value = True then
begin
    // Custo Total do Sistema de Bombeamento
    ExcelWorksheet2.Range['H'+ IntToStr(i+2), 'H'+ IntToStr(i+2)].Value := 'Custo Total';
    ExcelWorksheet2.Range['H'+ IntToStr(i+3), 'H'+ IntToStr(i+3)].Value := 'do Sistema';
    ExcelWorksheet2.Range['H'+ IntToStr(i+4), 'H'+ IntToStr(i+4)].Value := '(R$)';
    ExcelWorksheet2.Range['H'+ IntToStr(i+5), 'H'+ IntToStr(i+5)].NumberFormat := '#,##0,00_';(##0,00);
    ExcelWorksheet2.Range['H'+ IntToStr(i+5), 'H'+ IntToStr(i+5)].Formula := '=J'+ IntToStr((tblTrechos.RecordCount*2)+3) + '+J'+
IntToStr(tblTrechos.RecordCount*3+18) + '+G'+ IntToStr(i+5);

```

```

end
else
begin
    // Custo Total do Sistema de Bombeamento
    ExcelWorksheet2.Range['H'+ IntToStr(i+2), 'H'+ IntToStr(i+2)].Value := 'Custo Total';
    ExcelWorksheet2.Range['H'+ IntToStr(i+3), 'H'+ IntToStr(i+3)].Value := 'do Sistema';
    ExcelWorksheet2.Range['H'+ IntToStr(i+4), 'H'+ IntToStr(i+4)].Value := '(R$)';
    ExcelWorksheet2.Range['H'+ IntToStr(i+5), 'H'+ IntToStr(i+5)].NumberFormat := '#,##0,00_';(##0,00);
    ExcelWorksheet2.Range['H'+ IntToStr(i+5), 'H'+ IntToStr(i+5)].Formula := '=J'+ IntToStr((tblTrechos.RecordCount*2)+3) + '+G'+
IntToStr(i+5);
end;
////////////////////////////////////
ExcelWorksheet2.SaveAs(Arquivo);
//ExcelApplication1.Workbooks.Close(Icid);
//ExcelWorksheet1.Disconnect;
//ExcelApplication2.Workbooks.Close(Icid);
//ExcelWorksheet2.Disconnect;
////////////////////////////////////
end;

procedure TfrmCalcularProjeto.FormCreate(Sender: TObject);
begin
    tblProjetos.Open;
    tblTrechos.Open;
    tblNos.Open;
    sqlDiametros.Open;
end;

procedure TfrmCalcularProjeto.BitBtn1Click(Sender: TObject);
begin
    frmCalcularProjeto.Tag := 1;
    Application.CreateForm(TfrmDadosProjeto, frmDadosProjeto);
    frmCalcularProjeto.Enabled := False;
end;

procedure TfrmCalcularProjeto.butRelatorioClick(Sender: TObject);
begin
    if Localizar = False then Exit;
    with TqrRelOperacao.Create(Self) do
    begin
        with sqlCustosOperacao do
        begin
            Close;
            SQL.Clear;
            SQL.Add('SELECT * FROM Custos_Operacao WHERE CodProjeto="" + frmPrincipal.CodProjeto + "" ORDER BY Registros');
            Prepare;
            Open;
            if RecordCount <= 0 then
            begin
                Application.MessageBox('Os custos de operação deste projeto ainda não foram calculados!',
                'Atenção', MB_ICONINFORMATION);
            end
            else
            begin
                PreviewModal;
            end;
        end;
    end;
    //
    Destroy;
end;
end;

procedure TfrmCalcularProjeto.Timer1Timer(Sender: TObject);
begin
    if frmPrincipal.CodProjeto = '' then
    begin
        frmCalcularProjeto.Caption := 'Entrada de Dados e Cálculos do Projeto';
    end
    else
    begin
        frmCalcularProjeto.Caption :=
        'Projeto' + frmPrincipal.CodProjeto + ' - ' + tblProjetosDescricao.Value;
    end;
end;

procedure TfrmCalcularProjeto.FormClose(Sender: TObject;
var Action: TCloseAction);
begin
    frmPrincipal.DadosCalculos1.Enabled := True;
end;

procedure TfrmCalcularProjeto.butDiametrosClick(Sender: TObject);
begin
    if Localizar = False then Exit;
    Application.CreateForm(TfrmDiametros, frmDiametros);

```

```
    frmCalcularProjeto.Enabled := False;  
end;  
  
procedure TfrmCalcularProjeto.butCurvaTendenciaClick(Sender: TObject);  
begin  
    if Localizar = False then Exit;  
    Application.CreateForm(TfrmCustoDiametros, frmCustoDiametros);  
    frmCalcularProjeto.Enabled := False;  
end;
```

ANEXOS

ANEXO A - Tabelas de Censos Demográficos do Brasil

Neste Anexo encontram-se as seguintes tabelas:

Tabela A.1 - Censo Demográfico do ano de 1991 - Média de moradores por domicílio e por situação (urbana e rural), segundo as unidades territoriais;

Tabela A.2 - Censo Demográfico de 2000 - População residente, por situação do domicílio e sexo, segundo as Grandes Regiões e as Unidades da Federação - Brasil-Grandes Regiões;

Tabela A.3 - Estimativas das populações residentes, em 1º de julho de 2001 e 2002, segundo o Brasil, Grandes Regiões e Unidades da Federação.

Tabela A.1 - Censo Demográfico do ano de 1991 - Média de moradores por domicílio e por situação (urbana e rural), segundo as unidades territoriais.

Grandes Regiões e Unidades da Federação	População residente			
	Situação do sexo e domicílio			
	Mulheres		Homens	
	Rural	Urbana	Rural	Urbana
<i>Brasil</i>	17.203.619	57.136.734	18.630.866	53.854.256
<i>Norte</i>	1.922.001	3.011.147	2.185.981	2.911.427
Rondônia	217.395	328.802	255.970	330.525
Acre	73.805	132.339	85.393	126.181
Amazonas	281.154	761.424	319.335	741.330
Roraima	27.462	69.924	49.303	70.894
Pará	1.115.885	1.331.753	1.237.787	1.264.635
Amapá	26.098	118.112	29.168	116.019
Tocantins	180.202	268.793	209.025	261.843
<i>Nordeste</i>	8.191.812	13.522.436	8.529.449	12.253.843
Maranhão	1.454.179	1.029.209	1.503.653	943.212
Piauí	593.799	727.060	621.154	640.124
Ceará	1.078.445	2.197.959	1.126.195	1.964.048
Rio Grande do Norte	361.684	875.165	384.616	794.102
Paraíba	568.980	1.085.577	580.068	966.489
Pernambuco	1.026.730	2.658.409	1.049.471	2.393.245
Alagoas	509.918	775.679	522.149	706.354
Sergipe	238.594	522.777	250.405	480.100
Bahia	2.359.483	3.650.601	2.491.738	3.366.169
<i>Sudeste</i>	3.559.664	28.288.206	3.954.754	26.937.777
Minas Gerais	1.879.532	6.060.236	2.076.727	5.726.657
Espírito Santo	319.183	983.878	356.847	940.710
Rio de Janeiro	288.630	6.341.475	319.435	5.858.166
São Paulo	1.072.319	14.902.617	1.201.745	14.412.244
<i>Sul</i>	2.733.044	8.416.760	2.993.301	7.986.272
Paraná	1.071.531	3.169.368	1.179.229	3.028.585
Santa Catarina	638.447	1.627.833	695.010	1.580.704
Rio Grande do Sul	1.023.066	3.619.559	1.119.062	3.376.983
<i>Centro-Oeste</i>	797.098	3.898.185	967.381	3.764.937
Mato Grosso do Sul	166.107	715.231	199.819	699.216
Mato Grosso	241.036	736.967	301.085	748.143
Goiás	350.124	1.653.274	421.103	1.594.402
Distrito Federal	39.831	792.713	45.374	723.176

Fonte: <http://www1.ibge.gov.br/home/estatistica/população/censodem/tab202.shtm>

Tabela A.1 - Censo Demográfico do ano de 1991 - Média de moradores por domicílio e por situação (urbana e rural), segundo as unidades territoriais.

Grandes Regiões e Unidades da Federação	População residente			
	Situação do sexo e domicílio			
	Mulheres		Homens	
	Rural	Urbana	Rural	Urbana
<i>Brasil</i>	17.203.619	57.136.734	18.630.866	53.854.256
<i>Norte</i>	1.922.001	3.011.147	2.185.981	2.911.427
Rondônia	217.395	328.802	255.970	330.525
Acre	73.805	132.339	85.393	126.181
Amazonas	281.154	761.424	319.335	741.330
Roraima	27.462	69.924	49.303	70.894
Pará	1.115.885	1.331.753	1.237.787	1.264.635
Amapá	26.098	118.112	29.168	116.019
Tocantins	180.202	268.793	209.025	261.843
<i>Nordeste</i>	8.191.812	13.522.436	8.529.449	12.253.843
Maranhão	1.454.179	1.029.209	1.503.653	943.212
Piauí	593.799	727.060	621.154	640.124
Ceará	1.078.445	2.197.959	1.126.195	1.964.048
Rio Grande do Norte	361.684	875.165	384.616	794.102
Paraíba	568.980	1.085.577	580.068	966.489
Pernambuco	1.026.730	2.658.409	1.049.471	2.393.245
Alagoas	509.918	775.679	522.149	706.354
Sergipe	238.594	522.777	250.405	480.100
Bahia	2.359.483	3.650.601	2.491.738	3.366.169
<i>Sudeste</i>	3.559.664	28.288.206	3.954.754	26.937.777
Minas Gerais	1.879.532	6.060.236	2.076.727	5.726.657
Espírito Santo	319.183	983.878	356.847	940.710
Rio de Janeiro	288.630	6.341.475	319.435	5.858.166
São Paulo	1.072.319	14.902.617	1.201.745	14.412.244
<i>Sul</i>	2.733.044	8.416.760	2.993.301	7.986.272
Paraná	1.071.531	3.169.368	1.179.229	3.028.585
Santa Catarina	638.447	1.627.833	695.010	1.580.704
Rio Grande do Sul	1.023.066	3.619.559	1.119.062	3.376.983
<i>Centro-Oeste</i>	797.098	3.898.185	967.381	3.764.937
Mato Grosso do Sul	166.107	715.231	199.819	699.216
Mato Grosso	241.036	736.967	301.085	748.143
Goiás	350.124	1.653.274	421.103	1.594.402
Distrito Federal	39.831	792.713	45.374	723.176

Fonte: <http://www1.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censodem/tab202.shtm>

Tabela A.2 - Censo Demográfico do ano de 2000 - População residente, por situação do domicílio e sexo, segundo as Grandes Regiões e as Unidades da Federação

Grandes Regiões e Unidades da Federação	População residente								
	Total	Homens	Mulheres	Situação do domicílio e sexo					
				Urbana			Rural		
				Total	Homens	Mulheres	Total	Homens	Mulheres
Brasil	169 799 170	83 576 015	86 223 155	137 953 959	66 882 993	71 070 966	31 845 211	16 693 022	15 152 189
Região Norte	12 900 704	6 533 555	6 367 149	9 014 365	4 441 624	4 572 741	3 886 339	2 091 931	1 794 408
Rorônia	1 379 787	708 140	671 647	884 523	439 714	444 809	495 264	268 426	226 838
Acre	557 526	280 983	276 543	370 267	180 190	190 077	187 259	100 793	86 466
Amazonas	2 812 557	1 414 367	1 398 190	2 107 222	1 040 516	1 066 706	705 335	373 851	331 484
Roraima	324 397	166 037	158 360	247 016	123 929	123 087	77 381	42 108	35 273
Pará	6 192 307	3 132 768	3 059 539	4 120 693	2 018 235	2 102 458	2 071 614	1 114 533	957 081
Amapá	477 032	239 453	237 579	424 683	210 950	213 733	52 349	28 503	23 846
Tocantins	1 157 098	591 807	565 291	859 961	428 090	431 871	297 137	163 717	133 420
Região Nordeste	47 741 711	23 413 914	24 327 797	32 975 425	15 779 168	17 196 257	14 766 286	7 634 746	7 131 540
Maranhão	5 651 475	2 812 681	2 838 794	3 364 070	1 617 868	1 746 202	2 287 405	1 194 813	1 092 592
Piauí	2 843 278	1 398 290	1 444 988	1 788 590	849 974	938 616	1 054 688	548 316	506 372
Ceará	7 430 661	3 628 474	3 802 187	5 315 318	2 537 472	2 777 846	2 115 343	1 091 002	1 024 341
Rio Grande do Norte	2 776 782	1 359 953	1 416 829	2 036 673	976 797	1 059 876	740 109	383 156	356 953
Paraíba	3 443 825	1 671 978	1 771 847	2 447 212	1 163 908	1 283 304	996 613	508 070	488 543
Pernambuco	7 918 344	3 826 657	4 091 687	6 058 249	2 874 992	3 183 257	1 860 095	951 665	908 430
Alagoas	2 822 621	1 378 942	1 443 679	1 919 739	919 168	1 000 571	902 882	459 774	443 108
Sergipe	1 784 475	874 906	909 569	1 273 226	611 067	662 159	511 249	263 839	247 410
Bahia	13 070 250	6 462 033	6 608 217	8 772 348	4 227 922	4 544 426	4 297 902	2 234 111	2 063 791
Região Sudeste	72 412 411	35 426 091	36 986 320	65 549 194	31 810 179	33 739 015	6 863 217	3 615 912	3 247 305
Minas Gerais	17 891 494	8 851 587	9 039 907	14 671 828	7 144 898	7 526 930	3 219 666	1 706 689	1 512 977
Espírito Santo	3 097 232	1 534 806	1 562 426	2 463 049	1 199 740	1 263 309	634 183	335 066	299 117
Rio de Janeiro	14 391 282	6 900 335	7 490 947	13 821 466	6 603 891	7 217 575	569 816	296 444	273 372
São Paulo	37 032 403	18 139 363	18 893 040	34 592 851	16 861 650	17 731 201	2 439 552	1 277 713	1 161 839
Região Sul	25 107 616	12 401 450	12 706 166	20 321 999	9 896 617	10 425 382	4 785 617	2 504 833	2 280 784
Paraná	9 563 458	4 737 420	4 826 038	7 786 084	3 802 017	3 984 067	1 777 374	935 403	841 971
Santa Catarina	5 356 360	2 669 311	2 687 049	4 217 931	2 076 216	2 141 715	1 138 429	593 095	545 334
Rio Grande do Sul	10 187 798	4 994 719	5 193 079	8 317 984	4 018 384	4 299 600	1 869 814	976 335	893 479
Região Centro-Oeste	11 636 728	5 801 005	5 835 723	10 092 976	4 955 405	5 137 571	1 543 752	845 600	698 152
Mato Grosso do Sul	2 078 001	1 040 024	1 037 977	1 747 106	860 969	886 137	330 895	179 055	151 840
Mato Grosso	2 504 353	1 287 187	1 217 166	1 987 726	999 831	987 895	516 627	287 356	229 271
Goiás	5 003 228	2 492 438	2 510 790	4 396 645	2 160 766	2 235 879	606 583	331 672	274 911
Distrito Federal	2 051 146	981 356	1 069 790	1 961 499	933 839	1 027 660	89 647	47 517	42 130

Fonte <http://www1.ibge.gov.Br/home/estatistica/população/tabelagrandesregiões211.shtm>

Tabela A.3 - Estimativas das populações residentes, em 1º de julho de 2001 e 2002, segundo o Brasil, Grandes Regiões e Unidades da Federação.

Grandes Regiões e Unidades da Federação	POP-2001	POP-2002
<i>Brasil</i>	<i>172.385.826</i>	<i>174.632.960</i>
<i>Região Norte</i>	<i>13.245.084</i>	<i>13.504.599</i>
Rondônia	1.407.888	1.431.777
Acre	574.355	586.942
Amazonas	2.900.240	2.961.801
Roraima	337.237	346.871
Pará	6.341.736	6.453.683
Amapá	498.735	516.511
Tocantins	1.184.895	1.207.014
<i>Região Nordeste</i>	<i>48.331.186</i>	<i>48.845.112</i>
Maranhão	5.730.467	5.803.224
Piauí	2.873.010	2.898.223
Ceará	7.547.620	7.654.535
Rio Grande do Norte	2.815.244	2.852.784
Paraíba	3.488.594	3.494.893
Pernambuco	8.008.207	8.084.667
Alagoas	2.856.629	2.887.535
Sergipe	1.817.301	1.846.039
Bahia	13.214.114	13.323.212
<i>Região Sudeste</i>	<i>73.470.763</i>	<i>74.447.456</i>
Minas Gerais	18.127.096	18.343.517
Espírito Santo	3.155.016	3.201.722
Rio de Janeiro	14.556.545	14.724.475
São Paulo	37.630.106	38.177.742
<i>Região Sul</i>	<i>25.453.264</i>	<i>25.734.253</i>
Paraná	9.694.709	9.796.006
Santa Catarina	5.448.736	5.527.707
Rio Grande do Sul	10.309.819	10.408.540
<i>Região Centro-Oeste</i>	<i>11.885.529</i>	<i>12.104.540</i>
Mato Grosso do Sul	2.111.036	2.140.624
Mato Grosso	2.580.584	2.604.742
Goiás	5.116.462	5.210.335
<i>Distrito Federal</i>	<i>2.097.447</i>	<i>2.145.839</i>

Fonte: IBGE, DPE, DPE, Departamento de População e Indicadores Sociais. GEVEP/ESPOP

ANEXO B - Planilhas do Exemplo 5.2.1, Extraído de Gomes (2002)

Neste Anexo encontram-se as seguintes planilhas:

Planilha B.1 - 1ª Etapa - Solução Inicial do Exemplo 5.3.1.

Planilha B.2 - 1ª Etapa - Solução Definitiva do Exemplo 5.3.1.

Planilha B.3 - 2ª Etapa - Solução Inicial do Exemplo 5.3.1.

Planilha B.4 - 2ª Etapa - Solução Definitiva do Exemplo 5.3.1.

ANEXO B - Planilhas do Exemplo 5.3.1 - Extraídas de Gomes (2002)

Planilha B.1 - 1ª Etapa - Solução Inicial do Exemplo 5.3.1

Cálculos hidráulicos e custo da rede									
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
	Trecho	Vazão (l/s)	Diâmetro (mm)	Coef.	Comp. (m)	Perdas (mca)	Custo unit. (R\$/m)	Custo total (R\$)	Vel. (m/s)
5	1	420,43	731,8	130	2.540	3,03	550,7	1.398.767,3	1,00
6	2	188,10	489,5	130	1.230	2,34	287,5	353.582,8	1,00
7	3	140,32	422,8	130	1.430	3,23	226,8	324.382,0	1,00
8	4	60,00	276,5	145	1.300	3,94	114,2	148.403,9	1,00
9	5	85,00	329,1	130	1.490	4,51	151,3	225.398,2	1,00
10	6	147,33	433,2	130	1.210	2,66	236,0	285.507,8	1,00
11	7	103,89	363,8	130	1.460	3,93	177,9	259.752,6	1,00
12	8	63,60	284,0	145	1.190	3,52	119,2	141.854,4	1,00
13		II (m)	24,0			Custo da rede (R\$)		3.137.649,0	
14	Z (m)		54,0						
15									
16	Restrições								
17	Nó	Alt. Piez. (m)	Demanda (l/s)	Cota (m)	P. Disp. (mca)	Eq. Cont.	Eq. cons. de energia		
18									
19	1	50,97	0,00	6,0	44,97	0,00	-5,00		
20	2	48,63	47,78	5,5	43,13	0,00	5,60		
21	3	45,40	80,32	5,5	39,90	0,00			
22	4	46,46	208,60	6,0	40,46	0,00			
23	5	48,32	43,44	4,5	43,82	0,00			
24	6	44,39	40,29	4,0	40,39	0,00			
25									
26	Custo conjunto do Grande Anel								
27	Cota do terreno (m)	Nº de Horas	Custo do kWh (R\$)	Rend do Bomba. (%)	Potência requerida (kW)	C. anual da energia (R\$)	Coef. de atual. "Fa"	Custo ener. atualizado (R\$)	Custo total do sistema (R\$)
28									
29	30,0	7300	0,071	75%	131,98	68.405,95	11,13	761.358,25	3.899.007,29

Planilha B.2 - 1ª Etapa - Solução Otimizada do Exemplo 5.3.1

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
	Trecho	Vazão (l/s)	Diâmetro (mm)	Coef.	Comp. (m)	Perdas (mca)	Custo unit. (R\$/m)	Custo total (R\$)	Vel. (m/s)
5	1	420,43	574,0	130	2.540	9,88	371,8	944.414,7	1,63
6	2	129,94	359,9	130	1.230	5,28	174,8	215.048,1	1,28
7	3	82,16	315,7	130	1.430	4,97	141,5	202.280,4	1,05
8	4	1,84	108,4	145	1.300	0,60	25,1	32.670,7	0,20
9	5	204,91	384,0	130	1.490	10,85	194,1	289.241,4	1,77
10	6	85,57	301,9	130	1.210	5,64	131,6	159.252,3	1,20
11	7	42,13	239,0	145	1.460	4,67	90,2	131.735,4	0,94
12	8	1,84	108,4	145	1.190	0,55	25,1	29.906,2	0,20
13		H (m)	21,7				Custo da rede (R\$)	2.004.549,2	
14		Z.(m)	51,7						

Restrições

17	Nó	Alt. Piez. (m)	Demanda (l/s)	Cota (m)	P. Disp. (mca)	Eq. Cont.	Eq. cons. de energia
18							
19	1	41,85	0,00	6.0	35,85	0,00	0,00
20	2	36,57	47,78	5,5	31,07	0,00	0,00
21	3	31,60	80,32	5.5	26,10	0,00	
22	4	31,00	208,60	6,0	25,00	0,00	
23	5	36,21	43,44	4.5	31,71	0,00	
24	6	31,55	40,29	4.0	27,55	0,00	

Aneel

Ane12

Custo de elevação e distribuição

27	Cota do terreno	Nº de horas	Custo do kWh	Rend do bombea.	Potência Requerida	C anual da energ	Coef. de atual.	Custo ener. atualizado	Custo total do sistema
29	(m)		(R\$)	(%)	(kW)	(R\$)	"Fa"	(R\$)	(R\$)
30	30,0	7300	0,071	75	119,52	61.948,83	11,13	689.490,49	2.694.039,72

Planilha B.3 - 2ª - Etapa - Solução Inicial do Exemplo 5.3.1

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
	Trecho	Comp. (m)	Vazão (l/s)	Diâmetro (mm)	Custo (R\$/m)	Coef.	Perdas (mca)	Perdas no trecho (m)	Preço total (R\$)	Vel (m/s)
5	1	1540	420,43	535,0	349,29	130	8,44	10,76	537.906,6	1,87
6		1000	420,43	638,0	433,37	130	2,32		433.370,0	1,31
7	2	230	129,94	299,8	103,12	145	1,96	5,22	23.717,6	1,84
8		1000	129,94	381,0	225,82	130	3,25		225.820,0	1,14
9	3	1000	82,16	299,8	103,12	145	3,65	4,25	103.120,0	1,16
10		430	82,16	381,0	225,82	130	0,60		97.102,6	0,72
11	4	1300	1,84	108,4	32,80	145	0,60	0,60	42.640,0	0,20
12		0	1,84	156,4	43,41	145	0,00		0,0	1,00
13	5	1400	204,91	381,0	225,82	130	10,59	10,96	316.148,0	1,80
14		90	204,91	432,0	267,66	130	0,37		24.089,4	1,40
15	6	1000	85,57	299,8	103,12	145	3,94	4,25	103.120,0	1,21
16		210	85,57	381,0	225,82	130	0,32		47.422,2	0,75
17	7	700	42,13	204,2	59,24	145	4,82	6,70	41.468,0	1,29
18		760	42,13	252,0	78,52	145	1,88		59.675,2	0,84
19	8	1190	1,84	108,4	32,80	145	0,55	0,55	39.032,0	0,20
20		0	1,84	156,4	43,41	145	0,00		0,0	1,00
21	1	420,43						Custo total da rede (R\$)		2.094.631,6
22	2	129,94								
23	3	82,16					L ₁₁ + L ₁₂ (m)	L ₁ (m)	H - I (m)	
24	4	1,84					2540	2.540	0	
25	5	204,91					1230	1.230	0	
26	6	85,57					1430	1.430	0	
27	7	42,13					1300	1.300	0	
28	8	1,84					1490	1.490	0	
29	H (m)	21,7					1210	1.210	0	
30							1460	1.460	0	
31							1190	1.190	0	
32	Piez. de cabeceira (m)			51,7						
33	Nó	Alt. Piez.	Demanda	Cota	P. disp.	Eq. da	Eq. da			
34		(mca)	(l/s)	(m)	(mca)	contin.	energia			
35	1	40,97	0,00	6,0	34,97	0,00	0,89	Anel 1		
36	2	35,75	47,78	5,5	30,25	0,00	0,54	Anel 2		
37	3	31,50	80,32	5,5	26,00	0,00				
38	4	30,91	208,60	6,0	24,91	0,00				
39	5	30,02	43,44	4,5	25,52	0,00				
40	6	25,76	40,29	4,0	21,76	0,00				
41										
42	Custo de alimentação e distribuição									
43	Coef. de atualização			11,13						
44	Cota do	Nº de	Custo do	Rend.	Potência	C. anual	C.atual.	Custo total		
45	Terreno	horas	kWh	do	requerida	da energia	da energia	do sistema		
46	(m)		(R\$)	bomb.	(kW)	(R\$)	(R\$)	(R\$)		
47	30	7300	0,071	75%	119,52	61.948,83	689.490,49	2.784.122,09		

Planilha B.4 - 2ª Etapa - Solução Definitiva do Exemplo 5.3.1

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
	Trecho	Comp. (m)	Vazão (l/s)	Diâmetro (mm)	Custo (R\$/m)	Coef.	Perdas (mca)	Perdas no trecho (mca)	Preço total (R\$)	Vel. (m/s)
5	1	0	420,43	535,0	349,29	130	0,00	5,90	0,0	1,00
6		2540	420,43	638,0	433,37	130	5,90		1.100.759,8	1,31
7	2	273	129,95	299,8	103,12	145	2,33	5,45	28.183,9	1,84
8		957	129,95	381,0	225,82	130	3,11		216.039,4	1,14
9	3	1430	82,17	299,8	103,12	145	5,22	5,22	147.461,6	1,16
10		0	82,17	381,0	225,82	130	0,00		0,0	1,00
11	4	1300	1,85	108,4	32,80	145	0,60	0,60	42.640,0	0,20
12		0	1,85	156,4	43,41	145	0,00		0,0	1,00
13	5	1490	204,91	381,0	225,82	130	11,27	11,27	336.471,8	1,80
14		0	204,91	432,0	267,66	130	0,00		0,0	1,00
15	6	1210	85,58	299,8	103,12	145	4,77	4,77	124.775,2	1,21
16		0	85,58	381,0	225,82	130	0,00		0,0	1,00
17	7	532	42,14	204,2	59,24	145	3,66	5,95	31.507,5	1,29
18		928	42,14	252,0	78,52	145	2,29		72.877,4	0,84
19	8	1190	1,85	108,4	32,80	145	0,55	0,55	39.032,0	0,20
20		0	1,85	156,4	43,41	145	0,00		0,0	1,00
21	1	420,43						Custo total da rede (R\$)		2.139.748,6
22	2	129,95								
23	3	82,17								
24	4	1,85					1	L ₁ + L ₂ (m)	L ₁ (m)	H - I (m)
25	5	204,91					2	2540	2.540	0
26	6	85,58					3	1230	1.230	0
27	7	42,14					4	1430	1.430	0
28	8	1,85					5	1300	1.300	0
29	H (m)	20,9					6	1490	1.490	0
30							7	1210	1.210	0
31							8	1460	1.460	0
31	Restrições						8	1190	1.190	0
32	Piez. de cabeceira (m)			50,9						
33	Nó	Alt. Piez.	Demanda	Cota	P. disp.	Eq. da	Eq. da			
34		(mca)	(l/s)	(m)	(mca)	Continuid.	energia			
35	1	45,03	0,00	6,0	39,03	0,00	0,00	Anel 1		
36	2	39,59	47,78	5,5	34,09	0,00	0,00	Anel 2		
37	3	34,36	80,32	5,5	28,86	0,00				
38	4	33,77	208,60	6,0	27,77	0,00				
39	5	33,77	43,44	4,5	29,27	0,00				
40	6	29,00	40,29	4,0	25,00	0,00				
41										
42	Custo de alimentação e distribuição									
43	Coef. de atualização			11,13						
44	Cota do	Nº de	Custo do	Rend.	Potência	C. anual	C.atual.			
45	Terreno	horas	kWh	do	requerida	da energia	da energia			
46	(m)		(R\$)	bomb.	(kW)	(R\$)	(R\$)	Custo total		
47	30	7300	0,071	75%	115,15	59.680,20	664.240,65	do sistema		
								(R\$)		
								2.803.989,24		