



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

CURSO DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

CAMPUS II - CAMPINA GRANDE

**SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS DE OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE
DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA ATRAVÉS DO MÉTODO PNL2000**

MARCUS CARLOS COSTA SANTOS

CAMPINA GRANDE

FEVEREIRO - 2002

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
ÁREA DE RECURSOS HÍDRICOS

**SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS DE OPERAÇÃO DE
SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA ATRAVÉS DO
MÉTODO PNL2000**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
MARCUS CARLOS COSTA SANTOS

CAMPINA GRANDE – PARAÍBA

FEVEREIRO 2002

MARCUS CARLOS COSTA SANTOS

**SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS DE OPERAÇÃO DE
SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA ATRAVÉS DO
MÉTODO PNL2000**

Dissertação apresentada ao curso de
Mestrado em Engenharia Civil da
Universidade Federal da Paraíba em
cumprimento às exigências para a
obtenção do Grau de Mestre.

Orientador: Prof.^o Dr. Heber Pimentel Gomes

CAMPINA GRANDE - PARAÍBA
FEVEREIRO, 2002



S237s Santos, Marcus Carlos Costa.
Simulação de cenários de operação de sistemas de distribuição de água através do método PNL2000 / Marcus Carlos Costa Santos. - Campina Grande, 2002.
118 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2002.

"Orientação : Prof. Dr. Helder Pimentel Gomes".
Referências.

1. Água - Abastecimento. 2. Redes de Abastecimento de Água. 3. Método PNL2000. 4. Engenharia Civil - Dissertação. I. Gomes, Helder Pimentel. II. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB). III. Título

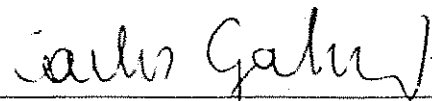
CDU 626.824(043)

**SIMULAÇÃO DE OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO
DE ÁGUA ATRAVÉS DO MÉTODO PNL2000**

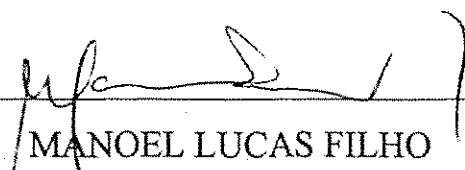
MARCUS CARLOS COSTA SANTOS



HEBER PIMENTEL GOMES
Orientador



CARLOS DE OLIVEIRA GALVÃO
Componente da Banca



MANOEL LUCAS FILHO
Componente da Banca

Aos meus pais, Luiz Carlos e
Belsirene, as minhas irmãs, Vanessa e
Mônica e a minha namorada, Deize,
DEDICO.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela força nos momentos em que precisei para vencer obstáculos difíceis e pela proteção a mim e àqueles que amo;

Aos meus pais, Luiz Carlos de Oliveira Santos e Belsirene Costa Santos, por me oferecerem uma imagem em que pudesse me espelhar e por terem transmitido a mim o que têm de melhor, o amor e honestidade;

Às minhas irmãs, Vanessa Costa Santos e Mônica Costa Santos, que sempre torceram por minha felicidade e sucesso profissional;

À minha namorada, Deize Souza Teixeira, pelo amor, carinho e compreensão durante o período do Curso de Mestrado;

Aos meus familiares, pelo apoio e conselhos nas horas difíceis;

Ao meu orientador, Heber Pimentel Gomes, pelos ensinamentos, experiência e conselhos para que este trabalho de dissertação chegasse ao final com sucesso;

Aos amigos, José Florentino Jr., Leonardo A. Neves, Heline Modesto, Hildeberto Lacerda Jr. e Lucílio Vieira, que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização desta dissertação;

A CAPES, pelo apoio financeiro;

Ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil e aos professores da Área de Engenharia de Recursos Hídricos, pela experiência e conhecimentos adquiridos neste período;

A todos os funcionários do Laboratório de Recursos Hídricos;

E finalmente, a todos aqueles que me deram força para superar dificuldades encontradas neste período de Mestrado.

SUMÁRIO

| | |
|-------------|----|
| RESUMO..... | 12 |
|-------------|----|

| | |
|---------------|----|
| ABSTRACT..... | 13 |
|---------------|----|

CAPÍTULO I

| | |
|-----------------|----|
| INTRODUÇÃO..... | 14 |
|-----------------|----|

CAPÍTULO II

| | |
|---------------------------------------------------------------|----|
| MÉTODOS DE SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO EM REDES PRESSURIZADAS..... | 17 |
|---------------------------------------------------------------|----|

| | |
|----------------------|----|
| 2.1. INTRODUÇÃO..... | 17 |
|----------------------|----|

| | |
|----------------------------|----|
| 2.1.1. Tipos de Redes..... | 19 |
|----------------------------|----|

| | |
|-------------------------------|----|
| 2.1.1.1. Rede Ramificada..... | 20 |
|-------------------------------|----|

| | |
|----------------------------|----|
| 2.1.1.2. Rede Malhada..... | 21 |
|----------------------------|----|

| | |
|------------------------------|----|
| 2.2. PROGRAMAÇÃO LINEAR..... | 22 |
|------------------------------|----|

| | |
|----------------------------------|----|
| 2.3. PROGRAMAÇÃO NÃO LINEAR..... | 23 |
|----------------------------------|----|

| | |
|--------------------------------|----|
| 2.4. PROGRAMAÇÃO DINÂMICA..... | 25 |
|--------------------------------|----|

| | |
|--------------------------------------------|----|
| 2.5. TÉCNICAS DE ENUMERAÇÃO EXAUSTIVA..... | 27 |
|--------------------------------------------|----|

| | |
|------------------------------|----|
| 2.6. ALGORITMO GENÉTICO..... | 29 |
|------------------------------|----|

| | |
|-----------------------------------------------------------------|----|
| 2.7. CONSIDERAÇÕES FINAIS A RESPEITO DOS MÉTODOS DESCRITOS..... | 30 |
|-----------------------------------------------------------------|----|

CAPÍTULO III

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| METODOLOGIA DE SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS DE OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA ATRAVÉS DO MÉTODO PNL2000..... | 33 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1. INTRODUÇÃO..... | 33 |
| 3.2. DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA DO PNL 2000 – DIMENSIONAMENTO ECONÔMICO DE REDES MALHADAS..... | 34 |
| 3.2.1. Primeira Etapa do Método..... | 36 |
| 3.2.1.1. Função Objetivo..... | 37 |
| 3.2.1.2. Restrições..... | 38 |
| 3.2.2. Segunda Etapa do Método..... | 40 |
| 3.2.2.1. Função Objetivo..... | 40 |
| 3.2.2.2. Restrições..... | 41 |
| 3.3. ADAPTAÇÃO DO MÉTODO PNL2000 PARA A SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS DE OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA..... | 42 |
| 3.3.1. Função Objetivo em Simulações de Cenários..... | 44 |
| 3.3.2. Restrições..... | 44 |
| CAPÍTULO IV | |
| RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 47 |
| 4.1. EXEMPLOS DE APLICAÇÃO..... | 47 |
| 4.1.1. Grande Anel da Rede de Distribuição de Água da cidade de Recife-PE..... | 48 |
| 4.1.1.1. Resultado através do WADISO..... | 51 |
| 4.1.1.2. Resultados através do método PNL2000..... | 53 |
| 4.1.2. Setor 11 do Perímetro Irrigado Senador Nilo Coelho..... | 76 |
| 4.1.2.1. Resultados através do método Granados..... | 79 |
| 4.1.2.2. Resultados através do método PNL2000 com dados da ENCO- TAJAL – CENÁRIO 1..... | 83 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.1.2.2.1. Etapa 1..... | 87 |
| 4.1.2.2.2. Etapa 2..... | 92 |
| 4.1.2.3. Resultados através do método PNL2000 com dados de GOMES* - CENÁRIO 2..... | 99 |
| 4.1.2.3.1. Etapa 1..... | 101 |
| 4.1.2.3.2. Etapa 2..... | 104 |
| 4.1.2.4. Resultados através do método PNL2000 com dados de GOMES* - para cenários diversos..... | 110 |

CAPÍTULO V

| | |
|---------------------------------|-----|
| CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES..... | 112 |
|---------------------------------|-----|

| | |
|---------------------------------|-----|
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 114 |
|---------------------------------|-----|

LISTA DE TABELAS

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 4.1: Dados do Grande Anel fornecidos pela COMPESA em 1999..... | 49 |
| Tabela 4.2: Resultados obtidos após simulação no WADISO..... | 51 |
| Tabela 4.3: Planilha inicial do Grande Anel de Distribuição da cidade de Recife-PE..... | 56 |
| Tabela 4.4: Resultados obtidos após simulação com o método PNL2000 para Equilíbrio da rede – <i>cenário A</i> | 60 |
| Tabela 4.5: Resultados obtidos após simulação com o método PNL2000 com restrição de pressão igual ou superior a 15 m.c.a. e menor ou igual a 50 m.c.a. – <i>cenário B</i> | 64 |
| Tabela 4.6: Resultados obtidos após simulação com o método PNL2000 com demandas nulas em alguns nós – <i>cenário C</i> | 69 |
| Tabela 4.7: Resultados obtidos após simulação com o método PNL2000 com o acréscimo de demandas em alguns nós – <i>cenário D</i> | 72 |
| Tabela 4.8: Dados originais referentes à rede de distribuição do Setor 11 calculados pela ENCO-TAJAL..... | 78 |
| Tabela 4.9: Vazão e pressão por parcela de projeto e do período de maior consumo..... | 80 |
| Tabela 4.10: Preço da tubulação conforme Classe..... | 81 |
| Tabela 4.11: Tabela com diâmetros calculados pela ENCO-TAJAL e por GOMES (1997)..... | 81 |
| Tabela 4.12: Planilha inicial do Perímetro Irrigado com dados da ENCO-TAJAL sem o uso da ferramenta Solver..... | 86 |
| Tabela 4.13: Resultado obtido através do método PNL2000 com os dados do projeto original da ENCO-TAJAL na etapa 1..... | 91 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 4.14: Resultado obtido através do método PNL2000 com os dados do projeto original da ENCO-TAJAL na etapa 2..... | 96 |
| Tabela 4.15: Comparação entre ENCO-TAJAL x GOMES x <i>CENÁRIO 1</i> | 99 |
| Tabela 4.16: Planilha inicial do Perímetro Irrigado Senador Nilo Coelho com dados de GOMES (1997) sem o uso da ferramenta Solver..... | 100 |
| Tabela 4.17: Resultado obtido através do método PNL2000 com os dados de GOMES (1997) na etapa 1..... | 103 |
| Tabela 4.18: Resultado obtido através do método PNL2000 com os dados de GOMES (1997) na etapa 2..... | 106 |
| Tabela 4.19: Comparação entre GOMES* x <i>CENÁRIO 2</i> | 109 |
| Tabela 4.20: Comparação entre GOMES x <i>CENÁRIO 3</i> | 109 |
| Tabela 4.21: Resultado da simulação do <i>cenário 5</i> através do método PNL2000..... | 111 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 2.1: Esquema de uma Rede Ramificada (PORTO, 1999)..... | 20 |
| Figura 2.2: Esquema de uma Rede Malhada (PORTO, 1999)..... | 21 |
| Figura 2.3: Curva de máximos e mínimos da função $f(x)$ (FORMIGA, 1999)..... | 25 |
| Figura 2.4: Curva que representa a otimização conjunta de uma rede de distribuição..... | 27 |
| Figura 3.1: Layout do Método PNL2000 editado através da Planilha Eletrônica do Excel..... | 35 |
| Figura 4.1: esquema do Grande Anel da Rede de Distribuição de Água da cidade de Recife-PE (COMPESA)..... | 49 |
| Figura 4.2: Caixa de Parâmetros do Solver a serem otimizados no equilíbrio da rede..... | 59 |
| Figura 4.3: Caixa de Parâmetros da ferramenta Solver a serem otimizados para pressões superiores a 15 m.c.a. da rede..... | 64 |
| Figura 4.4: Caixa de Parâmetros da ferramenta Solver a serem otimizados para Demandas nulas em alguns nós..... | 68 |
| Figura 4.5: Esquema do Setor 11 do Perimetro Irrigado Senador Nilo Coelho..... | 78 |
| Figura 4.6: Gráfico de relação Custo x Diâmetro Classe 15..... | 84 |
| Figura 4.7: Gráfico de relação Custo x Diâmetro Classe 20..... | 84 |
| Figura 4.8: Gráfico de relação Custo x Diâmetro Classe 25..... | 84 |
| Figura 4.9: Caixa de Parâmetros do Solver simulando o redimensionamento da rede na etapa 1 (ENCO-TAJAL)..... | 90 |
| Figura 4.10: Caixa de Parâmetros do Solver simulando o redimensionamento da rede na etapa 2 (ENCO-TAJAL)..... | 95 |
| Figura 4.11: Caixa de Parâmetros do Solver simulando o redimensionamento da rede na etapa 1 (GOMES)..... | 102 |
| Figura 4.12: Caixa de Parâmetros do Solver simulando o redimensionamento da rede na etapa 2 (GOMES)..... | 105 |

RESUMO

A operação de sistemas de distribuição de água vem assumindo a cada dia uma maior importância junto às empresas de saneamento e aos usuários de estruturas de irrigação. Isto tem como justificativa o custo da manutenção de redes ramificadas ou malhadas e a disponibilidade da água, que em determinadas regiões é cada vez menor. Desta forma, a simulação desta atividade, tem papel fundamental tanto no campo econômico quanto no social. A metodologia adotada neste trabalho de dissertação foi a Programação Não Linear a partir do método PNL2000 (GOMES, 2001a) por ser um método prático e com já comprovada eficiência quanto ao dimensionamento econômico de redes malhadas. A edição do método PNL2000 e os resultados das simulações se processam com a utilização da planilha eletrônica Excel da Microsoft e a ferramentas de otimização denominada SOLVER. O método PNL2000 foi aplicado a duas redes de distribuição de água existentes, uma malhada e outra ramificada: o Grande Anel da Rede de Distribuição de Água da cidade de Recife-PE e o Setor 11 do Perímetro Irrigado Senador Nilo Coelho em Petrolina-PE, respectivamente. Os resultados obtidos através da utilização do método PNL2000 na simulação mostraram-se eficazes, fornecendo ao final um conjunto de dados que condizem com a realidade das redes de abastecimento utilizadas como exemplos de aplicação.

ABSTRACT

The operation of systems of water distribution comes assuming to each day a bigger together importance to the companies of sanitation and the users of irrigation structures. This has as justification the cost of the maintenance of networks ramified or threshed and the availability of the water, that in determined regions is each lesser time. Of this form, the simulation of this activity, in such a way has basic paper in the economic field how much in the social one. The methodology adopted in this work of dissertation was the Not Linear Programming from method PNL2000 (GOMES, 2001) for being a practical method and with already proven efficiency how much to the economic sizing of threshed networks. The edition of method PNL2000 and the results of the simulations if process with the use of the electronic spread sheet Excel of the Microsoft and the tools of called optimization SOLVER. Method PNL2000 was applied the two existing networks of water distribution, one threshed and ramified other: the Great Ring of the Network of Water Distribution of the city of Recife-PE and Sector 11 of Irrigated the Perimeter Senator Nile Coelho in Petrolina-PE, respectively. The results gotten through the use of method PNL2000 in the simulation had revealed efficient, supplying to the end a data set that if adjust with the reality of the used networks of supplying as application examples.

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A crescente demanda de água nas cidades e no campo e a eficiência dos sistemas que a distribuem vem se tornando a cada dia uma das maiores preocupações dos profissionais e empresas que atuam nas áreas de Recursos Hídricos e Saneamento. Juntamente com o crescimento dos centros urbanos e o desenvolvimento das indústrias aumenta-se a demanda de água nas redes, ampliando-se suas estruturas físicas, podendo ser causadas eventuais rupturas ou desequilíbrio nas mesmas, já que a maioria das redes de abastecimento urbano já se encontra em seu limite máximo de fornecimento, além do desgaste provocado pelo tempo de uso. O aumento da demanda e a ampliação das estruturas podem ocasionar maiores desgastes e problemas aos usuários se estas situações não forem bem estudadas e monitoradas. O mesmo pode ocorrer quando, em casos de racionamento ou manutenção, existir a necessidade do corte do fornecimento de água a determinados trechos ou anéis, e sendo a água um constituinte essencial à vida humana, o seu desperdício ou perda se torna inviável tanto social como economicamente.

Os sistemas de distribuição de água encontrados principalmente nos grandes centros urbanos se tornam, com o passar dos anos, deficientes quanto à eficiência na sua distribuição e na qualidade da água que passa por seus tubos. Quanto a sua eficiência, estes sistemas são levados a suportar pressões para as quais não foram projetados inicialmente, causando assim nessas redes variações de pressões em determinados nós, rupturas em certos trechos ou a incapacidade do fornecimento de água em algumas situações. Quanto à qualidade da água distribuída, esta diminui quando ocorrem rupturas das tubulações, por causas diversas, ocorrendo desta forma a contaminação da água e a perda do investimento em seu tratamento. Desta forma e diante da constante ameaça de escassez de água é que se

mostra necessária a utilização de todas as técnicas possíveis para o aumento da eficácia dos sistemas de distribuição e a conseqüente diminuição no desperdício de água, além da minimização dos custos de investimentos e de operação desses sistemas.

No campo, a importância da água é tão fundamental quanto em centros urbanos, como descrito anteriormente. Justamente devido ao aumento populacional que existe nos centros urbanos é que cada vez mais há a necessidade do aumento das áreas produtivas, mesmo que estas não apresentem condições totalmente favoráveis à agricultura. No caso particular do Nordeste brasileiro em que a precipitação não favorece a agricultura, a irrigação possui um papel fundamental, pois sem ela, o aproveitamento de terras com capacidade para produção agrícola seria notadamente menor, contribuindo-se para um maior desequilíbrio social.

Os sistemas encontrados em áreas irrigadas normalmente têm a ocorrência de problemas para sua total eficiência. Os problemas mais comuns e que fazem parte de um dos exemplos de aplicação desse trabalho são, as vazões e as pressões insuficientes, o que podem causar uma redução na produção agrícola e trazer prejuízos aos irrigantes. As causas desses tipos de problemas podem ser diversas, tal como o sub-dimensionamento das redes, o aumento da demanda de água, a ampliação do perímetro a ser irrigado ou a utilização incorreta dos tipos de irrigação (gotejamento, aspersão etc.).

Neste trabalho, optou-se pela utilização de técnicas de Programação Não Linear, através da adaptação de um método de Dimensionamento Econômico de Redes Malhadas, o PNL2000, para a Simulação de Cenários de Operação de Sistemas de Distribuição de Água, ou seja, utilizar um método já existente que objetiva apenas a minimização do custo total de uma rede de distribuição (Custo da Rede e Custo Energético), e através de adaptações nos parâmetros utilizados pela ferramenta de otimização, ter como objetivo desse novo método a simulação de uma variedade de situações ou *cenários* correntes no dia a dia de uma rede de distribuição de água. Para tanto, é utilizado como estudo de caso para verificar a funcionalidade do método adotado dois tipos de redes de distribuição – rede ramificada e rede malhada – diferente do objetivo inicial do PNL2000 que dimensiona apenas redes malhadas, além de possibilitar a inserção ou não das variáveis econômicas nas simulações. As variáveis econômicas envolvidas nas simulações tornam-se, portanto, não apenas o custo dos trechos da rede somado ao custo energético, mas o custo de qualquer modificação na estrutura da rede isoladamente ou o custo energético em

modificações na vazão e pressão disponibilizada ou modificação da potência requerida por um conjunto motor-bomba.

A justificativa para o trabalho de dissertação se baseia na necessidade de pesquisas que envolvam a simulação de operação de cenários em redes de distribuição, isso devido a quantidade de métodos existentes, além de possibilitar o desenvolvimento de um método de fácil acesso e domínio por parte dos usuários.

O Capítulo II dessa tese descreve alguns métodos de simulação e dimensionamento de redes de distribuição de água, segundo pesquisas realizadas por diversos autores. Dentro do tema de métodos de simulação e dimensionamento em redes pressurizadas, tem-se ainda a definição dos tipos de redes e dos métodos mais conhecidos de otimização.

A metodologia aplicada, Capítulo III, descreve o método PNL2000 – Dimensionamento Econômico de redes Malhadas - com as fórmulas utilizadas para obtenção dos resultados através da ferramenta SOLVER existente no Excel da Microsoft, além de descrever também a adaptação do Método PNL2000 para a Simulação de Cenários de Operação de Sistemas de Distribuição de Água.

O Capítulo IV, Resultados e Discussões, tem como informação os exemplos de aplicação com os respectivos resultados das simulações realizadas, e comparando alguns dos resultados de cenários ou situações aos mesmos obtidos através do método WADISO e do método Granados.

Finalmente, o Capítulo V contém as conclusões deste trabalho de dissertação com as respectivas vantagens e inconvenientes da utilização do PNL2000 e algumas recomendações para futuras pesquisas que envolvam o PNL2000.

CAPÍTULO II

MÉTODOS DE SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO EM REDES PRESSURIZADAS

2.1. INTRODUÇÃO

Problemas que procuram minimizar ou maximizar uma função numérica de uma ou mais variáveis, onde estas variáveis estão sujeitas a determinadas restrições, são chamados de problemas de otimização. Muitos problemas de otimização foram encontrados inicialmente nas ciências físicas e na geometria, onde a necessidade de resolvê-los fez surgir o cálculo diferencial e o cálculo das variações, que são técnicas clássicas de otimização conhecidas há mais de 150 anos. Os problemas de otimização que não podem ser resolvidos através de métodos clássicos de cálculo são geralmente chamados de problemas de programação (FRITZCHE, 1979 *apud* FORMIGA, 1999).

Os problemas de otimização normalmente encarregam-se de alocar recursos escassos (mão de obra, matéria prima etc.) na produção, tal que os produtos obedeçam a determinadas especificações técnicas (conteúdo de matéria primas, utilização de certos equipamentos etc.), observem certas restrições como a disponibilidade de tempo de máquina e a capacidade de aceitação do mercado consumidor, e tentam maximizar ou minimizar uma função que representa o objetivo almejado como o lucro ou o custo. Portanto, um problema de otimização consiste em, inicialmente representar o sistema estudado como um conjunto de funções (equações e inequações) matemáticas que, após formuladas, serão otimizadas. Com isso, tem-se que o problema maximiza ou minimiza uma função representativa do objetivo desejado, obedecendo a um conjunto de restrições impostas a essa função. Essas restrições delimitam

um espaço que deve conter todas as possíveis soluções do problema, chegando-se então ao final à solução ótima (MELO, 2000).

Segundo BRAGA *et al.* (1998) os modelos de otimização são algoritmos matemáticos que procuram identificar os pontos máximos ou mínimos da função objetivo, que representa por meio de expressão matemática os objetivos estabelecidos na operação. Para representar um sistema de reservatórios com modelos de otimização e tornar solúvel o problema de operação, é necessário adotar certas hipóteses ou simplificações. Dentre elas, destaca-se a linearização de todas ou parte das equações de restrição e da função objetivo, para que haja convergência e solução destas equações. Devido a esta simplificação, os modelos otimizantes geralmente fornecem resultados sem grandes refinamentos.

De acordo com CARVALHO (1998), vários fatores podem afetar o desenvolvimento de um modelo de otimização, tais como:

- Desconhecimento de como o sistema trabalha;
- Falta de dados relevantes;
- Influência de fatores imprevisíveis e de grande variação (rompimento de tubulações e paralisação de obras, por exemplo);
- Limitações na quantidade e experiência dos recursos humanos;
- Limitação de tempo;
- Limitações de recursos financeiros.

Dentre os diversos fatores citados anteriormente, pode-se delegar que a maior responsabilidade no desenvolvimento do modelo fica por conta da escolha do sistema em que o modelo será trabalhado, deixando por conta do profissional que o desenvolve a maior ou menor limitação destes modelos.

De acordo com AZEVEDO (1997), as técnicas de otimização exigem, usualmente, algumas simplificações na estrutura do modelo e nas restrições, enquanto a simulação é mais flexível. Na otimização todas as alternativas são analisadas implicitamente, enquanto na simulação limita-se a análise a um número finito de alternativas.

A simulação compreende uma opção disponível em modelos computacionais que permite com que o usuário do mesmo possa trabalhar testando o sistema estudado com diversos conjuntos de dados objetivando ao final o mesmo resultado, tendo em vista que, segundo ALZAMORA (1987), a modelagem (ou a reprodução de sistemas em modelo) tem o objetivo principal de, em um computador, com a maior exatidão possível, demonstrar o

comportamento real do sistema físico que representa, embora alguns modelos não consigam reproduzir fielmente os resultados ao serem comparados com a realidade.

A técnica de simulação permite que os problemas sejam analisados com o nível de detalhamento necessário aos objetivos dos analistas, embora a complexidade para o desenvolvimento e aplicação de tais modelos seja diretamente proporcional ao nível de detalhe que se espera obter. A grande desvantagem da técnica de simulação é que não oferece aos usuários a oportunidade de restringir o espaço decisório e, por consequência, a solução de problemas é alcançada através do exaustivo processo de tentativa e erro (AZEVEDO, 1997). No entanto, este processo de tentativa e erro é facilitado quando se tem uma boa base de dados, o que permite otimizar o problema, dando valores referenciais para se iniciar a simulação.

Os modelos de simulação são um conjunto de expressões matemáticas estruturadas em seqüência lógica, que descrevem a operação do sistema no espaço e no tempo. Seu objetivo é representar e operar o sistema de forma mais detalhada possível e fornecer informações para avaliar o comportamento do sistema real. A vantagem das técnicas de simulação está no fato de ser aplicável a sistemas complexos e aceitar quaisquer equações de restrição. Ao contrário dos modelos otimizantes, os modelos de simulação não determinam a política ótima de operação. A solução ótima é encontrada iterativamente, processando-se diversas simulações alternativas e comparando seus desempenhos. Sua obtenção depende, geralmente, da experiência e sensibilidade do usuário/operador (BRAGA *et al.*, 1998).

2.1.1. Tipos de Redes de Abastecimento de Água

A concepção geométrica do sistema de reservatórios e tubulações, que definem uma rede de distribuição, depende do porte da cidade a ser abastecida, do perímetro a ser irrigado, bem como de características topográficas. De modo geral, qualquer que seja o desenho da rede, esta é constituída por condutos que são classificados como: condutos principais ou condutos troncos e condutos secundários. Os condutos principais são aqueles de maior diâmetro que têm por finalidade abastecer os condutos secundários e também pontos de consumo, enquanto estes, de menor diâmetro, têm a função de abastecer diretamente os pontos de consumo do sistema. De acordo com a disposição dos condutos principais e o sentido de escoamento nas tubulações secundárias, as redes são classificadas como rede ramificada e rede malhada (PORTO, 1999). Neste trabalho há a necessidade da descrição dos

dois tipos de redes, pois serão utilizadas ambas em exemplos de otimização e simulação, contendo dados diferenciados (vazão, topografia e pressão).

2.1.1.1. Rede Ramificada

A rede é classificada como ramificada quando o abastecimento se faz a partir de uma tubulação tronco, alimentada por um reservatório de montante ou mesmo sob pressão de um bombeamento, e a distribuição da água é feita diretamente para os condutos secundários, e o sentido da vazão em qualquer trecho da rede é conhecido. Esta concepção geométrica é utilizada para o abastecimento de pequenas comunidades, acampamentos, granjas, sistemas de irrigação por aspersão (exemplo utilizado neste trabalho), etc. (PORTO, 1999). A figura 2.1 apresenta um esquema desse tipo de rede.

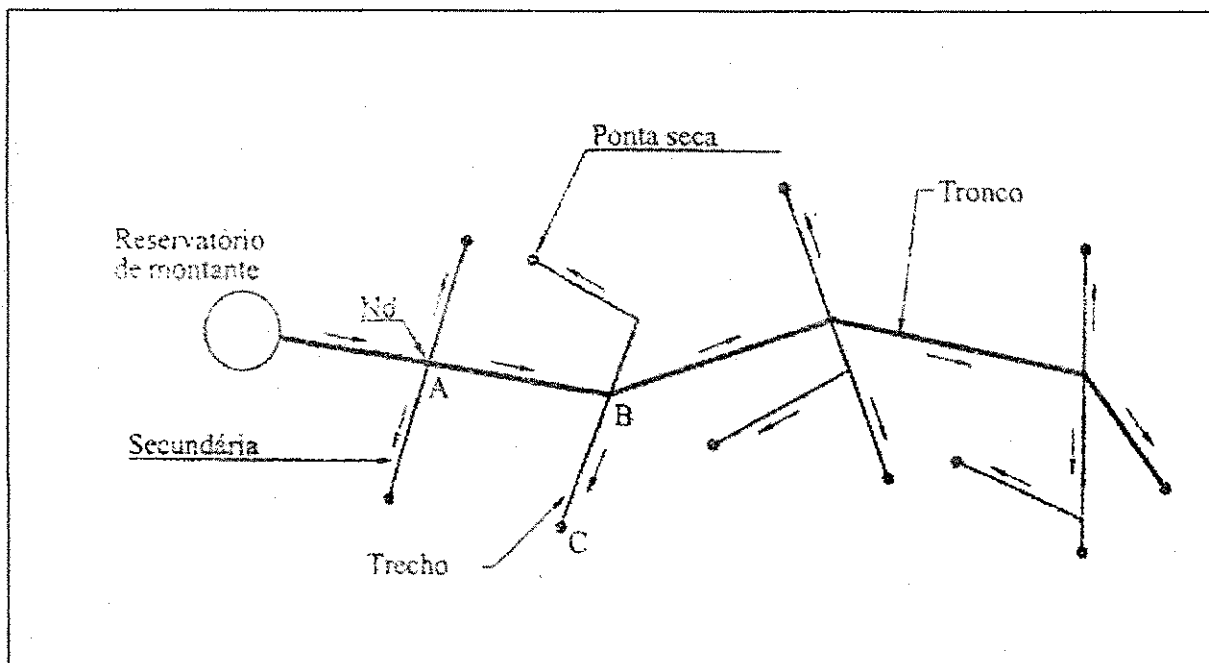


Figura 2.1: Esquema de uma Rede Ramificada (PORTO, 1999).

Conforme a figura 2.1, os pontos de derivação de vazão e/ou de mudança de diâmetro são chamadas de nós e a tubulação entre dois nós é chamada de trecho, e o sentido do escoamento se dá da tubulação tronco para as tubulações secundárias, até as extremidades mortas ou pontas secas.

O padrão geométrico da rede ramificada impõe que a distribuição da vazão fique condicionada à tubulação tronco, de modo que, se ocorrer um rompimento em um determinado trecho toda a área a jusante ficará com seu abastecimento comprometido.

2.1.1.2. Rede Malhada

Diferente das redes ramificadas, que possuem uma única tubulação tronco, as redes malhadas geralmente constituem-se de vários condutos principais. Essas tubulações principais formam um anel ou vários anéis, dependendo do tamanho da cidade. Em sistemas maiores ou com distribuição geométrica pouco linear, faz-se o uso de redes malhadas, ou seja, aquela cujos condutos formam verdadeiras malhas, onde a água dentro delas segue em qualquer sentido, em função da solicitação de consumo (MELO, 2000). Esta é a principal vantagem deste tipo de rede, pois as redes malhadas têm vantagens de conduzir a água para qualquer ponto dentro da rede por diversos caminhos. Devido a essa possibilidade de abastecimento de determinado ponto por mais de um caminho, pode-se realizar um reparo ou manutenção em determinado trecho da rede, sem haver prejuízo de abastecimento de um maior número de consumidores, pois os consumidores a jusante da manutenção serão abastecidos por outro caminho a ser seguido pela água (FAIR e GEYER, 1964 *apud* MELO, 2000).

O fluxo de água nas redes malhadas ocorre em condutos forçados, onde impera o escoamento turbulento, que é regido por dois grupos de equações: equação da continuidade ou conservação de massa e equação da conservação de energia. Para efeito de cálculo, ao longo de um trecho, este escoamento é considerado como permanente e uniforme (FORMIGA, 1999). A figura 2.2 representa uma rede de distribuição de água malhada.

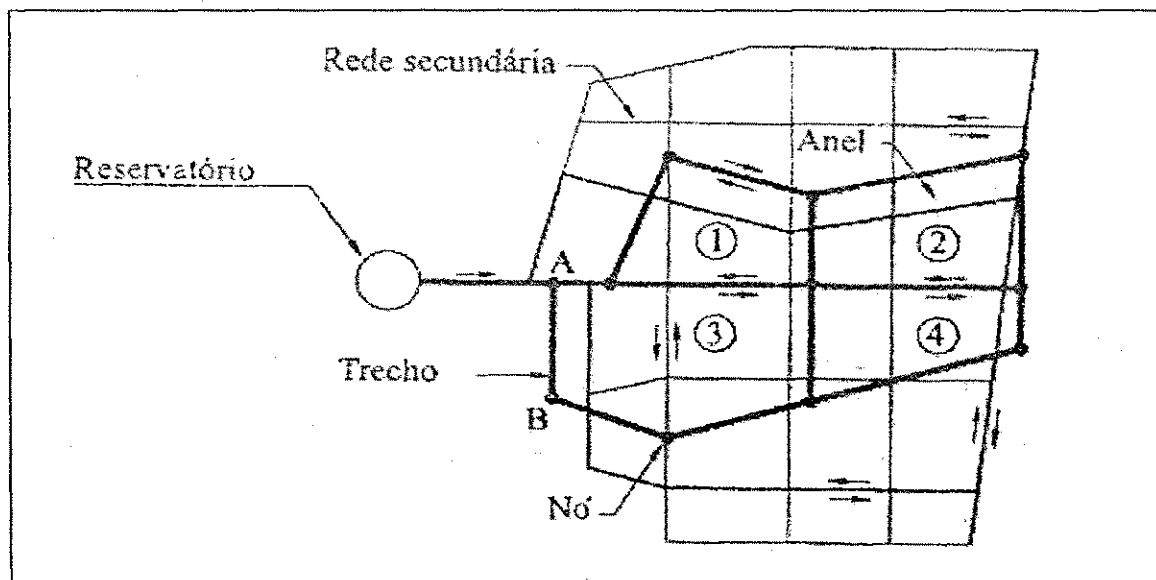


Figura 2.2: Esquema de uma Rede Malhada (PORTO, 1999).

2.2. PROGRAMAÇÃO LINEAR

A Programação Linear (PL) é uma técnica que se originou no final da década de quarenta e, com o surgimento do computador na década de cinquenta, encontrou seu aliado natural, tendo então um desenvolvimento acelerado, sendo também mais difundida. Costuma-se dizer, também, que a Programação Linear é um tópico da ciência da Pesquisa Operacional, a qual contém outros tópicos, tais como: Simulação, Teoria dos Jogos, Programação Dinâmica etc.. Estudos estatísticos têm mostrado que a Programação Linear é ainda hoje uma das técnicas mais utilizadas da Pesquisa Operacional. É comum vermos aplicações de Programação Linear fazerem parte de rotinas diárias de planejamento das mais variadas empresas, tanto nas que possuem uma sofisticada equipe de planejamento como nas que simplesmente adquiriram um software para alguma função específica (PRADO, 1999).

A Programação Linear é uma das técnicas mais utilizadas na Pesquisa Operacional pela simplicidade dos modelos empregados. O modelo matemático da programação linear é composto de uma função objetivo linear e de um conjunto de inequações lineares, que representam as restrições do modelo.

Dentre as diversas técnicas de Programação Linear para otimização de sistemas de distribuição de água, o Gradiente de Programação Linear é considerada a técnica de maior avanço. Esta técnica foi proposta inicialmente por ALPEROVITS e SHAMIR (1977), consistindo em um dimensionamento de redes de distribuição de água onde se consideram algumas variáveis como constantes e outras como variáveis de decisão a serem dimensionadas através da Programação Linear (FORMIGA, 1999).

De acordo com GOMES (1999), no caso particular do dimensionamento de redes de distribuição dos sistemas de irrigação sob pressão, as variáveis de decisão implícitas são os diâmetros das tubulações, que devem ser dimensionados sob o critério de custo mínimo. Os diâmetros não podem ser considerados variáveis de decisão explícita no modelo porque os custos das tubulações não variam linearmente com eles. Para superar esse inconveniente, se utiliza o artifício de adotar como variáveis de decisão explícitas os comprimentos das tubulações, já que os custos dos tubos, evidentemente, variam linearmente com seus comprimentos.

No dimensionamento das redes de distribuição de água para irrigação, principalmente quando se leva em consideração os aspectos econômicos, a linearidade do sistema fica comprometida, podendo ao final alterar significativamente o resultado a ser encontrado. Com

o uso de certos artifícios, os resultados obtidos encontram-se otimizados, no entanto, o uso destes artifícios gera uma perda de precisão por parte do modelo de Programação Linear. Segundo GOMES (1999), o custo de investimento da estação de bombeamento, gera uma não linearidade, que pode ser superada não se considerando este componente no custo total do sistema, e otimizar somente o custo anual de investimento da rede de distribuição somado ao custo anual da energia de bombeamento. Outro aspecto importante é que a otimização de redes de distribuição, através do método da Programação Linear, não considera a variação do custo das tubulações segundo as pressões de trabalho que atuam sobre elas. A inclusão, na formulação matemática do modelo, da relação entre o custo das tubulações e as pressões de trabalho que atuam sobre elas, ou seja, da relação entre o custo dos tubos e suas pressões nominais, tornaria o problema sem solução por meio da Programação Linear, já que neste caso o modelo estaria composto por um conjunto de variáveis não conexas.

Além de ser utilizada no dimensionamento de redes de irrigação a Programação Linear também é utilizada em sistemas urbanos de distribuição de água, atuando tanto no dimensionamento da rede quanto na sua operação devido à crescente demanda de água nos municípios em virtude do crescimento populacional. No entanto, BARBOSA (2000) descreve que 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 assim que as limitações quanto ao emprego da Programação Linear nos problemas sejam superadas.

A Programação Linear é utilizada como base em diversos pacotes como por exemplo: o LINDO (Linear Interactive and Discrete Optimizer) que é um software que trabalha com no máximo 500 variáveis e 250 restrições; a Planilha Eletrônica EXCEL[®] com o Solver; o MINOS (Modular In-Core Nonlinear Optimization System); o GAMS (General Algebraic Modeling System), sendo estes dois últimos comerciais (BARBOSA, 1997) e o MATLAB (HANSELMAN & LITTLEFIELD, 1997 *in* SILVA, 1997)

2.3. PROGRAMAÇÃO NÃO LINEAR

Segundo CIRILO (1997), a formulação matemática dos processos físicos que acontecem na prática corrente da engenharia normalmente é composta de fórmulas e equações não lineares. Em tempos passados, quando o emprego de técnicas de otimização se restringia à Programação Linear, principalmente em função da inexistência de computadores, os

modelos matemáticos que descreviam os processos físicos eram linearizados por técnicas diversas para possibilitar o uso da Programação Linear. Isso naturalmente era acompanhado da perda de precisão, eventualmente descaracterizando totalmente o problema original.

As metodologias que se utilizam da Programação Não Linear tem aumentado consideravelmente na área de dimensionamento de redes de distribuição de água, devido ao avanço da computação e de pesquisas que envolvem a menor perda econômica ou menor investimento na execução e operação de um projeto hidráulico, sem a diminuição da eficiência do sistema.

Mesmo tendo uma complexidade maior, comparado a Programação Linear, a Programação Não Linear oferece uma formulação matemática mais geral podendo-se criar ou prover bases através de diversos métodos. A Programação Não Linear pode controlar certas deformidades em modelos lineares ocasionadas pela própria não linearidade de sistemas e equações que normalmente são corrigidos em modelos de Programação Linear (YEH, 1985).

Como resultado de otimizações (maximização ou minimização) através da utilização da Programação Não Linear pode-se obter uma gama de resultados dependendo da função a ser otimizada e de suas restrições. Tais restrições podem fazer com que o usuário obtenha resultados distintos obedecendo a uma série de intervalos entre valores máximos e mínimos. CIRILLO (1997) define como a solução ótima e sua variação da seguinte forma:

otimiza-se $f(x)$

sujeito a : $a \leq x \leq b$

Se, para um dado valor de x_0 existir um intervalo centrado neste ponto tal que $f(x) \geq f(x_0)$ para todo valor de x deste intervalo, diz-se que x_0 é um mínimo local de $f(x)$.

Se, $f(x) \geq f(x_0)$ para todo x onde a função é definida, diz-se que x_0 é um mínimo global de $f(x)$. A definição é semelhante para máximos local e global, utilizando-se a desigualdade oposta. Através da figura a seguir, pode-se observar a variação de máximo e mínimo local e global.

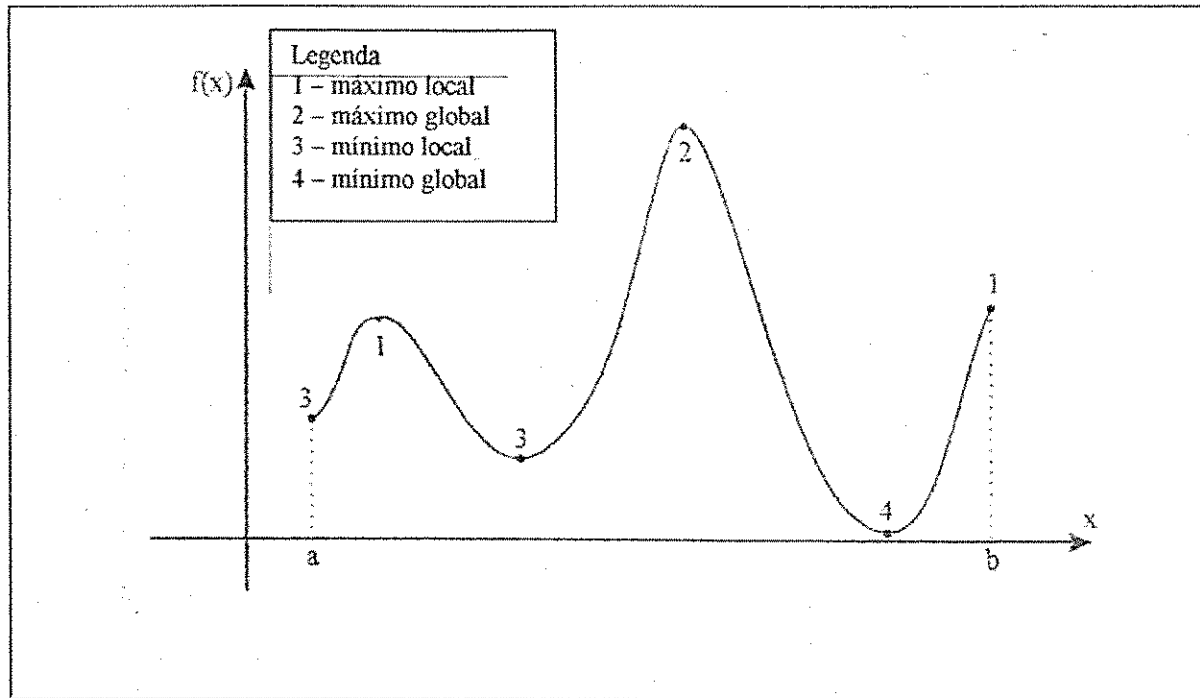


Figura 2.3: Curva de máximos e mínimos da função $f(x)$ (FORMIGA, 1999).

O tipo de função em que se enquadram os resultados das otimizações podem ser classificadas em multimodal ou unimodal. A função unimodal fornece apenas o máximo e o mínimo global. A função multimodal fornece resultados com máximos e mínimos globais e locais. Portanto o resultado de uma otimização ou simulação deverão ser os máximos e mínimos globais.

2.4. PROGRAMAÇÃO DINÂMICA

A Programação Dinâmica é uma técnica de otimização aplicada a problemas com decisões sequenciais, ou seja, problemas que podem ser vistos como processos de decisão sequencial em vários estágios, sendo estágios, pontos do processo no qual deve ser feita uma decisão. Na resolução da Programação Dinâmica, divide-se o problema em estágios. Determina-se o ótimo em cada estágio, relacionando o ótimo de um estágio a outro, através de uma função recursiva e percorrendo todos os estágios para assim determinar o ótimo global (MELO, 2000).

De acordo com BRAGA (1998), o princípio básico da técnica de Programação Dinâmica foi proposta por BELLMAN (1957). Segundo o princípio de Bellman, uma política ótima tem a propriedade de que, sejam quais forem o estado inicial e as decisões iniciais, as

decisões restantes devem constituir uma política ótima com relação ao estado que resulta da primeira decisão. De maneira mais simples, na Programação Dinâmica cada etapa da seqüência deve considerar somente os resultados das alternativas da etapa anterior. Desta forma, a melhor solução é encontrada em cada alternativa da etapa considerada e ao chegar ao final da seqüência, são conhecidas tanto a melhor alternativa como o caminho seguido.

Como exemplo desta metodologia temos o Método GRANADOS descrito por GOMES (1999), que é um algoritmo iterativo de otimização, que proporciona o custo mínimo de uma rede de distribuição ramificada pressurizada, em função da cota piezométrica de alimentação da mesma. Este método, que foi desenvolvido por Alfredo Granados (1990), que considera em seu processo de otimização, a variação do preço das tubulações em função de seus tipos, diâmetros e classes. De modo simplificado tem-se um modelo que otimiza redes de abastecimento ramificadas economicamente, mas com o mesmo problema que apresentam diversos modelos lineares, onde o custo de bombeamento, geralmente considera apenas o custo de operação da mesma, já que o custo de investimento da estação não varia significativamente, para um determinado intervalo de altura manométrica, normalmente considerado no processo de otimização. O custo de operação da estação de bombeamento reduz-se praticamente ao custo energético, já que o custo de manutenção de redes fechadas pressurizadas não é considerável, perante o custo da energia (GOMES, 2001a).

Quando se chega ao resultado final da otimização da rede através do Método Granados obtém-se o custo minimizado da rede, o que deve ser acrescido do custo de bombeamento, gerando-se ao final uma nova curva com os dados otimizados da rede de abastecimento e o custo do bombeamento (figura 2.4).

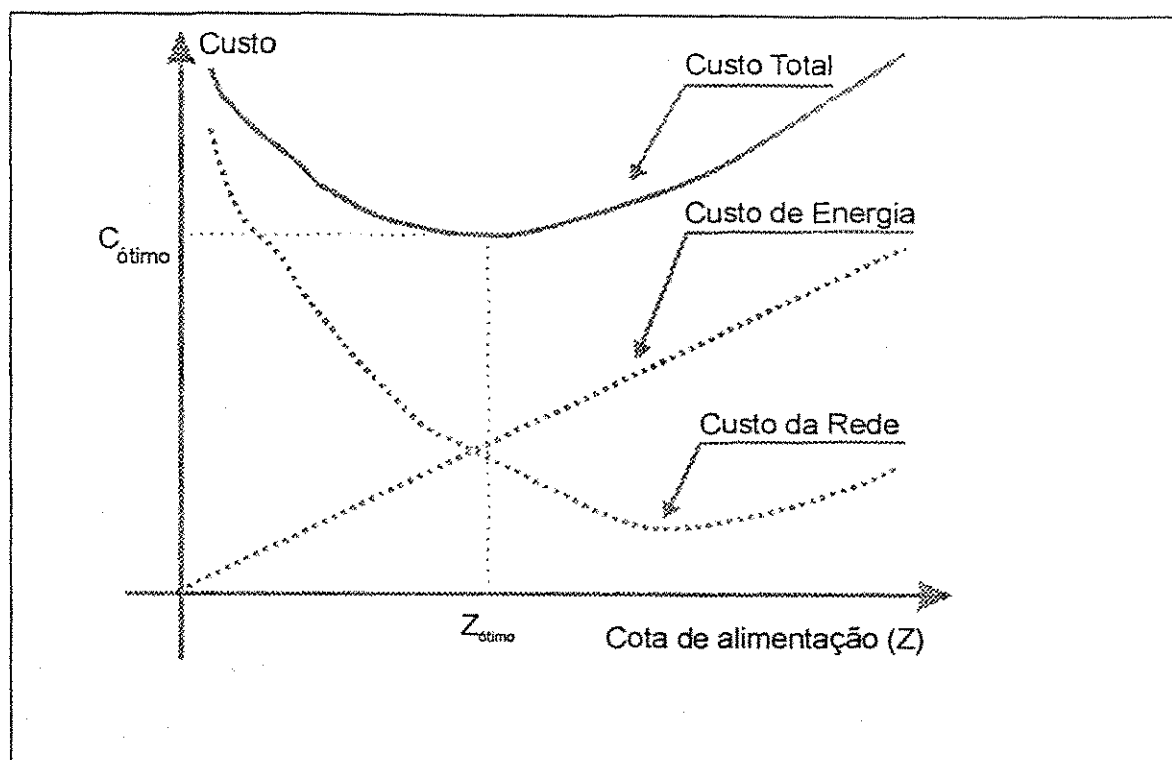


Figura 2.4: Curva que representa a otimização conjunta da rede de distribuição – estação de bombeamento (GOMES, 1999).

2.5. TÉCNICAS DE ENUMERAÇÃO EXAUSTIVA

Essa técnica consiste na utilização de um modelo de simulação para enumerar exaustivamente as alternativas decisórias, como por exemplo, os diâmetros das tubulações, de modo a ser possível identificar-se o dimensionamento ótimo de um sistema (MELO, 2000).

Nas redes de distribuição de água, tanto malhadas quanto ramificadas, os resultados com eficiência ótima, podem ser acrescidos da otimização conjunta da rede (custo de implantação e custo de operação), no entanto, dessa forma o número de cálculos envolvidos aumenta consideravelmente devido a inclusão de valores como o custo da tubulação por metro e a operação da estação de bombeamento (custo energético), dificultando a resolução do problema.

GESSLER (1985) *apud* FORMIGA (1999) propôs o uso da enumeração seletiva, em virtude da quantidade de cálculos envolvidos, de modo a restringir severamente a quantidade de soluções possíveis para a rede, restrições estas que tiveram por base a experiência do autor. LOUBSER e GESSLER (1990) sugeriram algumas diretrizes para redução da quantidade de cálculo efetuado pelo computador. As principais são:

- I. Agrupar uma série de trechos e fazer com que o mesmo diâmetro seja utilizado em todo o grupo;
- II. Armazenar progressivamente as combinações de diâmetros que proporcionam o menor custo e que satisfazem as restrições, eliminando assim possíveis combinações de custos maiores;
- III. Checar as combinações que violam as restrições e eliminar aquelas que incluem tamanhos de tubos iguais ou menores aos dos tubos rejeitados.

No entanto, mesmo com o auxílio destas diretrizes, no caso de grandes redes ainda é necessário um tempo computacional elevado para se chegar a uma solução de menor custo, e não existe nenhuma garantia de que a solução ótima tenha sido descartada por estas diretrizes que eliminam o espaço das possíveis soluções (SIMPSON *et al.*, 1994).

Através da técnica de Enumeração Exaustiva, GESSLER e WALSKI (1985) desenvolveram um programa chamado WADISO. Este programa fora utilizado por LEAL (1995) e BARBOSA (2001) com as finalidades de otimização e simulação, respectivamente.

O WADISO (Water Distribution System Optimization) é um modelo que trabalha em linguagem FORTRAN, desenvolvido no Programa de Conservação e Abastecimento de Água do Corpo de Engenheiros do Exército Americano. O programa consiste em três partes:

- Primeira parte é a Rotina de Simulação que simula as distribuições de pressões e vazões na rede;
- Segunda parte consiste na Rotina de Otimização que é usada para dimensionamento, cálculo dos custos e de algumas distribuições de pressão;
- Terceira parte é a Rotina de Simulação no Tempo que computa a distribuição das pressões e vazões na rede, considerando a flutuação do(s) nível(is) do(s) reservatório(s) de distribuição e a variação dos padrões de uso d'água ao longo de um período determinado.

No WADISO estão representados os principais elementos de uma rede de distribuição de água: os elementos físicos – os tubos, os reservatórios de distribuição, os mananciais, as válvulas redutoras de pressão e de controle, as bombas; e os elementos abstratos – vazões, pressões e velocidades. O WADISO ainda possui um ambiente interativo, com vários menus relacionados com as três rotinas já citadas, e um conjunto de comandos, os quais inserem, retiram ou alteram elementos na rede (BARBOSA, 2001).

2.6. ALGORITMO GENÉTICO

O Algoritmo Genético é uma técnica relativamente nova de otimização. Em virtude disso, a quantidade de pesquisadores, e conseqüentemente o número de publicações, que utilizam essa ferramenta para a otimização de sistemas de abastecimento de água ainda é pequeno (FORMIGA, 1999).

Os algoritmos genéticos constituem uma parte da computação evolutiva, a qual está rapidamente crescendo como uma subdivisão da Inteligência Artificial. Os algoritmos genéticos surgiram da mistura entre sistemas naturais e artificiais e da observação dos sistemas biológicos. Como se pode supor, os algoritmos genéticos foram criados tendo como referência à teoria de Darwin sobre a evolução dos seres vivos. Dessa forma, pode-se dizer que soluções obtidas através de algoritmo genético são evolutivas (LOURENÇO, 2001).

Os métodos tradicionais de otimização exata se caracterizam pela rigidez de seus modelos matemáticos representados através de seus teoremas, dificultando a representação de situações reais cada vez mais complexas e dinâmicas. O problema de flexibilidade foi um pouco reduzido a partir do momento em que se passou a associar técnicas de otimização com ferramentas de inteligência artificial, mais especificamente, com as ferramentas de busca heurística. De fato, os algoritmos heurísticos, ou simplesmente heurística, se caracterizam pela sua flexibilidade e tem como objetivo encontrar soluções de boa qualidade num tempo computacional suportável (OCHI, 2001).

Os algoritmos genéticos exploram a idéia da sobrevivência dos indivíduos mais adaptados e do cruzamento de populações para criar novas e inovadoras estratégias de pesquisa. Os algoritmos genéticos são uma forma de pesquisa aleatória na qual o modo como os cromossomos são escolhidos e combinados é um processo estocástico. A idéia de sobrevivência dos indivíduos mais adaptados é de grande importância para os algoritmos genéticos. Os algoritmos genéticos utilizam o que são denominadas funções de adaptação para selecionar os melhores cromossomos que serão usados para gerar as próximas e mais adaptadas populações (LOURENÇO, 2001).

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. Uma população de soluções existe em cada iteração do algoritmo. Essa população poder ser utilizada para evoluir para uma nova

população na próxima iteração. A evolução é arquivada utilizando operadores específicos: reprodução, crossover e mutação (ILAB, 2001).

2.7. CONSIDERAÇÕES FINAIS A RESPEITO DOS MÉTODOS DESCRITOS

Os sistemas de distribuição de água, tanto malhados quanto ramificados, são definidos segundo PORTO (1999) como sendo um conjunto de tubulações, acessórios, reservatórios, bombas etc., que tem a finalidade de atender, dentro de condições sanitárias, de vazão e pressão convenientes, a cada um dos diversos pontos de consumo de uma cidade ou setor de abastecimento. Evidentemente, em função do porte do problema, o sistema de abastecimento torna-se bastante complexo, não só quanto ao dimensionamento, mas também quanto à operação e manutenção. Trata-se em geral, da parte mais dispendiosa do projeto global de abastecimento, exigindo considerável atenção do projetista no que concerne aos parâmetros do sistema, hipóteses de cálculo assumidas e metodologias, de modo a obter um projeto eficiente.

O aumento na velocidade com que computadores se desenvolvem levam os pesquisadores a se aprofundarem mais em seus estudos e descobrirem novas ferramentas e melhores maneiras de se utilizar outras ferramentas já conhecidas.

No dimensionamento de redes de abastecimento de água, faz-se necessária a presença de tecnologias que reduzam os custos de investimento em um projeto, mantendo-se a eficiência dos sistemas. Algumas destas tecnologias, mesmo estando disponível no mercado e em centros de pesquisa, ainda tem certa dificuldade de serem assimiladas pelos profissionais do mercado de trabalho, pois a dificuldade em seu manuseio e compreensão é inerente a complexidade dos modelos existentes.

A **Programação Linear** como todos modelos apresenta certas vantagens e desvantagens em seu uso. Como vantagens em seu uso tem-se que é a técnica mais conhecida e utilizada na solução de problemas de otimização (MELO, 2000); é um modelo matemático potente e com bastante flexibilidade podendo ser empregado dentro de uma ampla categoria de problemas, solucionando no dimensionamento de redes o problema da otimização ao proporcionar um resultado que se aproxima bastante ao custo ótimo procurado (GOMES, 1999). Como desvantagens tem-se que em modelos de Programação Linear de dimensionamento de redes de distribuição de água, as equações que representam o sistema têm que ser lineares, o que normalmente não ocorre na prática (MELO, 2000). Com a

utilização de recursos para a correção da linearidade dos sistemas a serem otimizados, aumenta-se a perda de precisão do sistema após ser otimizado; FORMIGA (1999) mostra uma outra grande desvantagem da Programação Linear, onde o método do Gradiente da Programação Linear (GLP), que é a base para os cálculos realizados pelos modelos lineares, é uma adaptação de um problema não linear para um linear. BHAVE e SONAK (1992) *apud* FORMIGA (1999) faz uma crítica a esse método, mostrando sua ineficiência para se obter o custo ótimo de uma rede. Essa crítica tem por base a separação que ocorre entre o processo de otimização (dos tubos) da determinação de vazões nos trechos. Outra dificuldade enfrentada pela metodologia do Gradiente da Programação Linear é a sua aplicação, pois não existe um programa específico para o emprego prático desta metodologia, sendo necessário a implementação desse algoritmo através de uma linguagem de programação.

A **Programação Dinâmica** possui propriedades bastante vantajosas em relação à outras. O trabalho computacional cresce de forma aproximadamente linear com o número de estágios, enquanto que em outros métodos o crescimento é, geralmente, geométrico (BARROS, 1997). O método GRANADOS que utiliza a Programação Dinâmica, foi desenvolvido inicialmente para otimização de redes ramificadas, adaptado para otimizar redes malhadas obteve resultados adequados, facilitando e agilizando o trabalho de dimensionamento e da busca de uma solução ótima que atenda às demandas com o menor custo possível (LEAL, 1997). Como desvantagem na Programação Dinâmica temos a chamada *praga da dimensionalidade*, termo originalmente proposto por BELLMAN (1957) *apud* BARROS (1997), que define aquelas situações em que a discretização das variáveis de estado é muito elevado, dificultando assim a busca do ótimo dado ao grande número de possibilidades que devem ser analisadas em cada estágio.

A **Enumeração Exaustiva**, embora apresente um conceito simples de otimização e um programa bastante utilizado, o WADISO, pode ser considerada uma técnica ineficiente, pois para se encontrar o ótimo, é necessário testar todas as possíveis soluções do problema, o que acarreta um tempo de computação muito elevado e mesmo se eliminando algumas soluções que hipoteticamente não farão parte da solução ótima corre-se o risco de fazer com que alguma solução ótima seja eliminada.

O **Algoritmo Genético** é uma técnica “evolucionista” que tem sido ultimamente empregada em uma série de aplicações em Recursos Hídricos, que vão desde a otimização de parâmetros em modelos hidrológicos até a alocação de válvulas em redes malhadas. No caso do dimensionamento econômico de redes, essa metodologia pode ser considerada como um

aperfeiçoamento do método de Enumeração Exaustiva. A desvantagem da utilização deste método reside no fato de que cada trecho só pode ter um diâmetro como solução, quando, entretanto, o ótimo em um trecho pode ser formado por um grupo de até dois diâmetros (GRANADOS, 1990 *apud* LEAL e GOMES, 1997). Para redes que possuem trechos pequenos, essa restrição não é muito evidente, entretanto para redes que têm longos trechos, principalmente os grandes anéis de distribuição, a consideração de apenas um diâmetro por trecho pode resultar em uma solução que não é ótima (FORMIGA, 1999).

A **Programação Não Linear**, segundo CIRILO (1997) tem vantagens como a limitação relativa ao tempo de processamento e ao porte do problema de otimização que praticamente não existe hoje, em função do avanço exponencial na capacidade e velocidade de processamento em computadores. Outra grande vantagem da Programação Não Linear é exatamente a sua abrangência. Uma vez elaborado o modelo matemático que descreva o sistema a otimizar, normalmente nenhuma simplificação é necessária em termos de formulação, o que aumenta a precisão nos resultados a serem obtidos. BARBOSA (2000), descreve que 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. Porém, se tratando de redes hidráulicas malhadas, da experiência de aplicações em projeto. EIGER *et al.* (1994) apontam dificuldades para a aplicação da Programação Não Linear devido aos seguintes aspectos: (1) o problema contém elementos discretos, como por exemplo bombas, válvulas e diâmetros; (2) qualquer formulação do problema que é realista o bastante para ser útil, apresenta-se na forma não linear; (3) mesmo problemas de porte moderado geram grande dimensionalidade computacional.

Devido às desvantagens oferecidas por diversas metodologias, tanto no dimensionamento econômico quanto na simulação, é que se resolveu investir nas pesquisas em modelo eficaz e ao mesmo tempo de fácil manuseio. O modelo descrito como PNL2000, desenvolvido por GOMES (2001a), oferece estas bases de trabalho, sendo portanto, a metodologia escolhida neste trabalho, visando a simulação de diversos cenários na operação em redes de distribuição de água, tanto malhada quanto ramificada, além de simular situações correntes em municípios ou perímetros irrigados. Tal metodologia será descrita com mais detalhes no capítulo seqüente.

CAPÍTULO III

METODOLOGIA DE SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS DE OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA ATRAVÉS DO MÉTODO PNL2000

3.1. INTRODUÇÃO

O PNL2000 é um método de dimensionamento econômico de redes malhadas, desenvolvido por GOMES (2001a). Esta metodologia procura fazer a otimização da rede como um todo, ou seja, efetuando o balanceamento das vazões nos trechos da rede, juntamente com o dimensionamento econômico das tubulações e ainda, como será demonstrado nessa dissertação, pode simular situações diversas a que as redes de distribuição estão sujeitas. Para isso, foi utilizado o algoritmo de otimização GRG2 (Gradiente Reduzido Generalizado), que é um algoritmo de programação não linear, desenvolvido por LASDON *et al.* (1984), que pode ser formulado e processado através da ferramenta SOLVER, disponível na planilha EXCEL[®].

A razão que levou a utilização da planilha eletrônica, em detrimento de outros pacotes de otimização como o GAMS, MINOS, MathLab, etc., foi o fato destas planilhas serem, atualmente, um dos instrumentos computacionais mais utilizados pelos projetistas de redes de abastecimento de água. Além do mais, a migração de um método como o Hardy-Cross para a metodologia proposta poderia facilmente ser feita.

Juntamente com o dimensionamento econômico de sistemas de distribuição de água, outra componente que tem grande importância quanto a este aspecto, é a operação e a manutenção destes sistemas, pois são os derivados destes componentes que demonstram a eficiência no abastecimento em termos de vazão e pressão disponível.

Quando uma rede de distribuição passa a não fornecer de maneira eficaz a água com a vazão e pressão necessária significa que a rede está operando com situações bem diferentes daquelas para que foi projetada. Problemas como esses podem ser editados diante de diversas situações ou cenários, como a manutenção em um determinado trecho de um sistema urbano ou o aumento da demanda de água em um perímetro irrigado. Nesse caso a simulação ocorre para uma rede já existente, mesmo que ao final o resultado imposto pelo método seja o redimensionamento da rede de distribuição, diferente do dimensionamento inicial de uma rede. Para que no dimensionamento de uma rede de distribuição estes testes possam ser efetuados antes que os inconvenientes realmente ocorram são necessários métodos que além de dimensionar possam também simular situações, impondo assim, limites para que o abastecimento de toda a rede ou parte dela não seja prejudicado. Tem-se ainda que a utilização de um método de otimização econômica como o PNL2000 na simulação de cenários em sistemas de distribuição, se dá pela necessidade da abordagem da simulação por métodos de fácil acesso e manuseio.

A metodologia de simulação no PNL2000 pode ser feita de duas maneiras, a primeira é realizar as simulações logo após a rede ter sido dimensionada, demonstrando os limites da futura rede. e a segunda é simular situações ou cenários com alteração da vazão ou pressão requerida em uma rede já existente, utilizando-se de dados como diâmetros e comprimentos já pré-estabelecidos, bem como as vazões fornecidas (as vazões podem também ser variáveis). Esta segunda opção torna-se interessante pelo fato desse tipo de simulação poder prevenir os operadores sobre eventuais problemas na distribuição da água ou rupturas nas tubulações. Outra vantagem da simulação através do PNL2000 é que podem ser atribuídos valores econômicos à tubulação, mostrando ao final o custo otimizado de possíveis alterações na estrutura da rede.

3.2. DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA DO PNL2000 – DIMENSIONAMENTO ECONÔMICO DE REDES MALHADAS

De acordo com GOMES (2001a), a metodologia do PNL2000, que utiliza o modelo matemático da Programação Não Linear, para o dimensionamento econômico de redes malhadas, se divide em duas etapas. Na primeira etapa, faz-se um pré-dimensionamento do sistema, no qual os diâmetros e as vazões dos trechos, e a cota piezométrica de alimentação, são variáveis a serem determinadas no processo de otimização. Em seguida, com os resultados

obtidos no pré-dimensionamento, executa-se uma segunda etapa, na qual se realiza o ajuste da solução inicialmente obtida. Na segunda etapa o diâmetro teórico (variável contínua), calculado inicialmente para um determinado trecho, é desdobrado em dois diâmetros comerciais, um imediatamente inferior e outro imediatamente superior, considerando como variáveis de decisão os comprimentos de seus sub-trechos, pertencentes ao trecho considerado. Além dos diâmetros e dos comprimentos dos tubos, as vazões nos trechos também são consideradas como variáveis a serem otimizadas, tanto na primeira como na segunda etapa do método. Os custos considerados no Dimensionamento Econômico de Redes Malhadas tem como relação antagônica dos dois custos – custo da rede e custo energético – de acordo com a figura 2.4 do capítulo anterior. Apresenta-se a seguir o *layout* do Método PNL2000 editado através da Planilha Eletrônica do Excel.

| A | B | C | D | E | F | G | H | | |
|---------------------------|----------|------------------|----------------|------------------|--------------------------|------------------|----------------------|---------------------|-------------------|
| | Trecho | Vazão (l/s) | Diâmetro (mm) | Coefficiente H-W | Comp. (m) | Perdas (mca) | Velocidade (m/s) | Custo Unit. (R\$/m) | Custo Total (R\$) |
| 3 | 1 | | | | | | | | |
| 4 | 2 | | | | | | | | |
| 5 | 3 | | | | | | | | |
| 6 | 4 | | | | | | | | |
| 7 | 5 | | | | | | | | |
| 8 | 6 | | | | | | | | |
| 9 | 7 | | | | | | | | |
| 10 | 8 | | | | | | | | |
| Altura Manométrica | | | | | | | Custo da Rede (R\$) | | |
| Altura Piezométrica | | | | | | | | | |
| Segunda Parte da Planilha | | | | | | | | | |
| | Nº | Alt. Piez. (mca) | Demanda (l/s) | Cota (m) | Pressão Disponível (mca) | Eq. Cont. | Eq. Cons. de energia | | |
| 17 | 1 | | | | | | | | |
| 18 | 2 | | | | | | | | |
| 19 | 3 | | | | | | | | |
| 20 | 4 | | | | | | | | |
| 21 | 5 | | | | | | | | |
| 22 | 6 | | | | | | | | |
| Nº de horas Anuais | C do Kwh | end. do bom (%) | Pot. Req. (Kw) | C. energia (R\$) | Coef. Atual (Fa) | Atualizado (R\$) | C total (R\$) | | |
| | | | | | | | | | |

Figura 3.1: Layout do Método PNL2000 editado através da Planilha Eletrônica do Excel.

Os gastos com a implantação da rede, representados neste caso pelas tubulações e instalação, são denominados gastos fixos ou de investimento, enquanto que os gastos com a operação (gastos energéticos) são variáveis a incidirem ao longo da vida útil do sistema. Como esses gastos incidem em tempos diferentes, faz-se necessário converter, financeiramente, os gastos fixos em variáveis ou os gastos variáveis em fixos. Essa última foi a alternativa adotada pelo método PNL2000. Para tanto, faz-se necessário atualizar o custo de operação (energético), mediante a introdução na função objetivo, de um coeficiente (Fa), que

transforme os custos anuais em custos atualizados (GOMES, 1999). Esta equação é utilizada quando a simulação passa a envolver valores econômicos, como em casos de redimensionamento ou ampliação da rede.

$$F_o = \frac{(1+e)^n - (1+i)^n}{(1+e) - (1+i)} \times \frac{1}{(1+i)^n} \quad (3.1)$$

onde:

- i é a taxa de juros anuais;
- e é a taxa de aumento anual da energia e
- n é o número de anos da vida útil da instalação.

Quando o método PNL2000 está otimizando o problema de uma determinada rede é necessária a identificação de certos parâmetros requisitados pela ferramenta SOLVER, como a *Célula Destino ou Função Objetivo*, *Células Variáveis* e as *Restrições*. Tais dados devem ser preenchidos com extrema cautela, pois caso algum dos parâmetros seja preenchido de maneira equivocada o SOLVER pode não resolver o problema ou calculá-lo fornecendo um resultado com erros significativos.

Os próximos itens apresentam a metodologia do modelo em sua forma inicial, tanto para a simulação quanto para o dimensionamento.

3.2.1. Primeira Etapa do Método

A primeira etapa representa o processo inicial onde o conjunto de equações – Equação da Continuidade nos nós e Equação de Conservação de Energia nos Anéis – equilibra hidráulicamente a rede de distribuição, projetando o que será o esboço ou a etapa inicial dos cálculos e otimizações da segunda etapa. Tais dados, após análise, farão parte da segunda etapa do método. O processo de simulação pode ser feito a partir desta etapa, sem a necessidade dos cálculos de diâmetro e comprimento dos trechos, pois estes serão apenas inseridos.

3.2.1.1. Função Objetivo

A equação que representa o custo total do sistema de distribuição, que compreende o custo de implantação da rede, mais o custo de operação da estação de bombeamento, é expressa por:

$$C(D_i, Q_i, H) = \sum_{i=1}^m L_i P(D_i) + C_h H Fa \quad (3.2)$$

onde:

- $C(D_i, Q_i, H)$ = custo do sistema de abastecimento, em função dos diâmetros dos trechos D_i , das vazões requeridas nos nós da rede Q_i e da altura de bombeamento H ;
- L_i = comprimento do trecho i ;
- $P(D_i)^*$ = função que relaciona o preço unitário do tubo do trecho i com o diâmetro D_i ;
- m = número de trechos da rede;
- Fa = fator ou coeficiente de atualização do custo de operação (equação 3.1);
- C_h = custo de operação da estação de bombeamento, por unidade de altura manométrica; e
- H = altura manométrica de bombeamento.

A equação de relação $P(D)^*$ é encontrada após se relacionar o custo por metro da tubulação com seu determinado diâmetro. Após relacionar-se tais dados, utiliza-se uma ferramenta do Excel que insere o gráfico através de um ajuste de curva por mínimos quadrados e a linha de tendência potencial referente ao mesmo, tendo como próximo passo a exibição da equação do gráfico, também uma função do Excel. Tem-se então, que o resultado da correlação (R-Quadrado) encontrada pela equação $P(D)$ é em 99% dos casos explica a correta relação entre o preço e o diâmetro.

Em função da equação básica de potência de conjuntos elevatórios, o custo energético da estação de bombeamento (C_h), por altura de impulsão, é expresso por:

$$C_h = \frac{9,81Q}{\eta} n_b p \quad (3.3)$$

onde:

- Q = vazão em m^3/s ;
- η = rendimento esperado do conjunto motor-bomba;
- n_b = número de horas anuais de utilização da estação de bombeamento; e
- p = preço do kwh.

De acordo com a fórmula descrita anteriormente tem-se que a melhor maneira de estabelecer essa relação de custo é através de programas computacionais de ajustes de curvas, que permitem, facilmente, testar vários tipos de funções.

A equação (3.2), com o critério de custo mínimo, representa a função objetivo do método proposto, cujas variáveis de decisão são os diâmetros contínuos D_i , a altura manométrica de bombeamento H , e as vazões nos trechos Q_i .

3.2.1.2. Restrições

A solução ótima (de custo mínimo) a ser obtida, que fornece os diâmetros de todos os trechos da rede e a altura manométrica da estação de bombeamento, deve satisfazer um conjunto de restrições hidráulicas, que são inerentes ao problema físico de redes de abastecimento, malhadas ou ramificadas:

- a) Pressões mínimas nos nós:

As pressões nos nós da rede não devem ser inferiores às requeridas (Z_k), de modo a garantir o abastecimento aos pontos de consumo:

$$Z - \sum_{c=1}^k (h_f)_c \geq Z_k \quad (3.4)$$

onde:

- Z = cota de alimentação na rede, que é igual à altura manométrica de bombeamento “H” mais a cota do terreno na estação de bombeamento;
- Z_k = cota piezométrica requerida no nó “k”; e
- $\Sigma(h_f)_c$ = soma das perdas de carga nos trechos pertencentes ao percurso (artéria) compreendido entre a alimentação e o nó “k”.

b) Diâmetros mínimos e máximos:

O diâmetro D_i deve ser maior que um diâmetro mínimo (D_{min}) adotado e menor que um diâmetro máximo estimado (D_{max}), ou seja, existe a necessidade da limitação dos diâmetros a serem otimizados pelo Solver, pois dessa forma a quantidade de cálculos envolvidos no dimensionamento é menor, além de em caso de uma rede já existe, os trechos a serem modificados serão menores.

$$D_{min} \leq D_i \leq D_{max} \quad (3.5)$$

c) Conservação de energia no anel:

Essa restrição deve garantir que a soma algébrica das perdas de carga dos trechos de um anel seja nula.

$$\sum_{i=1}^{z_k} (h_f)_i - \sum_{j=1}^{p_k} Ep_j = 0 \quad (3.6)$$

onde:

- $(h_f)_i$ = perda de carga no trecho i ;
- z_k = número de trechos no anel k em questão;
- Ep_j = energia de impulsão aplicada na malha ou anel. Na falta de uma fonte externa dessa energia no interior do anel, o valor de $\sum Ep$ será nulo; e
- p_k = número de fontes de energia de impulsão dentro do anel k .

d) Continuidade nos nós:

A soma algébrica das vazões nos nós deve ser igual a zero, ou seja, as vazões que entram devem ser iguais às que saem:

$$\sum_{i=1}^{k_n} Q_{entra_i} - \sum_{j=1}^{q_n} Q_{sai_j} = d_n \quad (3.7)$$

onde:

- $Q_{entra(i)}$ = 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 nesse nó;
- k_n = número de trechos com vazões chegando ao nó n ;
- q_n = número de trechos com vazões saindo do nó n .

e) Velocidades mínima e máxima admissíveis:

A rede deve funcionar com velocidades de fluxo limitadas, de forma a se evitar a ocorrência de golpes de aríete, vibrações, como também o desgaste prematuro do sistema. De acordo com a Norma Técnica NB 594/77 adotada nessa dissertação, tem-se que as velocidades de circulação da água nos trechos devam ser superiores a um mínimo adotado.

$$V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max} \quad (3.8)$$

onde:

- V_i = velocidade média no trecho i ;
- V_{\max} = velocidade máxima admissível.
- V_{\min} = velocidade mínima recomendada.

3.2.2. Segunda Etapa do Método

Os resultados dessa segunda etapa são os definidos no dimensionamento econômico da rede malhada, fornecendo os diâmetros ótimos com seus respectivos comprimentos de trechos para que a rede seja abastecida com eficiência e menor custo possível – custo de implantação e custo energético.

3.2.2.1. Função Objetivo

A partir do equilíbrio da rede e dos resultados obtidos no pré-dimensionamento, executa-se a segunda etapa do PNL2000. Assim, para cada trecho, o diâmetro ótimo contínuo, obtido na primeira etapa, é desdobrado em dois diâmetros comerciais, sendo um o

imediatamente superior e o outro o imediatamente inferior àquele encontrado. Dessa forma, a função objetivo a ser minimizada, será:

$$C(L_{ij}, Q_i, H) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^2 L_{ij} P(D_j)_i + C_d H F_o \quad (3.9)$$

onde:

- L_{ij} é o comprimento ocupado pelo diâmetro D_j no trecho i considerado;
- $P(D_j)_i$ é o preço unitário do tubo de diâmetro D_j no trecho i ; e
- m é o número de trechos da rede.

A Função Objetivo (3.9), 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 do processo de otimização.

Na segunda etapa do método, tem-se então, um custo superior ao fornecido na primeira etapa, pois os diâmetros ótimos (primeira etapa) são desdobrados em diâmetros comerciais, elevando-se o custo da rede. Considera-se portanto, as vazões, os comprimentos dos sub-trechos e a altura manométrica como variáveis, e o resultado obtido pode ser uma solução factível, ou seja, o resultado obtido através de uma primeira simulação utilizando o Solver poderia não ser o menor valor possível (mínimo local), necessitando que novamente a ferramenta Solver seja ativada, simulando-se o mesmo conjunto de dados para que a solução final seja definitiva (mínimo global).

3.2.2.2. Restrições

Todas as restrições da etapa anterior devem ser satisfeitas também nesta etapa com o acréscimo de duas outras.

f) Comprimento dos sub-trechos:

$$\sum_{j=1}^2 L_{ij} = L_i \quad (3.10)$$

Os comprimentos dos sub-trechos com diâmetros comerciais inferior e superior ao encontrado pela otimização devem ser somados e seus resultados não podem ser diferentes daqueles adotados inicialmente.

g) Não negatividade dos comprimentos dos sub-trechos:

$$L_{ij} \geq 0 \quad (3.11)$$

Na resposta definitiva do dimensionamento ótimo deverá haver algum ou alguns trechos com tubulações de dois diâmetros comerciais distintos, sendo que o de diâmetro maior ocupará o sub-trecho de montante (considerando o sentido do fluxo d'água estabelecido pela vazão) e o de menor diâmetro o sub-trecho de jusante. Esse detalhe não ocorre nos dimensionamentos convencionais de redes malhadas, efetuados pelos métodos de Hardy-Cross (1936) e do seccionamento fictício, nem em métodos como o de GRANADOS e REDES para redes ramificadas. Normalmente os trechos com dois diâmetros são determinados para redes ramificadas, onde são fixos os sentidos das vazões, o que não ocorre nas redes malhadas. No entanto, esse aspecto não compromete o dimensionamento e a operação da rede malhada pelo método exposto, já que, de acordo com as equações de restrições impostas ao problema, o sistema de abastecimento atenderá às demandas de pressões e vazões em todos os nós (GOMES, 2001).

3.3. ADAPTAÇÃO DO PNL2000 PARA A SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS DE OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

A adaptação do método PNL2000 de dimensionamento econômico de redes malhadas para a simulação de cenários de operação de sistemas de distribuição de água consistiu como sendo o principal objetivo desse trabalho, além da utilização de exemplos de aplicação para comparação dos resultados obtidos com a realidade da rede. Portanto a descrição do método como desenvolvido inicialmente (Dimensionamento Econômico de Redes Malhadas) assume grande importância demonstrando a atual capacidade do método e as possibilidades de *situações* ou *cenários* que podem ser simuladas após as devidas adaptações demonstradas a seguir, possibilitando que para qualquer rede de distribuição, são inúmeras as modificações

que podem ser feitas, superando as *Funções Objetivas*, *Variáveis* e *Restrições* mostradas anteriormente.

A inserção das variáveis econômicas, utilizadas normalmente em dimensionamento econômico, está presente por ser um fator de decisão e por estar diretamente ligado aos resultados obtidos em simulações. Normalmente tem-se em um dimensionamento econômico a utilização dessa variável econômica como *Função Objetivo*, sendo exigida a sua minimização. No entanto, existe ainda a possibilidade de simular situações onde as variáveis econômicas estejam presentes apenas para a comprovação de qual será a opção que envolve menor custo, ficando, portanto como um componente auxiliar para decisões, fazendo parte ou não da *Função Objetivo*.

Em uma simulação os parâmetros envolvidos podem ser alterados dependendo da necessidade. As modificações realizadas nesse trabalho estão descritas no capítulo seguinte, *Resultados e Discussões*, onde tem-se os estudos de caso de uma rede malhada e uma rede ramificada. Algumas modificações que podem ser efetuadas no método de dimensionamento econômico PNL2000 são:

- Em redes malhadas e ramificadas pode-se simular a alteração da rede considerando-se o aspecto econômico (preço da tubulação e da instalação);
- Em redes malhadas e ramificadas pode-se simular a alteração de parâmetros como pressão disponível, vazão ou alteração da demanda em determinado nó e observar o comportamento do restante da rede, com ou sem o aspecto econômico.
- A pressão excessiva em determinada tubulação pode ser simulada alterando-se os parâmetros a ela relacionados e verificando seu comportamento.
- Verificar as possíveis consequências na rede de distribuição quando altera-se a altura manométrica no ponto de alimentação, seja através de bombeamento direto ou com reservatório de distribuição.

Os aspectos relacionados anteriormente fazem com que o dimensionamento econômico e a simulação em redes de distribuição se relacionem e tenham grande importância para projetistas e profissionais que atuam nessa área.

As alterações ou adaptações para que o método estudado seja utilizado como um método de simulação se restringe aos parâmetros utilizados, portanto, sua estrutura ou edição não é alterada.

Com a presença das variáveis econômicas nas simulações se mostra necessária a utilização do coeficiente de atualização (equação 3.1), custo do sistema (equação 3.2) e custo de bombeamento (equação 3.3), mesmo que a referente ao custo do sistema não seja a Função Objetivo.

No item 3.2 (Descrição da Metodologia do PNL2000 – Dimensionamento Econômico de Redes Malhadas), foi descrito que o PNL2000 tem duas etapas para obtenção dos resultados. O mesmo acontecerá nas simulações apenas quando for exigida da rede a sua reestruturação ou redimensionamento, o que fará necessário o desdobramento dos diâmetros ótimos em comerciais.

3.3.1. Função Objetivo em Simulações de Cenários

As equações utilizadas como parâmetros do método nas simulações de redes de distribuição de água podem variar conforme a necessidade imposta pelas restrições, como exemplos utilizados nessa dissertação tem-se:

- Equação da Conservação de Energia no Anel (equação 3.6);
- Equação da Continuidade nos Nós (equação 3.7);
- Custo do Sistema de Abastecimento (equação 3.2);
- Pressão Mínima Requerida em um Nó com valor conhecido e fixo;
- Pressão Máxima Requerida em um Nó com valor conhecido e fixo.

Além das equações descritas, podem ainda fazer parte desse conjunto, parâmetros, as células com valores conhecidos e fixos (altura manométrica, altura piezométrica ou vazão requerida). A escolha da Função Objetivo será então dependente da finalidade da simulação, como redução de pressão na rede ou a suspensão no fornecimento de água a alguns nós para a redução da demanda.

3.3.2. Restrições

A solução para a simulação dependerá das variáveis e restrições adotadas, e essas dependerão da finalidade do problema. A capacidade que o Método PNL2000 tem para simular cenários diversos, fazendo com que as restrições possam ser diferentes para cada

simulação, fornece ao operador ou usuário uma quantidade ampla de opções para se solucionar eventuais problemas na rede.

As restrições adotadas e correntes neste trabalho são:

a) Pressão Mínima nos Nós: adota-se um valor mínimo de pressão para a rede de acordo com normas técnicas e o insere como restrição na célula (nó) de menor pressão disponível.

b) Pressão Máxima nos Nós: da mesma forma que o item anterior, adota-se um valor máximo de pressão para a rede de acordo com normas técnicas e insere esse valor como restrição na célula (nó) de maior pressão na rede.

As pressões mínimas e máximas requeridas em um sistema de abastecimento de água devem seguir padrões de normas técnicas. Segundo a Norma de Projetos Hidráulicos de Redes de Distribuição de Água Potável para Abastecimento Público (NB-594/77) a pressão mínima requerida nos nós deve ser igual ou superior a 15 mca e a máxima admitida deve ser igual ou inferior a 50 mca.

c) Equação da Conservação de Energia nos Anéis: essa restrição se refere apenas para redes malhadas e deve ser inserida para que a rede, ao final da simulação, esteja equilibrada.

d) Equação da Continuidade nos Nós: essa restrição também se refere apenas para redes malhadas e deve ser inserida para que a rede fique equilibrada após a utilização do Solver.

Outras restrições podem ser utilizadas além das descritas, como a quantidade de água fornecida por um reservatório em que a vazão nos trechos pode variar, mas a soma das demandas deve ser igual ou inferior a vazão fornecida, portanto as variáveis adotadas dependerão da Função Objetivo.

Quando se tratar de simulação, envolvendo valores econômicos, as fórmulas adotadas como restrições serão as mesmas que o PNL2000 adotou inicialmente e seus resultados fornecerão a base do valor de uma eventual modificação em um determinado trecho.

As variações a que o método PNL2000 pode ser imposto estão dispostas no capítulo seguinte juntamente com os exemplos de aplicação escolhidos, envolvendo rede ramificada e malhada e considerando também em um dos exemplos as variáveis econômicas envolvidas, o que enriquece os resultados das simulações.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como resultados apresentados nesse trabalho de dissertação tem-se a utilização do método PNL2000 (GOMES, 2001a) em um exemplo para uma rede de distribuição de água malhada e outro exemplo para uma rede ramificada, o Grande Anel da Rede de Distribuição de Água da cidade de Recife-PE e o Setor 11 do Perímetro Irrigado Senador Nilo Coelho em Petrolina-PE, respectivamente. A disposição dos exemplos de aplicação e os resultados obtidos após o uso do PNL2000 encontram-se nesse capítulo. A adoção de um exemplo de rede fictícia para a demonstração do método não foi necessária devido à existência de dados de uma rede malhada e outra ramificada, podendo-se comparar o PNL2000 a metodologias conhecidas, para o cenário de dimensionamento ótimo econômico.

4.1. EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

Os exemplos de aplicação se fazem presentes pela necessidade da demonstração da real aplicabilidade do método utilizado. Os exemplos escolhidos satisfazem a critérios diversos, como o de se utilizar duas redes (malhada e ramificada), sendo que a aplicação hidráulica em cada uma delas é diferente.

Os exemplos são:

- Grande Anel da Rede de Distribuição de Água da cidade de Recife-PE com simulação através do método PNL2000, fazendo também uma comparação com um cenário através do método WADISO.

- Setor 11 do Perímetro Irrigado Senador Nilo Coelho com simulações através do método PNL2000 e a comparação de alguns cenários aos obtidos através do método Granados.

4.1.1. Grande Anel da Rede de Distribuição de Água da cidade de Recife-PE

Os dados fornecidos pela COMPESA (Companhia Pernambucana de Saneamento) em 1999 sobre o Grande Anel de Recife-PE retratam a atual situação da rede na data em que foi fornecido o conjunto de dados. Os resultados apresentados PNL2000 e pelo WADISO são, portanto, dependentes das considerações assumidas dos dados obtidos, como coeficiente de Hazen-Williams, vazão nos trechos, diâmetros da tubulação e altura manométrica dos pontos de abastecimento da rede.

O grande anel dessa rede de distribuição de água é abastecido simultaneamente por três reservatórios com uma vazão global de 8.156 l/s:

- Reservatório de Tapacurá (TAP) fornecendo 4.965,4 l/s;
- Reservatório de Alto do Céu (CÉU) fornecendo 1.420,6 l/s;
- Reservatório de Gurjaú (GRJ) fornecendo 1.770 l/s; e

A rede é formada por 65 (sessenta e cinco) trechos com diâmetros nominais variando entre 600 e 1500. Contém 57 (cinquenta e sete) nós, sendo que destes 18 (dezoito) não possuem demanda. A altura manométrica de cabeceira é de 10 mca e a altura piezométrica do reservatório (GURJAÚ) é de 49 mca. Os coeficientes de Hazen-Williams adotados foram os de 110 e 130 devido ao tempo de vida e o material da tubulação. As cotas do terreno variam de 3,10 m a 30 m e as pressões disponíveis nos nós variam de 14,15 mca a 45,09 mca sem estarem equilibradas. A figura 4.1 mostra a estrutura do Grande Anel da cidade de Recife-PE.

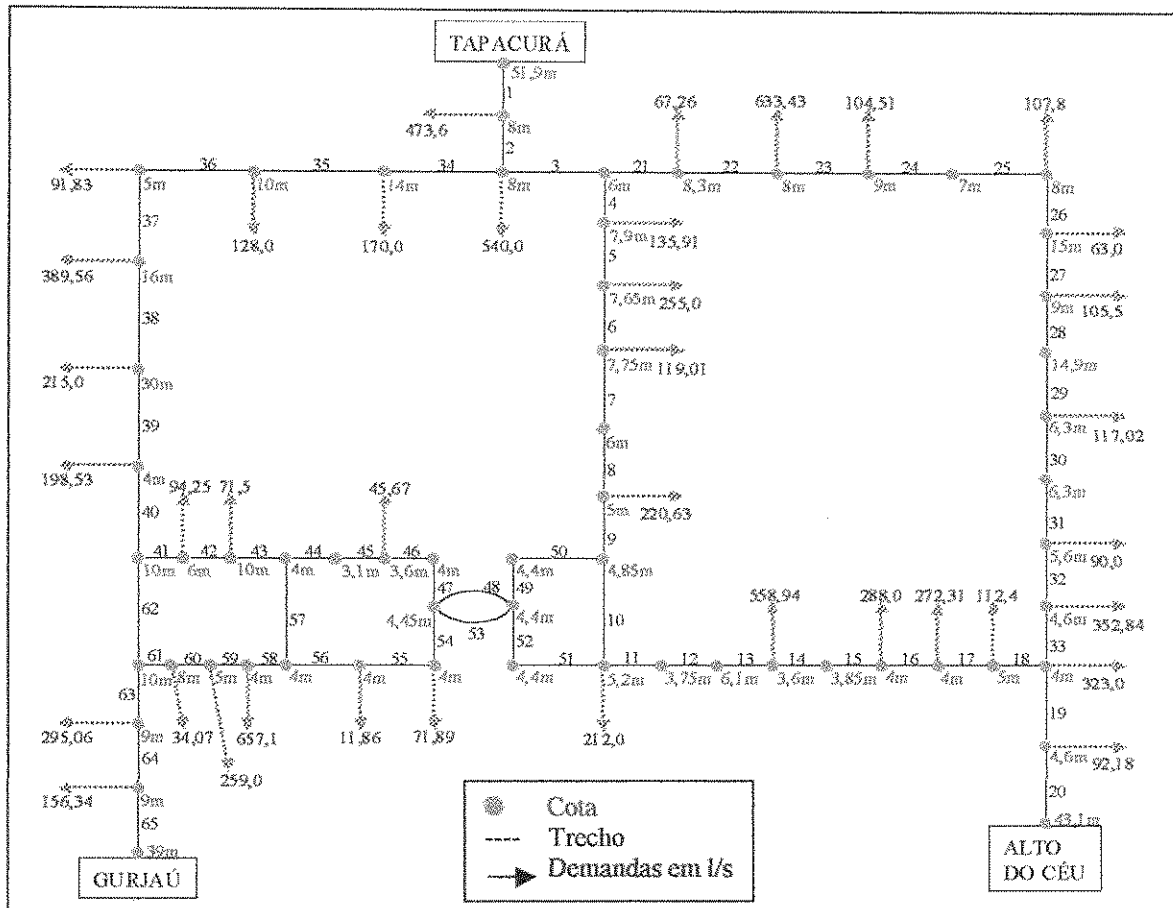


Figura 4.1: Esquema do Grande Anel da Rede de Distribuição de Água da cidade de Recife-PE (COMPESA, 1999).

Os dados referentes à rede de distribuição necessários para simulações no PNL2000 e WADISO estão descritos na tabela 4.1.

Tabela 4.1: Dados do Grande Anel fornecidos pela COMPESA em 1999.

| Nó | Cota (m) | Demanda (l/s) | Trecho | Diâmetro (mm) | Comprimento (m) | Coefficiente Hazen-Williams |
|-----|----------|---------------|--------|---------------|-----------------|-----------------------------|
| TAP | 51,9 | 0,00 | 1 | 1500 | 2537 | 130 |
| 1 | 8 | 473,60 | 2 | 1500 | 2340 | 130 |
| 2 | 8 | 540,00 | 3 | 1500 | 1310 | 130 |
| 3 | 6 | 0,00 | 4 | 1200 | 985 | 130 |
| 31 | 7,9 | 135,91 | 5 | 1200 | 302 | 130 |
| 30 | 7,65 | 255,00 | 6 | 1200 | 775 | 130 |
| 29 | 7,75 | 119,01 | 7 | 1200 | 690 | 130 |
| 28 | 6 | 0,00 | 8 | 1000 | 725 | 130 |
| 27 | 5 | 220,63 | 9 | 1000 | 378 | 130 |
| 26 | 4,85 | 0,00 | 10 | 1000 | 246 | 130 |
| 25 | 5,2 | 212,00 | 11 | 800 | 629 | 130 |
| 24 | 3,75 | 0,00 | 12 | 781 | 224 | 130 |

Continuação da Tabela 4.1:

| Nó | Cota (m) | Demanda (l/s) | Trecho | Diâmetro (mm) | Comprimento (m) | Coefficiente Hazen-Williams |
|-----|----------|---------------|--------|---------------|-----------------|-----------------------------|
| 23 | 6,1 | 0,00 | 13 | 800 | 248 | 130 |
| 22 | 3,6 | 558,94 | 14 | 900 | 615 | 130 |
| 21 | 3,85 | 0,00 | 15 | 900 | 547 | 130 |
| 20 | 4 | 288,00 | 16 | 800 | 1518 | 130 |
| 19 | 4 | 272,31 | 17 | 800 | 394 | 130 |
| 18 | 5 | 112,40 | 18 | 800 | 2070 | 130 |
| 16 | 4 | 323,00 | 19 | 800 | 820 | 130 |
| 4 | 8,3 | 67,26 | 20 | 800 | 914 | 130 |
| 5 | 8 | 633,43 | 21 | 1200 | 1698 | 130 |
| 6 | 9 | 104,51 | 22 | 1200 | 1112 | 130 |
| 7 | 7 | 0,00 | 23 | 900 | 922 | 130 |
| 8 | 8 | 107,80 | 24 | 900 | 403 | 130 |
| 9 | 15 | 63,00 | 25 | 800 | 860 | 130 |
| 10 | 9 | 105,49 | 26 | 700 | 298 | 130 |
| 11 | 14,9 | 0,00 | 27 | 700 | 360 | 130 |
| 12 | 6,3 | 117,02 | 28 | 700 | 724 | 130 |
| 13 | 6,3 | 0,00 | 29 | 600 | 1028 | 130 |
| 14 | 5,6 | 90,00 | 30 | 600 | 392 | 130 |
| 15 | 4,6 | 352,84 | 31 | 800 | 933 | 130 |
| 17 | 4,6 | 92,18 | 32 | 800 | 583 | 130 |
| CEU | 43,1 | 0,00 | 33 | 900 | 335 | 130 |
| 32 | 14 | 170,00 | 34 | 1200 | 1060 | 130 |
| 33 | 10 | 128,00 | 35 | 1200 | 175 | 130 |
| 34 | 5 | 91,83 | 36 | 1200 | 701 | 130 |
| 35 | 16 | 389,56 | 37 | 1000 | 1334 | 130 |
| 36 | 30 | 215,00 | 38 | 700 | 2228 | 130 |
| 37 | 4 | 198,53 | 39 | 600 | 1081 | 130 |
| 38 | 10 | 0,00 | 40 | 800 | 2120 | 130 |
| 39 | 6 | 94,25 | 41 | 1500 | 316 | 130 |
| 40 | 10 | 71,50 | 42 | 1500 | 696 | 130 |
| 41 | 4 | 0,00 | 43 | 1500 | 875 | 130 |
| 42 | 3,1 | 0,00 | 44 | 1200 | 960 | 130 |
| 43 | 3,6 | 45,67 | 45 | 1200 | 1205 | 130 |
| 44 | 4 | 0,00 | 46 | 1200 | 550 | 130 |
| 45 | 4,45 | 0,00 | 47 | 1200 | 235 | 130 |
| 46 | 4,4 | 0,00 | 48 | 1200 | 250 | 130 |
| 48 | 4,4 | 0,00 | 49 | 1200 | 350 | 130 |
| 47 | 4,4 | 71,89 | 50 | 1200 | 2450 | 130 |
| 49 | 4 | 11,86 | 51 | 750 | 2100 | 110 |
| 50 | 4 | 33,65 | 52 | 750 | 300 | 110 |
| 51 | 4 | 0,00 | 53 | 1200 | 250 | 130 |
| 52 | 4 | 657,10 | 54 | 976 | 350 | 110 |
| 53 | 5 | 259,00 | 55 | 976 | 1302 | 110 |
| 54 | 8 | 34,07 | 56 | 976 | 1060 | 110 |
| 55 | 10 | 0,00 | 57 | 900 | 264 | 130 |

Continuação da Tabela 4.1:

| Nó | Cota (m) | Demanda (l/s) | Trecho | Diâmetro (mm) | Comprimento (m) | Coefficiente Hazen-Williams |
|-----|----------|---------------|--------|---------------|-----------------|-----------------------------|
| 56 | 9 | 295,06 | 58 | 976 | 378 | 110 |
| 57 | 9 | 156,34 | 59 | 976 | 1124 | 110 |
| GRJ | 39 | 0,00 | 60 | 976 | 710 | 110 |
| | | | 61 | 976 | 150 | 110 |
| | | | 62 | 800 | 2120 | 130 |
| | | | 63 | 976 | 750 | 110 |
| | | | 64 | 976 | 250 | 110 |
| | | | 65 | 976 | 520 | 110 |

De acordo com as considerações assumidas para o coeficiente de Hazen-Williams e para os níveis dos reservatórios pode ocasionar distorções em relação à realidade da rede. Tem-se então que a simulação tanto no equilíbrio da rede através do WADISO como nas simulações feitas através do Método PNL2000 estão de acordo com a realidade impostas pelos dados fornecidos pela COMPESA (1999).

4.1.1.1. Resultados através do WADISO

Nesta rede de distribuição foi obtido o resultado através do WADISO, simulando o equilíbrio da rede com todo o Grande Anel em operação, ou seja, que todas as demandas estejam sendo atendidas. Tal simulação com seu respectivo resultado está disposto na tabela 4.2. Os dados de entrada do modelo relacionados na tabela 4.1, foram inseridos no modelo simulando-se o comportamento da rede, tendo a mesma que atender às características exigidas como vazão e pressão nos nós.

Tabela 4.2: Resultados obtidos após simulação no WADISO.

| Nó | Cota (m) | Pressão (mca) | Trecho | Trecho a Montante | Trecho a Jusante | Vazão (l/s) | Velocidade (m/s) |
|----------|----------|---------------|----------|-------------------|------------------|----------------|------------------|
| TAP | 51,9 | 10,00 | 1 | TAP | 1 | 4972,56 | 2,80 |
| 1 | 8 | 44,93 | 2 | 1 | 2 | 4498,93 | 2,56 |
| 2 | 8 | 38,04 | 3 | 2 | 3 | 2792,33 | 1,58 |
| 3 | 6 | 38,44 | 4 | 3 | 31 | 1614,11 | 1,43 |
| 31 | 7,9 | 35,27 | 5 | 31 | 30 | 1478,22 | 1,31 |
| 30 | 7,65 | 35,17 | 6 | 30 | 29 | 1223,20 | 1,07 |
| 29 | 7,75 | 34,47 | 7 | 29 | 28 | 1104,21 | 0,98 |

Continuação da Tabela 4.2:

| Nó | Cota (m) | Pressão (mca) | Trecho | Trecho a Montante | Trecho a Jusante | Vazão (l/s) | Velocidade (m/s) | |
|-----|----------|---------------|--------|-------------------|------------------|-------------|------------------|-------------|
| 28 | 6 | 35,75 | | 8 | 28 | 27 | 1104,21 | 1,40 |
| 27 | 5 | 35,63 | | 9 | 27 | 26 | 883,59 | 1,13 |
| 26 | 4,85 | 35,39 | | 10 | 26 | 25 | 818,16 | 1,04 |
| 25 | 5,2 | 34,81 | | 11 | 25 | 24 | 687,31 | 1,37 |
| 24 | 3,75 | 35,05 | | 12 | 24 | 23 | 687,31 | 1,43 |
| 23 | 6,1 | 32,22 | | 13 | 23 | 22 | 687,31 | 1,37 |
| 22 | 3,6 | 34,23 | | 14 | 22 | 21 | 128,39 | 0,21 |
| 21 | 3,85 | 33,96 | | 15 | 21 | 20 | 128,39 | 0,21 |
| 20 | 4 | 33,77 | | 16 | 20 | 19 | 159,62 | 0,30 |
| 19 | 4 | 33,96 | | 17 | 19 | 18 | 431,92 | 0,85 |
| 18 | 5 | 33,28 | | 18 | 18 | 16 | 544,35 | 1,10 |
| 16 | 4 | 36,88 | | 19 | 16 | 17 | 1330,46 | 2,65 |
| 4 | 8,3 | 34,90 | | 20 | 17 | CEU | 1422,63 | 2,83 |
| 5 | 8 | 34,47 | | 21 | 3 | 4 | 1178,22 | 1,04 |
| 6 | 9 | 32,95 | | 22 | 4 | 5 | 1110,96 | 0,98 |
| 7 | 7 | 34,81 | | 23 | 5 | 6 | 477,53 | 0,76 |
| 8 | 8 | 33,28 | | 24 | 6 | 7 | 373,06 | 0,58 |
| 9 | 15 | 26,09 | | 25 | 7 | 8 | 373,06 | 0,73 |
| 10 | 9 | 31,94 | | 26 | 8 | 9 | 265,23 | 0,70 |
| 11 | 14,9 | 25,97 | | 27 | 9 | 10 | 202,21 | 0,52 |
| 12 | 6,3 | 34,38 | | 28 | 10 | 11 | 96,72 | 0,24 |
| 13 | 6,3 | 34,38 | | 29 | 11 | 12 | 96,72 | 0,34 |
| 14 | 5,6 | 35,08 | | 30 | 12 | 13 | 20,25 | 0,06 |
| 15 | 4,6 | 36,12 | | 31 | 13 | 14 | 20,25 | 0,03 |
| 17 | 4,6 | 41,70 | | 32 | 14 | 15 | 110,28 | 0,21 |
| CEU | 43,1 | 10,00 | | 33 | 15 | 16 | 463,15 | 0,73 |
| 32 | 14 | 31,27 | | 34 | 2 | 32 | 1166,61 | 1,04 |
| 33 | 10 | 35,17 | | 35 | 32 | 33 | 996,58 | 0,88 |
| 34 | 5 | 39,90 | | 36 | 33 | 34 | 868,63 | 0,76 |
| 35 | 16 | 27,80 | | 37 | 34 | 35 | 776,77 | 0,98 |
| 36 | 30 | 10,94 | | 38 | 35 | 36 | 387,19 | 1,01 |
| 37 | 4 | 36,27 | | 39 | 36 | 37 | 172,24 | 0,61 |
| 38 | 10 | 30,30 | | 40 | 37 | 38 | 26,31 | 0,06 |
| 39 | 6 | 34,29 | | 41 | 38 | 39 | 433,75 | 0,24 |
| 40 | 10 | 30,27 | | 42 | 39 | 40 | 339,55 | 0,18 |
| 41 | 4 | 36,24 | | 43 | 40 | 41 | 268,01 | 0,15 |
| 42 | 3,1 | 37,13 | | 44 | 41 | 42 | 123,85 | 0,12 |
| 43 | 3,6 | 36,64 | | 45 | 42 | 43 | 123,85 | 0,12 |
| 44 | 4 | 36,21 | | 46 | 43 | 44 | 78,17 | 0,06 |
| 45 | 4,45 | 35,78 | | 47 | 44 | 45 | 78,17 | 0,06 |
| 46 | 4,4 | 35,78 | | 48 | 45 | 46 | 43,85 | 0,03 |
| 48 | 4,4 | 35,81 | | 49 | 46 | 48 | 65,43 | 0,06 |
| 47 | 4,4 | 35,75 | | 50 | 48 | 26 | 65,43 | 0,06 |

Continuação da Tabela 4.2:

| Nó | Cota (m) | Pressão (mca) | Trecho | Trecho a Montante | Trecho a Jusante | Vazão (l/s) | Velocidade (m/s) |
|-----|----------|---------------|--------|-------------------|------------------|-------------|------------------|
| 49 | 4 | 36,21 | 51 | 47 | 25 | 81,13 | 0,18 |
| 50 | 4 | 36,21 | 52 | 46 | 47 | 153,06 | 0,34 |
| 51 | 4 | 36,24 | 53 | 45 | 46 | 43,85 | 0,03 |
| 52 | 4 | 36,24 | 54 | 45 | 49 | 9,53 | 0,02 |
| 53 | 5 | 36,03 | 55 | 49 | 50 | 21,39 | 0,03 |
| 54 | 8 | 34,02 | 56 | 50 | 51 | 55,02 | 0,06 |
| 55 | 10 | 32,25 | 57 | 41 | 51 | 144,23 | 0,21 |
| 56 | 9 | 35,75 | 58 | 51 | 52 | 89,15 | 0,12 |
| 57 | 9 | 37,00 | 59 | 52 | 53 | 567,94 | 0,76 |
| GRJ | 39 | 10,00 | 60 | 53 | 54 | 826,93 | 1,10 |
| | | | 61 | 54 | 55 | 861,00 | 1,16 |
| | | | 62 | 38 | 55 | 460,12 | 0,91 |
| | | | 63 | 55 | 56 | 1321,12 | 1,77 |
| | | | 64 | 59 | 57 | 1628,75 | 2,16 |
| | | | 65 | 57 | GRJ | 1772,47 | 2,38 |

Nessa simulação procurou-se atender apenas ao equilíbrio da rede. As pressões médias nos nós têm valores em torno de 34 m.c.a, a pressão mínima encontrada é de 10,94 m.c.a e a máxima pressão encontrada é de 44,93 m.c.a.

As demandas dos reservatórios somam 8.167,66 l/s com a simulação feita pelo método WADISO, isto mostra um acréscimo na vazão requerida pela rede, já que a fornecida inicialmente na tabela 4.1 é de 8.156 l/s.

4.1.1.2. Resultados através do método PNL2000

A simulação utilizando-se o método PNL2000 na rede de distribuição de água da cidade de Recife-PE teve como dados iniciais (tabela 4.3) os mesmos utilizados pelo método WADISO. Na primeira simulação procurou-se o equilíbrio da rede e seus resultados encontra-se na tabela 4.4.

A primeiro passo para a simulação no Grande Anel de Recife foi a edição da planilha do método PNL2000 e a definição da *Função Objetivo*. É necessário se observar que para esta rede malhada a simulação não levará em conta as variáveis econômicas para eventuais modificações na estrutura da rede.

A *Função Objetivo* corresponde à Equação da Conservação de Energia nos anéis da rede, que em equilíbrio hidráulico tem um valor nulo, pois esta equação tem ao final um valor fixo conhecido, mesmo que ocorra a redundância na sua utilização como Função Objetivo e Restrição:

$$h_{f21}+h_{f22}+h_{f23}+h_{f24}+h_{f25}+h_{f26}+h_{f27}-h_{f28}+h_{f29}-h_{f30}-h_{f31}-h_{f32}-h_{f33}+h_{f34}+h_{f35}+h_{f36}+h_{f37}+h_{f38}+h_{f39}-h_{f40}-h_{f41}-h_{f42}-h_{f43}-h_{f44} = 0 \quad (4.1)$$

- h_{fn} corresponde à perda de carga no trecho n .

As *Células Variáveis* na simulação desta rede será a coluna referente às vazões nos trechos e a altura manométrica de alimentação da rede, conforme apresentado na figura 4.2 e na tabela 4.4.

As *Restrições* impostas à rede de distribuição para seu equilíbrio hidráulico, são:

$$\sum_{i=1}^{k_n} Q_{entra_i} - \sum_{j=1}^{q_n} Q_{sai_j} = d_n \quad (4.2)$$

- A *Equação da Continuidade*, em todos os cinquenta e sete nós da rede a vazão que entra em um trecho deve ser igual à vazão que sai, tendo a diferença igual a zero para que a rede de abastecimento esteja em equilíbrio. Na equação tem-se que o somatório da vazão que entra em um determinado nó menos o somatório da vazão que sai do mesmo nó deve ser igual à demanda no nó (mesmo que a demanda seja igual a zero) que liga dois trechos, esse valor deve ser igual a zero.

$$\sum_{i=1}^{r_k} (h_f)_i - \sum_{j=1}^{p_k} E_{p_j} = 0 \quad (4.3)$$

- A *Equação da Conservação de Energia* em todos os seis anéis da rede devem ser iguais a zero para que a rede de abastecimento esteja equilibrada. Segundo esta restrição, em cada anel da rede o somatório das perdas de carga é nulo, ou seja, escolhendo-se um nó qualquer do anel, o somatório das perdas de carga obtidos em um percurso é igual ao somatório das perdas de carga encontrados pelo caminho oposto.

Após definidas as equações a serem utilizadas pelo método, segue-se a edição da planilha do método PNL2000 de acordo com as equações mostradas no capítulo anterior

(item 3.2.1.2). A primeira parte da planilha refere-se aos cálculos hidráulicos da rede e a segunda parte da planilha refere-se às restrições.

- Primeira parte da planilha:

Coluna B: identificação dos trechos;

Coluna C: vazão nos trechos. Dados fornecidos e que são variáveis a serem ajustadas hidráulicamente na simulação. Os dados referentes à vazão nos trechos devem ser atribuídos levando-se em consideração as demandas nos nós, garantindo o abastecimento a todos os pontos de consumo da rede.

Coluna C (linha 68): altura manométrica do reservatório em metros. Este dado foi fornecido inicialmente como sendo de 10 metros de coluna de água;

Coluna C (linha 69): altura piezométrica de cabeceira em metros. Este valor é obtido pela soma da altura manométrica com a cota do terreno no reservatório menos elevado, o correspondente a menor cota é o reservatório de Gurjaú;

Coluna D: diâmetros da tubulação. Em simulações de redes existentes, estes valores são fornecidos pelo projeto de abastecimento;

Coluna E: coeficiente de Hazen-Williams. Foram adotados pela COMPESA (1999) como sendo 110 e 130, em trechos diferenciados, devido ao tempo de vida útil da rede;

Coluna F: comprimento dos trechos em metros. Estes valores são fornecidos pela COMPESA (1999) através de seu projeto;

Coluna G: perdas de carga em metros de coluna de água. Calculados através da fórmula de Hazen-Williams de perda de carga contínua;

Coluna H: velocidade média nos trechos em m/s.

- Segunda parte da planilha:

Coluna B: identificação dos nós;

Coluna C: altura piezométrica do nó em mca. Este valor é calculado pela diferença entre a altura piezométrica do nó a montante e a perda de carga do trecho a montante;

Coluna D: demanda dos nós em l/s. Este valor foi fornecido pela COMPESA (1999);

Coluna E: cota topográfica em metros. Fornecido pela COMPESA (1999);

Coluna F: pressão disponível no nó em mca. O seu cálculo corresponde à diferença entre a altura piezométrica e a cota do terreno do nó;

Coluna G: equação da continuidade nos nós. Obtida através da equação 3.7;

Coluna H: equação da conservação de energia nos anéis. Obtida através da equação 3.6.

A tabela 4.3 é a planilha inicial antes de qualquer simulação ou equilíbrio.

Tabela 4.3: Planilha inicial do Grande Anel de Distribuição da cidade de Recife-PE.

Primeira Parte da Planilha

| A | B | C | D | E | F | G | H |
|----|--------|-------------|---------------|-------|-----------------|--------------|------------------|
| | Trecho | Vazão (l/s) | Diâmetro (mm) | Coef. | Comprimento (m) | Perdas (mca) | Velocidade (m/s) |
| 3 | 1 | 4943,40 | 1500 | 130 | 2537 | 8,807 | 2,80 |
| 4 | 2 | 4469,80 | 1500 | 130 | 2340 | 6,741 | 2,53 |
| 5 | 3 | 2956,88 | 1500 | 130 | 1310 | 1,756 | 1,67 |
| 6 | 4 | 1916,12 | 1200 | 130 | 985 | 1,752 | 1,70 |
| 7 | 5 | 1780,21 | 1200 | 130 | 302 | 0,469 | 1,57 |
| 8 | 6 | 1525,21 | 1200 | 130 | 776 | 0,905 | 1,35 |
| 9 | 7 | 1406,20 | 1200 | 130 | 690 | 0,692 | 1,24 |
| 10 | 8 | 1406,20 | 1000 | 130 | 725 | 1,767 | 1,79 |
| 11 | 9 | 1185,57 | 1000 | 130 | 378 | 0,672 | 1,51 |
| 12 | 10 | 638,83 | 1000 | 130 | 246 | 0,139 | 0,81 |
| 13 | 11 | 826,83 | 800 | 130 | 629 | 1,700 | 1,65 |
| 14 | 12 | 826,83 | 781 | 130 | 224 | 0,680 | 1,73 |
| 15 | 13 | 826,83 | 800 | 130 | 248 | 0,670 | 1,65 |
| 16 | 14 | 267,89 | 900 | 130 | 615 | 0,116 | 0,42 |
| 17 | 15 | 267,89 | 900 | 130 | 547 | 0,103 | 0,42 |
| 18 | 16 | 20,11 | 800 | 130 | 1518 | 0,004 | 0,04 |
| 19 | 17 | 292,42 | 800 | 130 | 394 | 0,155 | 0,58 |
| 20 | 18 | 404,82 | 800 | 130 | 2070 | 1,490 | 0,81 |
| 21 | 19 | 1328,42 | 800 | 130 | 820 | 5,332 | 2,64 |
| 22 | 20 | 1420,60 | 800 | 130 | 914 | 6,730 | 2,83 |
| 23 | 21 | 1040,76 | 1200 | 130 | 1698 | 0,975 | 0,92 |
| 24 | 22 | 973,50 | 1200 | 130 | 1112 | 0,564 | 0,86 |
| 25 | 23 | 340,07 | 900 | 130 | 922 | 0,271 | 0,53 |
| 26 | 24 | 235,56 | 900 | 130 | 403 | 0,060 | 0,37 |
| 27 | 25 | 235,56 | 800 | 130 | 860 | 0,227 | 0,47 |
| 28 | 26 | 127,76 | 700 | 130 | 298 | 0,049 | 0,33 |
| 29 | 27 | 64,76 | 700 | 130 | 360 | 0,017 | 0,17 |
| 30 | 28 | 40,74 | 700 | 130 | 724 | 0,014 | 0,11 |
| 31 | 29 | 40,74 | 600 | 130 | 1028 | 0,043 | 0,14 |
| 32 | 30 | 157,76 | 600 | 130 | 392 | 0,200 | 0,56 |
| 33 | 31 | 157,76 | 800 | 130 | 933 | 0,117 | 0,31 |
| 34 | 32 | 247,76 | 800 | 130 | 583 | 0,169 | 0,49 |
| 35 | 33 | 600,60 | 900 | 130 | 335 | 0,282 | 0,94 |
| 36 | 34 | 972,92 | 1200 | 130 | 1060 | 0,537 | 0,86 |
| 37 | 35 | 802,92 | 1200 | 130 | 175 | 0,062 | 0,71 |
| 38 | 36 | 674,92 | 1200 | 130 | 701 | 0,181 | 0,60 |

Continuação da Tabela 4.3:

| | Trecho | Vazão (l/s) | Diâmetro (mm) | Coef. | Comprimento (m) | Perdas (mca) | Velocidade (m/s) | |
|----|----------------------------------|------------------|---------------|----------|--------------------------|-------------------------|----------------------|--------|
| 39 | 37 | 583,09 | 1000 | 130 | 1334 | 0,637 | 0,74 | |
| 40 | 38 | 193,53 | 700 | 130 | 2228 | 0,784 | 0,50 | |
| 41 | 39 | 21,47 | 600 | 130 | 1081 | 0,014 | 0,08 | |
| 42 | 40 | 220,00 | 800 | 130 | 2120 | 0,493 | 0,44 | |
| 43 | 41 | 298,60 | 1500 | 130 | 316 | 0,006 | 0,17 | |
| 44 | 42 | 204,35 | 1500 | 130 | 696 | 0,007 | 0,12 | |
| 45 | 43 | 132,85 | 1500 | 130 | 875 | 0,004 | 0,08 | |
| 46 | 44 | 52,85 | 1200 | 130 | 960 | 0,002 | 0,05 | |
| 47 | 45 | 52,85 | 1200 | 130 | 1205 | 0,003 | 0,05 | |
| 48 | 46 | 7,18 | 1200 | 130 | 550 | 0,000 | 0,01 | |
| 49 | 47 | 7,18 | 1200 | 130 | 235 | 0,000 | 0,01 | |
| 50 | 48 | 71,74 | 1200 | 130 | 250 | 0,001 | 0,06 | |
| 51 | 49 | 546,74 | 1200 | 130 | 350 | 0,061 | 0,48 | |
| 52 | 50 | 546,74 | 1200 | 130 | 2450 | 0,427 | 0,48 | |
| 53 | 51 | 400,00 | 750 | 110 | 2100 | 2,759 | 0,91 | |
| 54 | 52 | 400,00 | 750 | 110 | 300 | 0,394 | 0,91 | |
| 55 | 53 | 75,00 | 1200 | 130 | 250 | 0,001 | 0,07 | |
| 56 | 54 | 153,92 | 976 | 110 | 350 | 0,022 | 0,21 | |
| 57 | 55 | 82,03 | 976 | 110 | 1302 | 0,025 | 0,11 | |
| 58 | 56 | 70,17 | 976 | 110 | 1060 | 0,015 | 0,09 | |
| 59 | 57 | 80,00 | 900 | 130 | 264 | 0,005 | 0,13 | |
| 60 | 58 | 150,17 | 976 | 110 | 378 | 0,022 | 0,20 | |
| 61 | 59 | 506,93 | 976 | 110 | 1124 | 0,635 | 0,68 | |
| 62 | 60 | 765,93 | 976 | 110 | 710 | 0,861 | 1,02 | |
| 63 | 61 | 800,00 | 976 | 110 | 150 | 0,197 | 1,07 | |
| 64 | 62 | 518,60 | 800 | 130 | 2120 | 2,415 | 1,03 | |
| 65 | 63 | 1318,60 | 976 | 130 | 750 | 1,827 | 1,76 | |
| 66 | 64 | 1613,66 | 976 | 130 | 250 | 0,885 | 2,16 | |
| 67 | 65 | 1770,00 | 976 | 130 | 520 | 2,185 | 2,37 | |
| 68 | Man. reser. | 10 | | | | | | |
| 69 | Piez. Cab. | 49,00 | | | | | | |
| 70 | Segunda parte da Planilha | | | | | | | |
| | Nó | Alt. Piez. (mca) | Demanda (l/s) | Cota (m) | Pressão Disponível (mca) | Equação da Continuidade | Eq. Cons. de energia | |
| 71 | | | | | | | | |
| 72 | TAP | 61,90 | 0,00 | 51,90 | 10,00 | 0,00 | -6,678 | Anel 1 |
| 73 | 1 | 53,09 | 473,60 | 8,00 | 45,09 | 0,00 | 6,787 | Anel 2 |
| 74 | 2 | 46,35 | 540,00 | 8,00 | 38,35 | 0,00 | -3,503 | Anel 3 |
| 75 | 3 | 44,60 | 0,00 | 6,00 | 38,60 | 0,00 | 0,000 | Anel 4 |
| 76 | 4 | 43,62 | 67,26 | 8,30 | 35,32 | 0,00 | 0,062 | Anel 5 |
| 77 | 5 | 43,06 | 633,43 | 8,00 | 35,06 | 0,00 | 0,765 | Anel 6 |
| 78 | 6 | 42,79 | 104,51 | 9,00 | 33,79 | 0,00 | | |
| 79 | 7 | 42,73 | 0,00 | 7,00 | 35,73 | 0,00 | | |
| 80 | 8 | 42,50 | 107,80 | 8,00 | 34,50 | 0,00 | | |
| 81 | 9 | 42,45 | 63,00 | 15,00 | 27,45 | 0,00 | | |

Continuação da Tabela 4.3:

| | Nó | Alt. Piez. (mca) | Demanda (l/s) | Cota (m) | Pressão Disponível (mca) | Equação da Continuidade |
|-----|-----|---------------------|------------------|-------------|--------------------------------|-------------------------------|
| 82 | 10 | 42,43 | 105,50 | 9,00 | 33,43 | 0,00 |
| 83 | 11 | 40,23 | 0,00 | 14,90 | 25,33 | 0,00 |
| 84 | 12 | 40,27 | 117,02 | 6,30 | 33,97 | 0,00 |
| 85 | 13 | 40,47 | 0,00 | 6,30 | 34,17 | 0,00 |
| 86 | 14 | 40,59 | 90,00 | 5,60 | 34,99 | 0,00 |
| 87 | 15 | 40,76 | 352,84 | 4,60 | 36,16 | 0,00 |
| 88 | 16 | 41,04 | 323,00 | 4,00 | 37,04 | 0,00 |
| 89 | 17 | 46,37 | 92,18 | 4,60 | 41,77 | 0,00 |
| 90 | CÉU | 53,10 | 0,00 | 43,10 | 10,00 | 0,00 |
| 91 | 18 | 39,55 | 112,40 | 5,00 | 34,55 | 0,00 |
| 92 | 19 | 39,39 | 272,31 | 4,00 | 35,39 | 0,00 |
| 93 | 20 | 34,93 | 288,00 | 4,00 | 30,93 | 0,00 |
| 94 | 21 | 35,03 | 0,00 | 3,85 | 31,18 | 0,00 |
| 95 | 22 | 35,15 | 558,94 | 3,60 | 31,55 | 0,00 |
| 96 | 23 | 35,82 | 0,00 | 6,10 | 29,72 | 0,00 |
| 97 | 24 | 36,50 | 0,00 | 3,75 | 32,75 | 0,00 |
| 98 | 25 | 38,20 | 212,00 | 5,20 | 33,00 | 0,00 |
| 99 | 26 | 38,34 | 0,00 | 4,85 | 33,49 | 0,00 |
| 100 | 27 | 39,01 | 220,63 | 5,00 | 34,01 | 0,00 |
| 101 | 28 | 40,78 | 0,00 | 6,00 | 34,78 | 0,00 |
| 102 | 29 | 41,47 | 119,01 | 7,75 | 33,72 | 0,00 |
| 103 | 30 | 42,38 | 255,00 | 7,65 | 34,73 | 0,00 |
| 104 | 31 | 42,84 | 135,91 | 7,90 | 34,94 | 0,00 |
| 105 | 32 | 45,81 | 170,00 | 14,00 | 31,81 | 0,00 |
| 106 | 33 | 45,75 | 128,00 | 10,00 | 35,75 | 0,00 |
| 107 | 34 | 45,57 | 91,83 | 5,00 | 40,57 | 0,00 |
| 108 | 35 | 44,94 | 389,56 | 16,00 | 28,94 | 0,00 |
| 109 | 36 | 44,15 | 215,00 | 30,00 | 14,15 | 0,00 |
| 110 | 37 | 41,20 | 198,53 | 4,00 | 37,20 | 0,00 |
| 111 | 38 | 41,69 | 0,00 | 10,00 | 31,69 | 0,00 |
| 112 | 39 | 41,68 | 94,25 | 6,00 | 35,68 | 0,00 |
| 113 | 40 | 41,68 | 71,50 | 10,00 | 31,68 | 0,00 |
| 114 | 41 | 41,67 | 0,00 | 4,00 | 37,67 | 0,00 |
| 115 | 42 | 41,67 | 0,00 | 3,10 | 38,57 | 0,00 |
| 116 | 43 | 41,67 | 45,67 | 3,60 | 38,07 | 0,00 |
| 117 | 44 | 41,67 | 0,00 | 4,00 | 37,67 | 0,00 |
| 118 | 45 | 37,85 | 0,00 | 4,45 | 33,40 | 0,00 |
| 119 | 46 | 37,85 | 0,00 | 4,40 | 33,45 | 0,00 |
| 120 | 47 | 37,46 | 0,00 | 4,40 | 33,06 | 0,00 |
| 121 | 48 | 37,91 | 0,00 | 4,40 | 33,51 | 0,00 |
| 122 | 49 | 37,83 | 71,89 | 4,00 | 33,83 | 0,00 |
| 123 | 50 | 37,80 | 11,86 | 4,00 | 33,80 | 0,00 |
| 124 | 51 | 37,79 | 0,00 | 4,00 | 33,79 | 0,00 |
| 125 | 52 | 42,41 | 657,10 | 4,00 | 38,41 | 0,00 |

Continuação da Tabela 4.3:

| | Nó | Alt. Piez. (mca) | Demanda (l/s) | Cota (m) | Pressão Disponível (mca) | Equação da Continuidade |
|-----|-----|---------------------|------------------|-------------|--------------------------------|-------------------------------|
| 126 | 53 | 43,05 | 259,00 | 5,00 | 38,05 | 0,00 |
| 127 | 54 | 43,91 | 34,07 | 8,00 | 35,91 | 0,00 |
| 128 | 55 | 44,10 | 0,00 | 10,00 | 34,10 | 0,00 |
| 129 | 56 | 45,93 | 295,06 | 9,00 | 36,93 | 0,00 |
| 130 | 57 | 46,82 | 156,34 | 9,00 | 37,82 | 0,00 |
| 131 | GRJ | 49,00 | 0,00 | 39,00 | 10,00 | 0,00 |

Após a edição da planilha inicial com os devidos valores, se utiliza a ferramenta Solver para o início da simulação. A figura 4.2 apresenta o quadro de parâmetros da ferramenta.

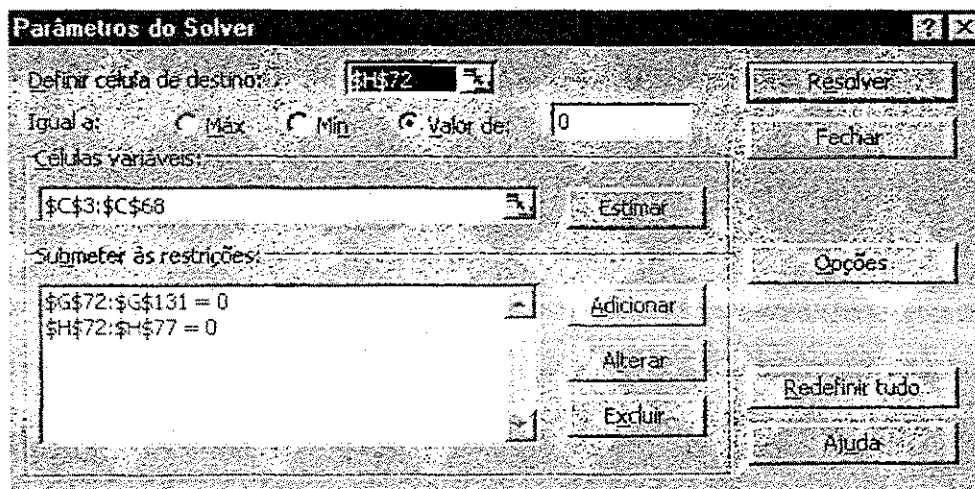


Figura 4.2: Caixa de Parâmetros do Solver a serem otimizados no equilíbrio da rede.

A *Célula Destino* ou a *Função Objetivo* na figura 4.2 é tida como uma das células da equação da conservação de energia (H72) que deve assumir o valor igual a zero. As *Células Variáveis* compreendem a coluna referente às vazões em todos os trechos e a altura manométrica (C3 a C68). As restrições exigidas para o equilíbrio da rede referem-se as equações de continuidade (G72 a G131) e de conservação de energia (H72 a H77), que devem ser iguais a zero.

Após *Resolver*, a ferramenta Solver modifica os dados da planilha inicial (tabela 4.3), fornecendo os resultados encontrados na simulação de parâmetros modificados de acordo com os valores impostos à célula de destino, as células variáveis e às restrições. Tais resultados são mostrados na tabela 4.4.

Tabela 4.4: Resultados obtidos após simulação com o método PNL2000 para equilíbrio da rede – cenário A.

Primeira Parte da Planilha

| A | B | C | D | E | F | G | H |
|----|--------|-------------|---------------|-------|-----------------|--------------|------------------|
| | Trecho | Vazão (l/s) | Diâmetro (mm) | Coef. | Comprimento (m) | Perdas (mca) | Velocidade (m/s) |
| 3 | 1 | 4900,52 | 1500 | 130 | 2537 | 8,666 | 2,77 |
| 4 | 2 | 4426,92 | 1500 | 130 | 2340 | 6,622 | 2,51 |
| 5 | 3 | 2727,39 | 1500 | 130 | 1310 | 1,512 | 1,54 |
| 6 | 4 | 1592,49 | 1200 | 130 | 985 | 1,244 | 1,41 |
| 7 | 5 | 1456,58 | 1200 | 130 | 302 | 0,323 | 1,29 |
| 8 | 6 | 1201,58 | 1200 | 130 | 776 | 0,582 | 1,06 |
| 9 | 7 | 1082,57 | 1200 | 130 | 690 | 0,426 | 0,96 |
| 10 | 8 | 1082,57 | 1000 | 130 | 725 | 1,089 | 1,38 |
| 11 | 9 | 861,94 | 1000 | 130 | 378 | 0,372 | 1,10 |
| 12 | 10 | 780,72 | 1000 | 130 | 246 | 0,202 | 0,99 |
| 13 | 11 | 655,82 | 800 | 130 | 629 | 1,107 | 1,31 |
| 14 | 12 | 655,82 | 781 | 130 | 224 | 0,443 | 1,37 |
| 15 | 13 | 655,82 | 800 | 130 | 248 | 0,436 | 1,31 |
| 16 | 14 | 96,88 | 900 | 130 | 615 | 0,018 | 0,15 |
| 17 | 15 | 96,88 | 900 | 130 | 547 | 0,016 | 0,15 |
| 18 | 16 | 191,12 | 800 | 130 | 1518 | 0,272 | 0,38 |
| 19 | 17 | 463,43 | 800 | 130 | 394 | 0,364 | 0,92 |
| 20 | 18 | 575,83 | 800 | 130 | 2070 | 2,862 | 1,15 |
| 21 | 19 | 1405,29 | 800 | 130 | 820 | 5,918 | 2,80 |
| 22 | 20 | 1497,47 | 800 | 130 | 914 | 7,420 | 2,98 |
| 23 | 21 | 1134,90 | 1200 | 130 | 1698 | 1,145 | 1,00 |
| 24 | 22 | 1067,64 | 1200 | 130 | 1112 | 0,670 | 0,94 |
| 25 | 23 | 434,21 | 900 | 130 | 922 | 0,426 | 0,68 |
| 26 | 24 | 329,70 | 900 | 130 | 403 | 0,112 | 0,52 |
| 27 | 25 | 329,70 | 800 | 130 | 860 | 0,423 | 0,66 |
| 28 | 26 | 221,90 | 700 | 130 | 298 | 0,135 | 0,58 |
| 29 | 27 | 158,90 | 700 | 130 | 360 | 0,088 | 0,41 |
| 30 | 28 | -53,40 | 700 | 130 | 724 | -0,023 | 0,14 |
| 31 | 29 | -53,40 | 600 | 130 | 1028 | -0,071 | 0,19 |
| 32 | 30 | 63,62 | 600 | 130 | 392 | 0,037 | 0,23 |
| 33 | 31 | 63,62 | 800 | 130 | 933 | 0,022 | 0,13 |
| 34 | 32 | 153,62 | 800 | 130 | 583 | 0,070 | 0,31 |
| 35 | 33 | 506,46 | 900 | 130 | 335 | 0,206 | 0,80 |
| 36 | 34 | 1159,53 | 1200 | 130 | 1060 | 0,744 | 1,03 |
| 37 | 35 | 989,53 | 1200 | 130 | 175 | 0,092 | 0,88 |
| 38 | 36 | 861,53 | 1200 | 130 | 701 | 0,284 | 0,76 |
| 39 | 37 | 769,70 | 1000 | 130 | 1334 | 1,065 | 0,98 |
| 40 | 38 | 380,14 | 700 | 130 | 2228 | 2,736 | 0,99 |
| 41 | 39 | -165,14 | 600 | 130 | 1081 | -0,600 | 0,58 |
| 42 | 40 | 33,39 | 800 | 130 | 2120 | 0,015 | 0,07 |

Continuação da Tabela 4.4:

| | Trecho | Vazão (l/s) | Diâmetro (mm) | Coef. | Comprimento (m) | Perdas (mca) | Velocidade (m/s) |
|----|-------------|-------------|---------------|-------|-----------------|--------------|------------------|
| 43 | 41 | 412,11 | 1500 | 130 | 316 | 0,011 | 0,23 |
| 44 | 42 | 317,86 | 1500 | 130 | 696 | 0,015 | 0,18 |
| 45 | 43 | 246,36 | 1500 | 130 | 875 | 0,012 | 0,14 |
| 46 | 44 | 102,19 | 1200 | 130 | 960 | 0,007 | 0,09 |
| 47 | 45 | 102,19 | 1200 | 130 | 1205 | 0,009 | 0,09 |
| 48 | 46 | 56,52 | 1200 | 130 | 550 | 0,001 | 0,05 |
| 49 | 47 | 56,52 | 1200 | 130 | 235 | 0,001 | 0,05 |
| 50 | 48 | -2,66 | 1200 | 130 | 250 | 0,000 | 0,00 |
| 51 | 49 | 81,22 | 1200 | 130 | 350 | 0,002 | 0,07 |
| 52 | 50 | 81,22 | 1200 | 130 | 2450 | 0,013 | 0,07 |
| 53 | 51 | 87,10 | 750 | 110 | 2100 | 0,164 | 0,20 |
| 54 | 52 | 87,10 | 750 | 110 | 300 | 0,023 | 0,20 |
| 55 | 53 | -3,22 | 1200 | 130 | 250 | 0,000 | 0,00 |
| 56 | 54 | 50,63 | 976 | 110 | 350 | 0,003 | 0,07 |
| 57 | 55 | -21,26 | 976 | 110 | 1302 | -0,002 | 0,03 |
| 58 | 56 | -33,12 | 976 | 110 | 1060 | -0,004 | 0,04 |
| 59 | 57 | 144,17 | 900 | 130 | 264 | 0,016 | 0,23 |
| 60 | 58 | 111,06 | 976 | 110 | 378 | 0,013 | 0,15 |
| 61 | 59 | 546,04 | 976 | 110 | 1124 | 0,729 | 0,73 |
| 62 | 60 | 805,04 | 976 | 110 | 710 | 0,945 | 1,08 |
| 63 | 61 | 839,11 | 976 | 110 | 150 | 0,216 | 1,12 |
| 64 | 62 | 445,50 | 800 | 130 | 2120 | 1,823 | 0,89 |
| 65 | 63 | 1284,61 | 976 | 130 | 750 | 1,740 | 1,72 |
| 66 | 64 | 1579,67 | 976 | 130 | 250 | 0,851 | 2,11 |
| 67 | 65 | 1736,01 | 976 | 130 | 520 | 2,108 | 2,32 |
| 68 | Man. reser. | 10 | | | | | |
| 69 | Piez. Cab. | 49,00 | | | | | |

70 Segunda Parte da Planilha

| | Nó | Alt. Piez. (mca) | Demanda (l/s) | Cota (m) | Pressão Disponível (mca) | Equação da Continuidade | Eq. Cons. de energia | |
|----|-----|------------------|---------------|----------|--------------------------|-------------------------|----------------------|--------|
| 71 | | | | | | | | |
| 72 | TAP | 61,90 | 0,00 | 51,90 | 10,00 | 0,00 | 0,000 | Anel 1 |
| 73 | 1 | 53,23 | 473,60 | 8,00 | 45,23 | 0,00 | 0,000 | Anel 2 |
| 74 | 2 | 46,61 | 540,00 | 8,00 | 38,61 | 0,00 | 0,000 | Anel 3 |
| 75 | 3 | 45,10 | 0,00 | 6,00 | 39,10 | 0,00 | 0,000 | Anel 4 |
| 76 | 4 | 43,96 | 67,26 | 8,30 | 35,66 | 0,00 | 0,000 | Anel 5 |
| 77 | 5 | 43,29 | 633,43 | 8,00 | 35,29 | 0,00 | 0,000 | Anel 6 |
| 78 | 6 | 42,86 | 104,51 | 9,00 | 33,86 | 0,00 | | |
| 79 | 7 | 42,75 | 0,00 | 7,00 | 35,75 | 0,00 | | |
| 80 | 8 | 42,32 | 107,80 | 8,00 | 34,32 | 0,00 | | |
| 81 | 9 | 42,19 | 63,00 | 15,00 | 27,19 | 0,00 | | |
| 82 | 10 | 42,10 | 105,50 | 9,00 | 33,10 | 0,00 | | |
| 83 | 11 | 39,50 | 0,00 | 14,90 | 24,60 | 0,00 | | |
| 84 | 12 | 39,43 | 117,02 | 6,30 | 33,13 | 0,00 | | |
| 85 | 13 | 39,46 | 0,00 | 6,30 | 33,16 | 0,00 | | |

Continuação da Tabela 4.4:

| | Nó | Alt. Piez. (mca) | Demanda (l/s) | Cota (m) | Pressão Disponível (mca) | Equação da Continuidade |
|-----|-----|---------------------|------------------|-------------|--------------------------------|-------------------------------|
| 86 | 14 | 39,49 | 90,00 | 5,60 | 33,89 | 0,00 |
| 87 | 15 | 39,56 | 352,84 | 4,60 | 34,96 | 0,00 |
| 88 | 16 | 39,76 | 323,00 | 4,00 | 35,76 | 0,00 |
| 89 | 17 | 45,68 | 92,18 | 4,60 | 41,08 | 0,00 |
| 90 | CÉU | 53,10 | 0,00 | 43,10 | 10,00 | 0,00 |
| 91 | 18 | 36,90 | 112,40 | 5,00 | 31,90 | 0,00 |
| 92 | 19 | 36,54 | 272,31 | 4,00 | 32,54 | 0,00 |
| 93 | 20 | 38,84 | 288,00 | 4,00 | 34,84 | 0,00 |
| 94 | 21 | 38,86 | 0,00 | 3,85 | 35,01 | 0,00 |
| 95 | 22 | 38,88 | 558,94 | 3,60 | 35,28 | 0,00 |
| 96 | 23 | 39,31 | 0,00 | 6,10 | 33,21 | 0,00 |
| 97 | 24 | 39,76 | 0,00 | 3,75 | 36,01 | 0,00 |
| 98 | 25 | 40,86 | 212,00 | 5,20 | 35,66 | 0,00 |
| 99 | 26 | 41,06 | 0,00 | 4,85 | 36,21 | 0,00 |
| 100 | 27 | 41,44 | 220,63 | 5,00 | 36,44 | 0,00 |
| 101 | 28 | 42,53 | 0,00 | 6,00 | 36,53 | 0,00 |
| 102 | 29 | 42,95 | 119,01 | 7,75 | 35,20 | 0,00 |
| 103 | 30 | 43,53 | 255,00 | 7,65 | 35,88 | 0,00 |
| 104 | 31 | 43,86 | 135,91 | 7,90 | 35,96 | 0,00 |
| 105 | 32 | 45,87 | 170,00 | 14,00 | 31,87 | 0,00 |
| 106 | 33 | 45,78 | 128,00 | 10,00 | 35,78 | 0,00 |
| 107 | 34 | 45,49 | 91,83 | 5,00 | 40,49 | 0,00 |
| 108 | 35 | 44,43 | 389,56 | 16,00 | 28,43 | 0,00 |
| 109 | 36 | 41,69 | 215,00 | 30,00 | 11,69 | 0,00 |
| 110 | 37 | 42,46 | 198,53 | 4,00 | 38,46 | 0,00 |
| 111 | 38 | 42,48 | 0,00 | 10,00 | 32,48 | 0,00 |
| 112 | 39 | 42,47 | 94,25 | 6,00 | 36,47 | 0,00 |
| 113 | 40 | 42,45 | 71,50 | 10,00 | 32,45 | 0,00 |
| 114 | 41 | 42,44 | 0,00 | 4,00 | 38,44 | 0,00 |
| 115 | 42 | 42,43 | 0,00 | 3,10 | 39,33 | 0,00 |
| 116 | 43 | 42,42 | 45,67 | 3,60 | 38,82 | 0,00 |
| 117 | 44 | 42,42 | 0,00 | 4,00 | 38,42 | 0,00 |
| 118 | 45 | 41,05 | 0,00 | 4,45 | 36,60 | 0,00 |
| 119 | 46 | 41,05 | 0,00 | 4,40 | 36,65 | 0,00 |
| 120 | 47 | 41,03 | 0,00 | 4,40 | 36,63 | 0,00 |
| 121 | 48 | 41,05 | 0,00 | 4,40 | 36,65 | 0,00 |
| 122 | 49 | 41,05 | 71,89 | 4,00 | 37,05 | 0,00 |
| 123 | 50 | 41,05 | 11,86 | 4,00 | 37,05 | 0,00 |
| 124 | 51 | 41,05 | 0,00 | 4,00 | 37,05 | 0,00 |
| 125 | 52 | 42,41 | 657,10 | 4,00 | 38,41 | 0,00 |
| 126 | 53 | 43,14 | 259,00 | 5,00 | 38,14 | 0,00 |
| 127 | 54 | 44,09 | 34,07 | 8,00 | 36,09 | 0,00 |
| 128 | 55 | 44,30 | 0,00 | 10,00 | 34,30 | 0,00 |

Continuação da Tabela 4.4:

| | Nó | Alt. Piez. (mca) | Demanda (l/s) | Cota (m) | Pressão Disponível (mca) | Equação da Continuidade |
|-----|-----|---------------------|------------------|-------------|--------------------------------|-------------------------------|
| 129 | 56 | 46,04 | 295,06 | 9,00 | 37,04 | 0,00 |
| 130 | 57 | 46,89 | 156,34 | 9,00 | 37,89 | 0,00 |
| 131 | GRJ | 49,00 | 0,00 | 39,00 | 10,00 | 0,00 |

Nessa simulação (*cenário A*) procurou-se, da mesma forma que a feita pelo WADISO (tabela 4.2), apenas para o equilíbrio da rede. Os valores médios das pressões nos nós ficaram em torno de 35,23 mca, a pressão mínima encontrada foi de 11,69 mca (nó 36) e a pressão máxima encontrada foi 45,23 mca (nó 1). Os valores das pressões encontradas através do método PNL2000 estão ligeiramente superiores, tanto na média como nos valores máximos e mínimos.

As restrições a que foi submetida a rede foram satisfeitas, os valores na segunda parte da planilha, a equação da continuidade nos nós e da equação da conservação de energia nos anéis obtiveram os resultados iguais a zero, colunas G e H respectivamente.

A altura manométrica dos reservatórios é igual a 10 m (célula com destaque em amarelo) e a altura piezométrica de cabeceira é de 49 m e as vazões de demanda dos reservatórios otimizados pelo solver fornecem conjuntamente 8.134 l/s.

A segunda simulação (*cenário B*) consiste na modificação nas pressões disponíveis nos nós, verificando o comportamento da rede de distribuição. Nesta etapa (tabela 4.5) tem-se como restrições pressões disponíveis entre 15 mca e 50 mca, o que abastece toda a rede com pressões suficientes e dentro dos valores exigidos por normas técnicas de abastecimento público – Norma de Projetos Hidráulicos de Redes de Distribuição de Água Potável para Abastecimento Público NB-594/77. As características particulares de cada rede podem ser simuladas de acordo com as necessidades, podendo, por exemplo, ser inseridas novas restrições às equações como a interrupção do fornecimento de água a um determinado nó.

A planilha inicial a ser usada em simulações com novas restrições pode ser a otimizada anteriormente (tabela 4.4 – *cenário A*), sendo que a mesma já se encontra equilibrada. As modificações feitas para se simular em rede já equilibrada pelo Solver se limitam apenas à adição das novas restrições, portanto, será descrito em seguida apenas o processo utilizado na segunda parte da planilha. Toda a edição da planilha é feita como mostrado para o *cenário A* – Primeira Parte da Planilha e Segunda Parte da Planilha –

modificando-se apenas as restrições impostas à rede de distribuição na caixa de parâmetros da ferramenta solver demonstrada na figura 4.3.

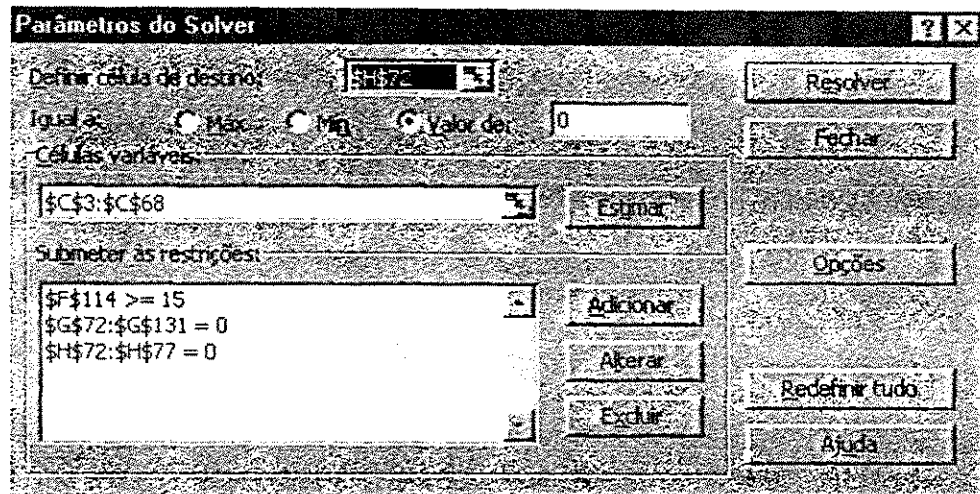


Figura 4.3: Caixa de Parâmetros da ferramenta Solver a serem otimizados para pressões superiores a 15 m.c.a da rede.

A *Célula de Destino* na figura 4.3 é tida como uma das células da equação da conservação de energia (H72) e faz parte da *Função Objetivo*, tendo ao final um valor igual a zero. As *Células Variáveis* compreendem a coluna referente às vazões em todos os trechos e a altura manométrica (C3 a C68). As restrições exigidas para o novo equilíbrio da rede com pressões entre 15 mca e 50 mca referem-se aos nós onde as pressões são menores, as equações de continuidade (G72 a G131) e de conservação de energia (H72 a H77), que devem ser iguais a zero para que as restrições sejam atendidas e a rede esteja equilibrada.

Após a utilização da ferramenta Solver os resultados obtidos estão descritos na tabela 4.5.

Tabela 4.5: Resultados obtidos após simulação com o método PNL2000 com restrição de pressão igual ou superior a 15 mca nos nós e menor ou igual a 50 mca – cenário B.

Primeira Parte da Planilha

| A | B | C | D | E | F | G | H |
|---|--------|-------------|---------------|-------|-----------------|--------------|------------------|
| | Trecho | Vazão (l/s) | Diâmetro (mm) | Coef. | Comprimento (m) | Perdas (mca) | Velocidade (m/s) |
| 3 | 1 | 4900,45 | 1500 | 130 | 2537 | 8,666 | 2,77 |
| 4 | 2 | 4426,85 | 1500 | 130 | 2340 | 6,621 | 2,51 |
| 5 | 3 | 2727,33 | 1500 | 130 | 1310 | 1,512 | 1,54 |
| 6 | 4 | 1592,45 | 1200 | 130 | 985 | 1,244 | 1,41 |

Continuação da Tabela 4.5:

| | Trecho | Vazão (l/s) | Diâmetro (mm) | Coef. | Comprimento (m) | Perdas (mca) | Velocidade (m/s) |
|----|--------|----------------|------------------|-------|--------------------|-----------------|---------------------|
| 7 | 5 | 1456,54 | 1200 | 130 | 302 | 0,323 | 1,29 |
| 8 | 6 | 1201,54 | 1200 | 130 | 776 | 0,582 | 1,06 |
| 9 | 7 | 1082,53 | 1200 | 130 | 690 | 0,426 | 0,96 |
| 10 | 8 | 1082,53 | 1000 | 130 | 725 | 1,089 | 1,38 |
| 11 | 9 | 861,90 | 1000 | 130 | 378 | 0,372 | 1,10 |
| 12 | 10 | 780,71 | 1000 | 130 | 246 | 0,202 | 0,99 |
| 13 | 11 | 655,81 | 800 | 130 | 629 | 1,107 | 1,31 |
| 14 | 12 | 655,81 | 781 | 130 | 224 | 0,443 | 1,37 |
| 15 | 13 | 655,81 | 800 | 130 | 248 | 0,436 | 1,31 |
| 16 | 14 | 96,87 | 900 | 130 | 615 | 0,018 | 0,15 |
| 17 | 15 | 96,87 | 900 | 130 | 547 | 0,016 | 0,15 |
| 18 | 16 | 191,13 | 800 | 130 | 1518 | 0,272 | 0,38 |
| 19 | 17 | 463,44 | 800 | 130 | 394 | 0,364 | 0,92 |
| 20 | 18 | 575,84 | 800 | 130 | 2070 | 2,862 | 1,15 |
| 21 | 19 | 1405,32 | 800 | 130 | 820 | 5,918 | 2,80 |
| 22 | 20 | 1497,50 | 800 | 130 | 914 | 7,420 | 2,98 |
| 23 | 21 | 1134,88 | 1200 | 130 | 1698 | 1,145 | 1,00 |
| 24 | 22 | 1067,62 | 1200 | 130 | 1112 | 0,670 | 0,94 |
| 25 | 23 | 434,19 | 900 | 130 | 922 | 0,426 | 0,68 |
| 26 | 24 | 329,68 | 900 | 130 | 403 | 0,112 | 0,52 |
| 27 | 25 | 329,68 | 800 | 130 | 860 | 0,423 | 0,66 |
| 28 | 26 | 221,88 | 700 | 130 | 298 | 0,135 | 0,58 |
| 29 | 27 | 158,88 | 700 | 130 | 360 | 0,088 | 0,41 |
| 30 | 28 | -53,38 | 700 | 130 | 724 | -0,023 | 0,14 |
| 31 | 29 | -53,38 | 600 | 130 | 1028 | -0,071 | 0,19 |
| 32 | 30 | 63,64 | 600 | 130 | 392 | 0,037 | 0,23 |
| 33 | 31 | 63,64 | 800 | 130 | 933 | 0,022 | 0,13 |
| 34 | 32 | 153,64 | 800 | 130 | 583 | 0,070 | 0,31 |
| 35 | 33 | 506,48 | 900 | 130 | 335 | 0,206 | 0,80 |
| 36 | 34 | 1159,52 | 1200 | 130 | 1060 | 0,744 | 1,03 |
| 37 | 35 | 989,52 | 1200 | 130 | 175 | 0,092 | 0,88 |
| 38 | 36 | 861,52 | 1200 | 130 | 701 | 0,284 | 0,76 |
| 39 | 37 | 769,69 | 1000 | 130 | 1334 | 1,065 | 0,98 |
| 40 | 38 | 380,13 | 700 | 130 | 2228 | 2,736 | 0,99 |
| 41 | 39 | -165,13 | 600 | 130 | 1081 | -0,600 | 0,58 |
| 42 | 40 | 33,40 | 800 | 130 | 2120 | 0,015 | 0,07 |
| 43 | 41 | 412,12 | 1500 | 130 | 316 | 0,011 | 0,23 |
| 44 | 42 | 317,87 | 1500 | 130 | 696 | 0,015 | 0,18 |
| 45 | 43 | 246,37 | 1500 | 130 | 875 | 0,012 | 0,14 |
| 46 | 44 | 102,20 | 1200 | 130 | 960 | 0,007 | 0,09 |
| 47 | 45 | 102,20 | 1200 | 130 | 1205 | 0,009 | 0,09 |
| 48 | 46 | 56,53 | 1200 | 130 | 550 | 0,001 | 0,05 |
| 49 | 47 | 56,53 | 1200 | 130 | 235 | 0,001 | 0,05 |
| 50 | 48 | -2,69 | 1200 | 130 | 250 | 0,000 | 0,00 |
| 51 | 49 | 81,19 | 1200 | 130 | 350 | 0,002 | 0,07 |

Continuação da Tabela 4.5:

| | Trecho | Vazão (l/s) | Diâmetro (mm) | Coef. | Comprimento (m) | Perdas (mca) | Velocidade (m/s) |
|----|-------------|-------------|---------------|-------|-----------------|--------------|------------------|
| 52 | 50 | 81,19 | 1200 | 130 | 2450 | 0,012 | 0,07 |
| 53 | 51 | 87,10 | 750 | 110 | 2100 | 0,164 | 0,20 |
| 54 | 52 | 87,10 | 750 | 110 | 300 | 0,023 | 0,20 |
| 55 | 53 | -3,22 | 1200 | 130 | 250 | 0,000 | 0,00 |
| 56 | 54 | 50,62 | 976 | 110 | 350 | 0,003 | 0,07 |
| 57 | 55 | -21,27 | 976 | 110 | 1302 | -0,002 | 0,03 |
| 58 | 56 | -33,13 | 976 | 110 | 1060 | -0,004 | 0,04 |
| 59 | 57 | 144,17 | 900 | 130 | 264 | 0,016 | 0,23 |
| 60 | 58 | 111,04 | 976 | 110 | 378 | 0,013 | 0,15 |
| 61 | 59 | 546,06 | 976 | 110 | 1124 | 0,729 | 0,73 |
| 62 | 60 | 805,06 | 976 | 110 | 710 | 0,945 | 1,08 |
| 63 | 61 | 839,13 | 976 | 110 | 150 | 0,216 | 1,12 |
| 64 | 62 | 445,52 | 800 | 130 | 2120 | 1,823 | 0,89 |
| 65 | 63 | 1284,65 | 976 | 130 | 750 | 1,740 | 1,72 |
| 66 | 64 | 1579,71 | 976 | 130 | 250 | 0,851 | 2,11 |
| 67 | 65 | 1736,05 | 976 | 130 | 520 | 2,108 | 2,32 |
| 68 | Man. reser. | 14 | | | | | |
| 69 | Piez. Cab. | 53,00 | | | | | |

70 Segunda Parte da Planilha

| | Nó | Alt. Piez. (mca) | Demanda (l/s) | Cota (m) | Pressão Disponível (mca) | Equação da Continuidade | Eq. Cons. de energia |
|----|-----|------------------|---------------|----------|--------------------------|-------------------------|----------------------|
| 71 | | | | | | | |
| 72 | TAP | 65,90 | 0,00 | 51,90 | 14,00 | 0,00 | 0,000 Anel 1 |
| 73 | 1 | 57,23 | 473,60 | 8,00 | 49,23 | 0,00 | 0,000 Anel 2 |
| 74 | 2 | 50,61 | 540,00 | 8,00 | 42,61 | 0,00 | 0,000 Anel 3 |
| 75 | 3 | 49,10 | 0,00 | 6,00 | 43,10 | 0,00 | 0,000 Anel 4 |
| 76 | 4 | 47,96 | 67,26 | 8,30 | 39,66 | 0,00 | 0,000 Anel 5 |
| 77 | 5 | 47,29 | 633,43 | 8,00 | 39,29 | 0,00 | 0,000 Anel 6 |
| 78 | 6 | 46,86 | 104,51 | 9,00 | 37,86 | 0,00 | |
| 79 | 7 | 46,75 | 0,00 | 7,00 | 39,75 | 0,00 | |
| 80 | 8 | 46,33 | 107,80 | 8,00 | 38,33 | 0,00 | |
| 81 | 9 | 46,19 | 63,00 | 15,00 | 31,19 | 0,00 | |
| 82 | 10 | 46,10 | 105,50 | 9,00 | 37,10 | 0,00 | |
| 83 | 11 | 43,50 | 0,00 | 14,90 | 28,60 | 0,00 | |
| 84 | 12 | 43,43 | 117,02 | 6,30 | 37,13 | 0,00 | |
| 85 | 13 | 43,46 | 0,00 | 6,30 | 37,16 | 0,00 | |
| 86 | 14 | 43,49 | 90,00 | 5,60 | 37,89 | 0,00 | |
| 87 | 15 | 43,56 | 352,84 | 4,60 | 38,96 | 0,00 | |
| 88 | 16 | 43,76 | 323,00 | 4,00 | 39,76 | 0,00 | |
| 89 | 17 | 49,68 | 92,18 | 4,60 | 45,08 | 0,00 | |
| 90 | CÉU | 57,10 | 0,00 | 43,10 | 14,00 | 0,00 | |
| 91 | 18 | 40,90 | 112,40 | 5,00 | 35,90 | 0,00 | |
| 92 | 19 | 40,53 | 272,31 | 4,00 | 36,53 | 0,00 | |
| 93 | 20 | 42,84 | 288,00 | 4,00 | 38,84 | 0,00 | |
| 94 | 21 | 42,86 | 0,00 | 3,85 | 39,01 | 0,00 | |

Continuação da Tabela 4.5:

| | Nó | Alt. Piez. (mca) | Demanda (l/s) | Cota (m) | Pressão Disponível (mca) | Equação da Continuidade |
|-----|-----|---------------------|------------------|-------------|--------------------------------|-------------------------------|
| 95 | 22 | 42,88 | 558,94 | 3,60 | 39,28 | 0,00 |
| 96 | 23 | 43,31 | 0,00 | 6,10 | 37,21 | 0,00 |
| 97 | 24 | 43,76 | 0,00 | 3,75 | 40,01 | 0,00 |
| 98 | 25 | 44,86 | 212,00 | 5,20 | 39,66 | 0,00 |
| 99 | 26 | 45,07 | 0,00 | 4,85 | 40,22 | 0,00 |
| 100 | 27 | 45,44 | 220,63 | 5,00 | 40,44 | 0,00 |
| 101 | 28 | 46,53 | 0,00 | 6,00 | 40,53 | 0,00 |
| 102 | 29 | 46,95 | 119,01 | 7,75 | 39,20 | 0,00 |
| 103 | 30 | 47,53 | 255,00 | 7,65 | 39,88 | 0,00 |
| 104 | 31 | 47,86 | 135,91 | 7,90 | 39,96 | 0,00 |
| 105 | 32 | 49,87 | 170,00 | 14,00 | 35,87 | 0,00 |
| 106 | 33 | 49,78 | 128,00 | 10,00 | 39,78 | 0,00 |
| 107 | 34 | 49,49 | 91,83 | 5,00 | 44,49 | 0,00 |
| 108 | 35 | 48,43 | 389,56 | 16,00 | 32,43 | 0,00 |
| 109 | 36 | 45,69 | 215,00 | 30,00 | 15,69 | 0,00 |
| 110 | 37 | 46,46 | 198,53 | 4,00 | 42,46 | 0,00 |
| 111 | 38 | 46,48 | 0,00 | 10,00 | 36,48 | 0,00 |
| 112 | 39 | 46,47 | 94,25 | 6,00 | 40,47 | 0,00 |
| 113 | 40 | 46,45 | 71,50 | 10,00 | 36,45 | 0,00 |
| 114 | 41 | 46,44 | 0,00 | 4,00 | 42,44 | 0,00 |
| 115 | 42 | 46,43 | 0,00 | 3,10 | 43,33 | 0,00 |
| 116 | 43 | 46,42 | 45,67 | 3,60 | 42,82 | 0,00 |
| 117 | 44 | 46,42 | 0,00 | 4,00 | 42,42 | 0,00 |
| 118 | 45 | 45,05 | 0,00 | 4,45 | 40,60 | 0,00 |
| 119 | 46 | 45,05 | 0,00 | 4,40 | 40,65 | 0,00 |
| 120 | 47 | 45,03 | 0,00 | 4,40 | 40,63 | 0,00 |
| 121 | 48 | 45,05 | 0,00 | 4,40 | 40,65 | 0,00 |
| 122 | 49 | 45,05 | 71,89 | 4,00 | 41,05 | 0,00 |
| 123 | 50 | 45,05 | 11,86 | 4,00 | 41,05 | 0,00 |
| 124 | 51 | 45,05 | 0,00 | 4,00 | 41,05 | 0,00 |
| 125 | 52 | 46,41 | 657,10 | 4,00 | 42,41 | 0,00 |
| 126 | 53 | 47,14 | 259,00 | 5,00 | 42,14 | 0,00 |
| 127 | 54 | 48,09 | 34,07 | 8,00 | 40,09 | 0,00 |
| 128 | 55 | 48,30 | 0,00 | 10,00 | 38,30 | 0,00 |
| 129 | 56 | 50,04 | 295,06 | 9,00 | 41,04 | 0,00 |
| 130 | 57 | 50,89 | 156,34 | 9,00 | 41,89 | 0,00 |
| 131 | GRJ | 53,00 | 0,00 | 39,00 | 14,00 | 0,00 |

Os diâmetros (coluna D) e os comprimentos (coluna F), como na primeira simulação foram mantidos fixos, pois o cenário B apenas requer que a rede forneça uma determinada pressão aos nós sem a modificação da estrutura da rede ou o aumento da quantidade de água aduzida pelos reservatórios.

A restrição referente à pressão disponível foi atendida, mantendo-se a pressão mínima de 15,69 mca no nó trinta e seis e a pressão máxima de 49,23 mca no nó um. A soma das vazões disponibilizadas ao abastecimento da rede é de 8.134 l/s, tendo uma pequena redução comparada a vazão fornecida inicialmente (8.156 l/s). As células com o destaque amarelo referem-se às alturas manométricas dos reservatórios que para se adequarem aos valores de pressões mínimas requeridas foram acrescidas de 4 metros. Torna-se então, uma das soluções para um eficiente abastecimento a rede de distribuição o *cenário B*, que sugere a alteração da altura manométrica dos reservatórios para que a rede seja atendida com padrões exigidos por normas técnicas quanto à pressão disponível nos nós.

O PNL2000 permite ainda que seja simulada a suspensão no fornecimento de água em determinados nós para manutenção ou em caso de racionamento de água (*cenário C*). Com mais essas restrições de demanda zero nos nós (selecionadas na cor vermelha) quatro, cinco, seis, trinta e cinco, trinta e seis e trinta e sete pôde-se verificar também o comportamento da rede em situações como suspensão do fornecimento de água em um racionamento. O resultado obtido logo a seguir teve como dados de entrada a tabela 4.4 (*cenário A*). A célula destino e as variáveis utilizadas nessa simulação são as mesmas da simulação anterior. A célula destino como uma célula da equação da conservação de energia e como variáveis vazões nos trechos e altura manométrica. As restrições assumidas de equação da continuidade e equação da conservação de energia devem ser iguais a zero e pressões nos nós devem ser iguais ou superiores a 15 mca e iguais ou inferiores a 50 mca.

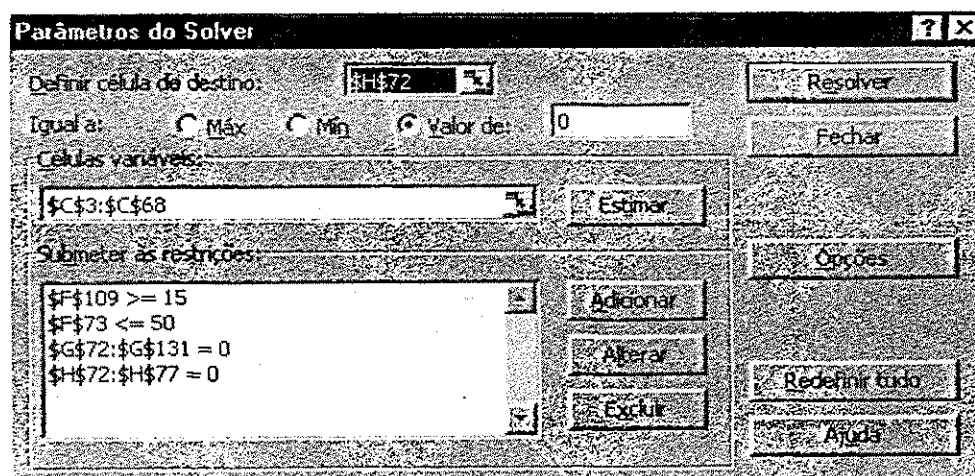


Figura 4.4 : Caixa de Parâmetros da Ferramenta Solver a serem otimizados para demandas nulas em alguns nós.

A tabela 4.6 – *cenário C* – descreve os resultados obtidos pelo método PNL2000 para a simulação de racionamento na rede, suspendendo o fornecimento de água a um conjunto de nós.

Tabela 4.6: Resultados obtidos após simulação com PNL2000 com demandas nulas em alguns nós – *cenário C*.

Primeira Parte da Planilha

| A | B | C | D | E | F | G | H |
|----|--------|-------------|---------------|-------|-----------------|--------------|------------------|
| | Trecho | Vazão (l/s) | Diâmetro (mm) | Coef. | Comprimento (m) | Perdas (mca) | Velocidade (m/s) |
| 3 | 1 | 4407,97 | 1500 | 130 | 2537 | 7,122 | 2,50 |
| 4 | 2 | 3934,37 | 1500 | 130 | 2340 | 5,322 | 2,23 |
| 5 | 3 | 2600,33 | 1500 | 130 | 1310 | 1,384 | 1,47 |
| 6 | 4 | 2007,44 | 1200 | 130 | 985 | 1,910 | 1,78 |
| 7 | 5 | 1871,53 | 1200 | 130 | 302 | 0,514 | 1,66 |
| 8 | 6 | 1616,53 | 1200 | 130 | 776 | 1,008 | 1,43 |
| 9 | 7 | 1497,52 | 1200 | 130 | 690 | 0,778 | 1,32 |
| 10 | 8 | 1497,52 | 1000 | 130 | 725 | 1,985 | 1,91 |
| 11 | 9 | 1276,89 | 1000 | 130 | 378 | 0,771 | 1,63 |
| 12 | 10 | 905,31 | 1000 | 130 | 246 | 0,265 | 1,15 |
| 13 | 11 | 723,58 | 800 | 130 | 629 | 1,328 | 1,44 |
| 14 | 12 | 723,58 | 781 | 130 | 224 | 0,532 | 1,51 |
| 15 | 13 | 723,58 | 800 | 130 | 248 | 0,523 | 1,44 |
| 16 | 14 | 164,64 | 900 | 130 | 615 | 0,047 | 0,26 |
| 17 | 15 | 164,64 | 900 | 130 | 547 | 0,042 | 0,26 |
| 18 | 16 | 123,36 | 800 | 130 | 1518 | 0,121 | 0,25 |
| 19 | 17 | 395,67 | 800 | 130 | 394 | 0,272 | 0,79 |
| 20 | 18 | 508,07 | 800 | 130 | 2070 | 2,270 | 1,01 |
| 21 | 19 | 1074,34 | 800 | 130 | 820 | 3,599 | 2,14 |
| 22 | 20 | 1166,52 | 800 | 130 | 914 | 4,672 | 2,32 |
| 23 | 21 | 592,89 | 1200 | 130 | 1698 | 0,344 | 0,52 |
| 24 | 22 | 592,89 | 1200 | 130 | 1112 | 0,225 | 0,52 |
| 25 | 23 | 592,89 | 900 | 130 | 922 | 0,758 | 0,93 |
| 26 | 24 | 592,89 | 900 | 130 | 403 | 0,331 | 0,93 |
| 27 | 25 | 592,89 | 800 | 130 | 860 | 1,255 | 1,18 |
| 28 | 26 | 485,09 | 700 | 130 | 298 | 0,575 | 1,26 |
| 29 | 27 | 422,09 | 700 | 130 | 360 | 0,537 | 1,10 |
| 30 | 28 | -316,59 | 700 | 130 | 724 | -0,634 | 0,82 |
| 31 | 29 | -316,59 | 600 | 130 | 1028 | -1,906 | 1,12 |
| 32 | 30 | -199,57 | 600 | 130 | 392 | -0,309 | 0,71 |
| 33 | 31 | -199,57 | 800 | 130 | 933 | -0,181 | 0,40 |
| 34 | 32 | -109,57 | 800 | 130 | 583 | -0,037 | 0,22 |
| 35 | 33 | 243,27 | 900 | 130 | 335 | 0,053 | 0,38 |
| 36 | 34 | 794,04 | 1200 | 130 | 1060 | 0,369 | 0,70 |
| 37 | 35 | 624,04 | 1200 | 130 | 175 | 0,039 | 0,55 |

Continuação da Tabela 4.6:

| | Trecho | Vazão (l/s) | Diâmetro (mm) | Coef. | Comprimento (m) | Perdas (mca) | Velocidade (m/s) |
|----|-------------|----------------|------------------|-------|--------------------|-----------------|---------------------|
| 38 | 36 | 496,04 | 1200 | 130 | 701 | 0,102 | 0,44 |
| 39 | 37 | 404,21 | 1000 | 130 | 1334 | 0,323 | 0,51 |
| 40 | 38 | 404,21 | 700 | 130 | 2228 | 3,065 | 1,05 |
| 41 | 39 | -404,21 | 600 | 130 | 1081 | -3,151 | 1,43 |
| 42 | 40 | -404,21 | 800 | 130 | 2120 | -1,522 | 0,80 |
| 43 | 41 | 460,46 | 1500 | 130 | 316 | 0,014 | 0,26 |
| 44 | 42 | 366,21 | 1500 | 130 | 696 | 0,019 | 0,21 |
| 45 | 43 | 294,71 | 1500 | 130 | 875 | 0,016 | 0,17 |
| 46 | 44 | -97,81 | 1200 | 130 | 960 | -0,007 | 0,09 |
| 47 | 45 | -97,81 | 1200 | 130 | 1205 | -0,009 | 0,09 |
| 48 | 46 | -143,48 | 1200 | 130 | 550 | -0,008 | 0,13 |
| 49 | 47 | -143,48 | 1200 | 130 | 235 | -0,003 | 0,13 |
| 50 | 48 | 170,66 | 1200 | 130 | 250 | 0,005 | 0,15 |
| 51 | 49 | 371,58 | 1200 | 130 | 350 | 0,030 | 0,33 |
| 52 | 50 | 371,58 | 1200 | 130 | 2450 | 0,209 | 0,33 |
| 53 | 51 | 30,27 | 750 | 110 | 2100 | 0,023 | 0,07 |
| 54 | 52 | 30,27 | 750 | 110 | 300 | 0,003 | 0,07 |
| 55 | 53 | 170,66 | 1200 | 130 | 250 | 0,005 | 0,15 |
| 56 | 54 | 197,83 | 976 | 110 | 350 | 0,035 | 0,26 |
| 57 | 55 | 125,94 | 976 | 110 | 1302 | 0,056 | 0,17 |
| 58 | 56 | 114,08 | 976 | 110 | 1060 | 0,038 | 0,15 |
| 59 | 57 | 392,52 | 900 | 130 | 264 | 0,101 | 0,62 |
| 60 | 58 | 506,60 | 976 | 110 | 378 | 0,213 | 0,68 |
| 61 | 59 | 150,50 | 976 | 110 | 1124 | 0,067 | 0,20 |
| 62 | 60 | 409,50 | 976 | 110 | 710 | 0,270 | 0,55 |
| 63 | 61 | 443,57 | 976 | 110 | 150 | 0,066 | 0,59 |
| 64 | 62 | 56,25 | 800 | 130 | 2120 | 0,039 | 0,11 |
| 65 | 63 | 499,82 | 976 | 130 | 750 | 0,303 | 0,67 |
| 66 | 64 | 794,88 | 976 | 130 | 250 | 0,238 | 1,06 |
| 67 | 65 | 951,22 | 976 | 130 | 520 | 0,692 | 1,27 |
| 68 | Man. reser. | 12,6 | | | | | |
| 69 | Piez. Cab. | 51,60 | | | | | |

70 Segunda Parte da Planilha

| | Nó | Alt. Piez. (mca) | Demanda (l/s) | Cota (m) | Pressão Disponível (mca) | Equação da Continuidade | Eq. Cons. de energia | |
|----|-----|---------------------|------------------|-------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------|--------|
| 71 | | | | | | | | |
| 72 | TAP | 64,50 | 0,00 | 51,90 | 12,60 | 0,00 | 0,000 | Anel 1 |
| 73 | 1 | 57,38 | 473,60 | 8,00 | 49,38 | 0,00 | 0,000 | Anel 2 |
| 74 | 2 | 52,06 | 540,00 | 8,00 | 44,06 | 0,00 | 0,000 | Anel 3 |
| 75 | 3 | 50,67 | 0,00 | 6,00 | 44,67 | 0,00 | 0,000 | Anel 4 |
| 76 | 4 | 50,33 | 0,00 | 8,30 | 42,03 | 0,00 | 0,000 | Anel 5 |
| 77 | 5 | 50,10 | 0,00 | 8,00 | 42,10 | 0,00 | 0,000 | Anel 6 |
| 78 | 6 | 49,34 | 0,00 | 9,00 | 40,34 | 0,00 | | |
| 79 | 7 | 49,01 | 0,00 | 7,00 | 42,01 | 0,00 | | |
| 80 | 8 | 47,76 | 107,80 | 8,00 | 39,76 | 0,00 | | |

Continuação da Tabela 4.6:

| | Nó | Alt. Piez. (mca) | Demanda (l/s) | Cota (m) | Pressão Disponível (mca) | Equação da Continuidade |
|-----|-----|---------------------|------------------|-------------|--------------------------------|-------------------------------|
| 81 | 9 | 47,18 | 63,00 | 15,00 | 32,18 | 0,00 |
| 82 | 10 | 46,65 | 105,50 | 9,00 | 37,65 | 0,00 |
| 83 | 11 | 49,81 | 0,00 | 14,90 | 34,91 | 0,00 |
| 84 | 12 | 47,90 | 117,02 | 6,30 | 41,60 | 0,00 |
| 85 | 13 | 47,59 | 0,00 | 6,30 | 41,29 | 0,00 |
| 86 | 14 | 47,41 | 90,00 | 5,60 | 41,81 | 0,00 |
| 87 | 15 | 47,38 | 352,84 | 4,60 | 42,78 | 0,00 |
| 88 | 16 | 47,43 | 323,00 | 4,00 | 43,43 | 0,00 |
| 89 | 17 | 51,03 | 92,18 | 4,60 | 46,43 | 0,00 |
| 90 | CÉU | 55,70 | 0,00 | 43,10 | 12,60 | 0,00 |
| 91 | 18 | 45,16 | 112,40 | 5,00 | 40,16 | 0,00 |
| 92 | 19 | 44,89 | 272,31 | 4,00 | 40,89 | 0,00 |
| 93 | 20 | 40,97 | 288,00 | 4,00 | 36,97 | 0,00 |
| 94 | 21 | 41,01 | 0,00 | 3,85 | 37,16 | 0,00 |
| 95 | 22 | 41,06 | 558,94 | 3,60 | 37,46 | 0,00 |
| 96 | 23 | 41,58 | 0,00 | 6,10 | 35,48 | 0,00 |
| 97 | 24 | 42,11 | 0,00 | 3,75 | 38,36 | 0,00 |
| 98 | 25 | 43,44 | 212,00 | 5,20 | 38,24 | 0,00 |
| 99 | 26 | 43,71 | 0,00 | 4,85 | 38,86 | 0,00 |
| 100 | 27 | 44,48 | 220,63 | 5,00 | 39,48 | 0,00 |
| 101 | 28 | 46,46 | 0,00 | 6,00 | 40,46 | 0,00 |
| 102 | 29 | 47,24 | 119,01 | 7,75 | 39,49 | 0,00 |
| 103 | 30 | 48,25 | 255,00 | 7,65 | 40,60 | 0,00 |
| 104 | 31 | 48,76 | 135,91 | 7,90 | 40,86 | 0,00 |
| 105 | 32 | 51,69 | 170,00 | 14,00 | 37,69 | 0,00 |
| 106 | 33 | 51,65 | 128,00 | 10,00 | 41,65 | 0,00 |
| 107 | 34 | 51,55 | 91,83 | 5,00 | 46,55 | 0,00 |
| 108 | 35 | 51,22 | 0,00 | 16,00 | 35,22 | 0,00 |
| 109 | 36 | 48,16 | 0,00 | 30,00 | 18,16 | 0,00 |
| 110 | 37 | 51,85 | 0,00 | 4,00 | 47,85 | 0,00 |
| 111 | 38 | 50,33 | 0,00 | 10,00 | 40,33 | 0,00 |
| 112 | 39 | 50,31 | 94,25 | 6,00 | 44,31 | 0,00 |
| 113 | 40 | 50,29 | 71,50 | 10,00 | 40,29 | 0,00 |
| 114 | 41 | 50,28 | 0,00 | 4,00 | 46,28 | 0,00 |
| 115 | 42 | 50,28 | 0,00 | 3,10 | 47,18 | 0,00 |
| 116 | 43 | 50,29 | 45,67 | 3,60 | 46,69 | 0,00 |
| 117 | 44 | 50,30 | 0,00 | 4,00 | 46,30 | 0,00 |
| 118 | 45 | 43,46 | 0,00 | 4,45 | 39,01 | 0,00 |
| 119 | 46 | 43,47 | 0,00 | 4,40 | 39,07 | 0,00 |
| 120 | 47 | 43,46 | 0,00 | 4,40 | 39,06 | 0,00 |
| 121 | 48 | 43,50 | 0,00 | 4,40 | 39,10 | 0,00 |
| 122 | 49 | 43,42 | 71,89 | 4,00 | 39,42 | 0,00 |
| 123 | 50 | 43,37 | 11,86 | 4,00 | 39,37 | 0,00 |
| 124 | 51 | 43,33 | 0,00 | 4,00 | 39,33 | 0,00 |

Continuação da Tabela 4.6:

| | Nó | Alt. Piez. (mca) | Demanda (l/s) | Cota (m) | Pressão Disponível (mca) | Equação da Continuidade |
|-----|-----|---------------------|------------------|-------------|--------------------------------|-------------------------------|
| 125 | 52 | 49,96 | 657,10 | 4,00 | 45,96 | 0,00 |
| 126 | 53 | 50,03 | 259,00 | 5,00 | 45,03 | 0,00 |
| 127 | 54 | 50,30 | 34,07 | 8,00 | 42,30 | 0,00 |
| 128 | 55 | 50,37 | 0,00 | 10,00 | 40,37 | 0,00 |
| 129 | 56 | 50,67 | 295,06 | 9,00 | 41,67 | 0,00 |
| 130 | 57 | 50,91 | 156,34 | 9,00 | 41,91 | 0,00 |
| 131 | GRJ | 51,60 | 0,00 | 39,00 | 12,60 | 0,00 |

Na simulação de racionamento – *cenário C* – todas as restrições foram atendidas. As vazões diminuíram de acordo com a redução da demanda que foi suspensa nos nós. Houve a redução na altura manométrica dos reservatórios, devido à redução dos pontos a serem abastecidos.

A quantidade de nós com o fornecimento de água suspenso poderia ser maior ou menor dependendo da vazão disponibilizada pelos reservatórios, o que poderia ainda gerar outras restrições, limitando a vazão disponível nos reservatórios. A manutenção de trechos da rede também podem ser simuladas, suspendendo-se a vazão em alguns trechos.

Outra simulação feita com os dados da mesma rede é o *cenário D*, onde foram inseridas três novas demandas de 100 l/s em alguns nós (nó três, sete e onze). A tabela 4.7 apresenta o resultado da simulação com mesmas variáveis e restrições que a simulação anterior (*cenário C*).

Tabela 4.7: Resultados obtidos após simulação com PNL2000 com acréscimo de demandas em alguns nós – *cenário D*.

Primeira Parte da Planilha

| A | B | C | D | E | F | G | H |
|----|--------|----------------|------------------|-------|--------------------|-----------------|---------------------|
| | Trecho | Vazão (l/s) | Diâmetro (mm) | Coef. | Comprimento (m) | Perdas (mca) | Velocidade (m/s) |
| 3 | 1 | 3911,25 | 1500 | 130 | 2537 | 5,708 | 2,21 |
| 4 | 2 | 3437,65 | 1500 | 130 | 2340 | 4,145 | 1,95 |
| 5 | 3 | 2054,30 | 1500 | 130 | 1310 | 0,894 | 1,16 |
| 6 | 4 | 742,45 | 1200 | 130 | 985 | 0,303 | 0,66 |
| 7 | 5 | 606,54 | 1200 | 130 | 302 | 0,064 | 0,54 |
| 8 | 6 | 351,54 | 1200 | 130 | 776 | 0,060 | 0,31 |
| 9 | 7 | 232,53 | 1200 | 130 | 690 | 0,025 | 0,21 |
| 10 | 8 | 232,53 | 1000 | 130 | 725 | 0,063 | 0,30 |
| 11 | 9 | 11,90 | 1000 | 130 | 378 | 0,000 | 0,02 |
| 12 | 10 | 800,66 | 1000 | 130 | 246 | 0,211 | 1,02 |

Continuação da Tabela 4.7:

| | Trecho | Vazão (l/s) | Diâmetro (mm) | Coef. | Comprimento (m) | Perdas (mca) | Velocidade (m/s) |
|----|--------|----------------|------------------|-------|--------------------|-----------------|---------------------|
| 13 | 11 | 823,26 | 800 | 130 | 629 | 1,686 | 1,64 |
| 14 | 12 | 823,26 | 781 | 130 | 224 | 0,675 | 1,72 |
| 15 | 13 | 823,26 | 800 | 130 | 248 | 0,665 | 1,64 |
| 16 | 14 | 264,32 | 900 | 130 | 615 | 0,113 | 0,42 |
| 17 | 15 | 264,32 | 900 | 130 | 547 | 0,101 | 0,42 |
| 18 | 16 | 23,68 | 800 | 130 | 1518 | 0,006 | 0,05 |
| 19 | 17 | 295,99 | 800 | 130 | 394 | 0,159 | 0,59 |
| 20 | 18 | 408,39 | 800 | 130 | 2070 | 1,515 | 0,81 |
| 21 | 19 | 1360,89 | 800 | 130 | 820 | 5,576 | 2,71 |
| 22 | 20 | 1453,07 | 800 | 130 | 914 | 7,018 | 2,89 |
| 23 | 21 | 1211,85 | 1200 | 130 | 1698 | 1,293 | 1,07 |
| 24 | 22 | 1144,59 | 1200 | 130 | 1112 | 0,762 | 1,01 |
| 25 | 23 | 511,16 | 900 | 130 | 922 | 0,576 | 0,80 |
| 26 | 24 | 406,65 | 900 | 130 | 403 | 0,165 | 0,64 |
| 27 | 25 | 306,65 | 800 | 130 | 860 | 0,370 | 0,61 |
| 28 | 26 | 198,85 | 700 | 130 | 298 | 0,110 | 0,52 |
| 29 | 27 | 135,85 | 700 | 130 | 360 | 0,066 | 0,35 |
| 30 | 28 | -30,35 | 700 | 130 | 724 | -0,008 | 0,08 |
| 31 | 29 | 69,65 | 600 | 130 | 1028 | 0,115 | 0,25 |
| 32 | 30 | 186,67 | 600 | 130 | 392 | 0,273 | 0,66 |
| 33 | 31 | 186,67 | 800 | 130 | 933 | 0,160 | 0,37 |
| 34 | 32 | 276,67 | 800 | 130 | 583 | 0,207 | 0,55 |
| 35 | 33 | 629,51 | 900 | 130 | 335 | 0,308 | 0,99 |
| 36 | 34 | 843,35 | 1200 | 130 | 1060 | 0,412 | 0,75 |
| 37 | 35 | 673,35 | 1200 | 130 | 175 | 0,045 | 0,60 |
| 38 | 36 | 545,35 | 1200 | 130 | 701 | 0,122 | 0,48 |
| 39 | 37 | 453,52 | 1000 | 130 | 1334 | 0,400 | 0,58 |
| 40 | 38 | 63,96 | 700 | 130 | 2228 | 0,101 | 0,17 |
| 41 | 39 | 151,04 | 600 | 130 | 1081 | 0,509 | 0,53 |
| 42 | 40 | 349,57 | 800 | 130 | 2120 | 1,163 | 0,70 |
| 43 | 41 | 648,53 | 1500 | 130 | 316 | 0,026 | 0,37 |
| 44 | 42 | 554,28 | 1500 | 130 | 696 | 0,042 | 0,31 |
| 45 | 43 | 482,78 | 1500 | 130 | 875 | 0,041 | 0,27 |
| 46 | 44 | 747,63 | 1200 | 130 | 960 | 0,299 | 0,66 |
| 47 | 45 | 747,63 | 1200 | 130 | 1205 | 0,375 | 0,66 |
| 48 | 46 | 701,96 | 1200 | 130 | 550 | 0,152 | 0,62 |
| 49 | 47 | 701,96 | 1200 | 130 | 235 | 0,065 | 0,62 |
| 50 | 48 | -511,68 | 1200 | 130 | 250 | -0,039 | 0,45 |
| 51 | 49 | -788,77 | 1200 | 130 | 350 | -0,120 | 0,70 |
| 52 | 50 | -788,77 | 1200 | 130 | 2450 | -0,842 | 0,70 |
| 53 | 51 | 234,60 | 750 | 110 | 2100 | 1,027 | 0,53 |
| 54 | 52 | 234,60 | 750 | 110 | 300 | 0,147 | 0,53 |
| 55 | 53 | -511,68 | 1200 | 130 | 250 | -0,039 | 0,45 |
| 56 | 54 | -321,41 | 976 | 110 | 350 | -0,085 | 0,43 |
| 57 | 55 | -393,30 | 976 | 110 | 1302 | -0,460 | 0,53 |

Continuação da Tabela 4.7:

| | Trecho | Vazão (l/s) | Diâmetro (mm) | Coef. | Comprimento (m) | Perdas (mca) | Velocidade (m/s) |
|----|-------------|-------------|---------------|-------|-----------------|--------------|------------------|
| 58 | 56 | -405,16 | 976 | 110 | 1060 | -0,395 | 0,54 |
| 59 | 57 | -264,84 | 900 | 130 | 264 | -0,049 | 0,42 |
| 60 | 58 | -670,00 | 976 | 110 | 378 | -0,358 | 0,90 |
| 61 | 59 | 1327,10 | 976 | 110 | 1124 | 3,775 | 1,77 |
| 62 | 60 | 1586,10 | 976 | 110 | 710 | 3,317 | 2,12 |
| 63 | 61 | 1620,17 | 976 | 110 | 150 | 0,729 | 2,17 |
| 64 | 62 | 998,11 | 800 | 130 | 2120 | 8,119 | 1,99 |
| 65 | 63 | 2618,28 | 976 | 130 | 750 | 6,506 | 3,50 |
| 66 | 64 | 2913,34 | 976 | 130 | 250 | 2,643 | 3,90 |
| 67 | 65 | 3069,68 | 976 | 130 | 520 | 6,056 | 4,11 |
| 68 | Man. reser. | 14 | | | | | |
| 69 | Piez. Cab. | 53,00 | | | | | |

70 Segunda Parte da Planilha

| | Nó | Alt. Piez. (mca) | Demanda (l/s) | Cota (m) | Pressão Disponível (mca) | Equação da Continuidade | Eq. Cons. de energia | |
|-----|-----|------------------|---------------|----------|--------------------------|-------------------------|----------------------|--------|
| 71 | | | | | | | | |
| 72 | TAP | 65,90 | 0,00 | 51,90 | 14,00 | 0,00 | 0,000 | Anel 1 |
| 73 | 1 | 60,19 | 473,60 | 8,00 | 52,19 | 0,00 | 0,000 | Anel 2 |
| 74 | 2 | 56,05 | 540,00 | 8,00 | 48,05 | 0,00 | 0,000 | Anel 3 |
| 75 | 3 | 55,15 | 100,00 | 6,00 | 49,15 | 0,00 | 0,000 | Anel 4 |
| 76 | 4 | 53,86 | 67,26 | 8,30 | 45,56 | 0,00 | 0,000 | Anel 5 |
| 77 | 5 | 53,10 | 633,43 | 8,00 | 45,10 | 0,00 | 0,000 | Anel 6 |
| 78 | 6 | 52,52 | 104,51 | 9,00 | 43,52 | 0,00 | | |
| 79 | 7 | 52,36 | 100,00 | 7,00 | 45,36 | 0,00 | | |
| 80 | 8 | 51,99 | 107,80 | 8,00 | 43,99 | 0,00 | | |
| 81 | 9 | 51,88 | 63,00 | 15,00 | 36,88 | 0,00 | | |
| 82 | 10 | 51,81 | 105,50 | 9,00 | 42,81 | 0,00 | | |
| 83 | 11 | 43,44 | 100,00 | 14,90 | 28,54 | 0,00 | | |
| 84 | 12 | 43,56 | 117,02 | 6,30 | 37,26 | 0,00 | | |
| 85 | 13 | 43,83 | 0,00 | 6,30 | 37,53 | 0,00 | | |
| 86 | 14 | 43,99 | 90,00 | 5,60 | 38,39 | 0,00 | | |
| 87 | 15 | 44,20 | 352,84 | 4,60 | 39,60 | 0,00 | | |
| 88 | 16 | 44,51 | 323,00 | 4,00 | 40,51 | 0,00 | | |
| 89 | 17 | 50,08 | 92,18 | 4,60 | 45,48 | 0,00 | | |
| 90 | CÉU | 57,10 | 0,00 | 43,10 | 14,00 | 0,00 | | |
| 91 | 18 | 42,99 | 112,40 | 5,00 | 37,99 | 0,00 | | |
| 92 | 19 | 42,83 | 272,31 | 4,00 | 38,83 | 0,00 | | |
| 93 | 20 | 51,19 | 288,00 | 4,00 | 47,19 | 0,00 | | |
| 94 | 21 | 51,29 | 0,00 | 3,85 | 47,44 | 0,00 | | |
| 95 | 22 | 51,40 | 558,94 | 3,60 | 47,80 | 0,00 | | |
| 96 | 23 | 52,07 | 0,00 | 6,10 | 45,97 | 0,00 | | |
| 97 | 24 | 52,74 | 0,00 | 3,75 | 48,99 | 0,00 | | |
| 98 | 25 | 54,43 | 212,00 | 5,20 | 49,23 | 0,00 | | |
| 99 | 26 | 54,64 | 0,00 | 4,85 | 49,79 | 0,00 | | |
| 100 | 27 | 54,64 | 220,63 | 5,00 | 49,64 | 0,00 | | |
| 101 | 28 | 54,70 | 0,00 | 6,00 | 48,70 | 0,00 | | |

Continuação da Tabela 4.7:

| | Nó | Alt. Piez. (mca) | Demanda (l/s) | Cota (m) | Pressão Disponível (mca) | Equação da Continuidade |
|-----|-----|---------------------|------------------|-------------|--------------------------------|-------------------------------|
| 102 | 29 | 54,73 | 119,01 | 7,75 | 46,98 | 0,00 |
| 103 | 30 | 54,79 | 255,00 | 7,65 | 47,14 | 0,00 |
| 104 | 31 | 54,85 | 135,91 | 7,90 | 46,95 | 0,00 |
| 105 | 32 | 55,63 | 170,00 | 14,00 | 41,63 | 0,00 |
| 106 | 33 | 55,59 | 128,00 | 10,00 | 45,59 | 0,00 |
| 107 | 34 | 55,47 | 91,83 | 5,00 | 50,47 | 0,00 |
| 108 | 35 | 55,07 | 389,56 | 16,00 | 39,07 | 0,00 |
| 109 | 36 | 54,97 | 215,00 | 30,00 | 24,97 | 0,00 |
| 110 | 37 | 28,51 | 198,53 | 4,00 | 24,51 | 0,00 |
| 111 | 38 | 29,68 | 0,00 | 10,00 | 19,68 | 0,00 |
| 112 | 39 | 29,65 | 94,25 | 6,00 | 23,65 | 0,00 |
| 113 | 40 | 29,61 | 71,50 | 10,00 | 19,61 | 0,00 |
| 114 | 41 | 29,57 | 0,00 | 4,00 | 25,57 | 0,00 |
| 115 | 42 | 29,27 | 0,00 | 3,10 | 26,17 | 0,00 |
| 116 | 43 | 28,89 | 45,67 | 3,60 | 25,29 | 0,00 |
| 117 | 44 | 28,74 | 0,00 | 4,00 | 24,74 | 0,00 |
| 118 | 45 | 55,68 | 0,00 | 4,45 | 51,23 | 0,00 |
| 119 | 46 | 55,60 | 0,00 | 4,40 | 51,20 | 0,00 |
| 120 | 47 | 55,45 | 0,00 | 4,40 | 51,05 | 0,00 |
| 121 | 48 | 55,48 | 0,00 | 4,40 | 51,08 | 0,00 |
| 122 | 49 | 55,76 | 71,89 | 4,00 | 51,76 | 0,00 |
| 123 | 50 | 56,22 | 11,86 | 4,00 | 52,22 | 0,00 |
| 124 | 51 | 56,62 | 0,00 | 4,00 | 52,62 | 0,00 |
| 125 | 52 | 29,97 | 657,10 | 4,00 | 25,97 | 0,00 |
| 126 | 53 | 33,75 | 259,00 | 5,00 | 28,75 | 0,00 |
| 127 | 54 | 37,07 | 34,07 | 8,00 | 29,07 | 0,00 |
| 128 | 55 | 37,79 | 0,00 | 10,00 | 27,79 | 0,00 |
| 129 | 56 | 44,30 | 295,06 | 9,00 | 35,30 | 0,00 |
| 130 | 57 | 46,94 | 156,34 | 9,00 | 37,94 | 0,00 |
| 131 | GRJ | 53,00 | 0,00 | 39,00 | 14,00 | 0,00 |

Com o acréscimo das demandas, a vazão total fornecida pelos reservatórios elevou-se de 8.134 l/s para 8.434 l/s. Todas as restrições foram atendidas. Como resultado obteve-se as alturas manométricas dos reservatórios iguais a 14 metros de coluna de água, pois a planilha base utilizada foi a do cenário B. A pressão mínima é de 19,61 m.c.a (nó 40) e a pressão em diversos pontos ficaram superiores a 50 m.c.a. No entanto, se for adicionada uma restrição de pressão igual ou superior a 15 m.c.a e igual ou inferior a 50 m.c.a ao nó um (nó 1), a altura manométrica encontrada é de 11,20 m.

Nessa mesma simulação pode ainda ser adicionada uma restrição correspondente à altura manométrica dos reservatórios, sendo igual ou inferior a 10 m. As restrições são

atendidas e como resultado tem-se a pressão mínima igual a 15,61 (nó 40) m.c.a e pressão máxima igual a 48,62 m.c.a (nó 51).

As conclusões referentes ao primeiro exemplo de aplicação, o Grande Anel da Rede de Distribuição de Água da cidade de Recife – PE, comparando os resultados encontrados através de simulação utilizando-se o WADISO aos resultados obtidos através do método PNL2000 obteve resultados eficazes, já que essa comparação foi feita apenas para o cenário de equilíbrio hidráulico da rede, *cenário A*.

O *cenário B* apresentou a adequação da rede de distribuição às pressões disponíveis entre 15 e 50 m.c.a. O PNL2000 obteve resultados satisfatórios; média das pressões igual a 39,23 m.c.a, pressão mínima de 15,69 m.c.a (nó trinta e seis) e pressão máxima de 49,23 m.c.a (nó um). A altura manométrica dos três reservatórios passa de 10 m para 14 m e a altura piezométrica de 49 m para 53 m, um aumento de 4 m em relação aos dados iniciais.

No *cenário C*, onde em alguns nós a vazão passou a ser nula (nó quatro, cinco, seis, trinta e cinco, trinta e seis e trinta e sete) obedecendo às restrições da simulação anterior (pressões disponíveis). O somatório da vazão fornecida pelos reservatórios passou a ser de 6.525,71 l/s. A pressões disponíveis nos nós obtiveram uma média de 40,72 m.c.a, pressão mínima de 18,16 m.c.a e máxima de 49,38 m.c.a.

No *cenário D*, simulou-se o acréscimo de demandas em três nós (nó três, sete e onze), com a soma de trezentos litros por segundo na vazão fornecida pelos reservatórios. Pôde-se observar o comportamento da rede de distribuição, quanto a distribuição da vazão nos trechos da rede e as pressões disponíveis nos nós, comprovando ainda a capacidade do método em simular diferentes situações dentro dos cenários, como demonstrado.

4.1.2. Setor 11 do Perímetro Irrigado Senador Nilo Coelho

Esse exemplo corresponde ao projeto do Perímetro de Irrigação Senador Nilo Coelho que está situado no município de Petrolina, no Estado de Pernambuco, às margens do rio São Francisco. Possui vinte mil hectares irrigados, sendo o maior perímetro de irrigação em exploração no Brasil. Os vinte mil hectares são distribuídos em trinta e quatro setores pressurizados de irrigação, que recebem água de uma rede primária constituída de um canal principal e outros secundários, cuja vazão total, aduzida do rio

São Francisco, através de uma estação de bombeamento principal, pode alcançar até 23 m³/s (GOMES, 2001b).

O setor 11 possui uma estação de bombeamento secundária (EA) composta de quatro conjuntos motor-bomba (sendo um de reserva), com bombas centrífugas horizontais, de sucção simples, instaladas em paralelo, acionadas, respectivamente, por motores elétricos de 150 CV. Essa potência foi calculada para uma altura manométrica nominal de 55 mca, uma vazão nominal por bomba de 500 m³/h (vazão total demandada pelo setor é de 1.515 m³/h) e um rendimento de 80%. Tais dados (GOMES, 2001b) são fornecidos pelo projeto original elaborado pelo consórcio de consultoras ENCO-TAJAL. A pressão requerida na tomada d'água segundo o projeto é de 40 mca para uma vazão de 35 m³/h. Quanto a sua estrutura, o setor 11 é composto por 40 trechos e 39 nós, que atendem a 49 parcelas. A figura 4.5 e a tabela 4.8 apresentam com mais detalhes as características físicas do setor 11.

GOMES (2001b) diagnosticou que as modificações feitas pelos irrigantes (número de aspersores, tipo de aspersor, vazões de demanda superiores às projetadas, ampliação da área a ser irrigada) tem trazido efeitos negativos aos usuários do sistema de abastecimento.

No presente trabalho de dissertação utilizou-se os resultados do redimensionamento do sistema de abastecimento de água das parcelas de irrigação obtidos através do método Granados de dimensionamento econômico de redes ramificadas e através do método PNL2000 simula-se o comportamento do sistema com os dados originais de projeto (ENCO-TAJAL) e com os dados provenientes do diagnóstico do desempenho hidráulico do sistema (GOMES, 1997).

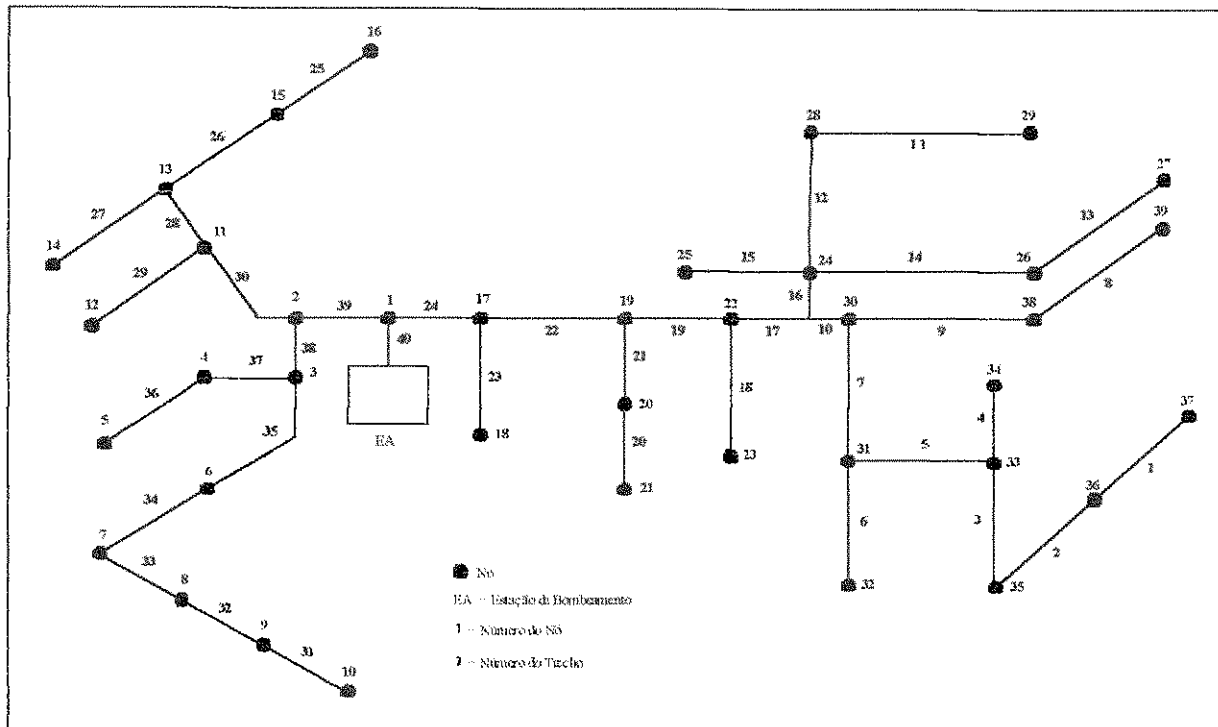


Figura 4.5: Esquema do Setor 11 do Perímetro Irrigado Senador Nilo Coelho.

Os dados utilizados para uma análise prévia da rede de distribuição foram os fornecidos pela ENCO-TAJAL (GOMES, 1997) e estão dispostos na tabela 4.8.

Tabela 4.8: Dados originais referentes à rede de distribuição do Setor 11 calculados pela ENCO-TAJAL.

| Trecho | Comp. (m) | Vazão (m ³ /h) | Vazão (l/s) | D/Classe (mm) | Perda de carga (m) | Cota do terreno (m) | Cota Piezométrica (mca) |
|--------|--------------|------------------------------|----------------|------------------|-----------------------|------------------------|----------------------------|
| 1 | 250 | 35 | 9,72 | 150/20 | 0,63 | 386,40 | 426,50 |
| 2 | 310 | 70 | 19,44 | 150/20 | 2,81 | 387,90 | |
| 3 | 160 | 105 | 29,17 | 200/20 | 0,76 | 389,50 | 430,00 |
| 4 | 70 | 35 | 9,72 | 150/20 | 0,18 | 391,00 | 430,50 |
| 5 | 220 | 140 | 38,89 | 250/20 | 0,60 | 390,60 | 430,70 |
| 6 | 310 | 70 | 19,44 | 150/20 | 2,81 | 389,30 | 428,50 |
| 7 | 300 | 280 | 77,78 | 250/20 | 2,94 | 391,90 | 431,30 |
| 8 | 320 | 35 | 9,72 | 150/20 | 0,80 | 389,50 | 432,00 |
| 9 | 220 | 70 | 19,44 | 150/20 | 1,99 | 391,50 | |
| 10 | 210 | 410 | 113,89 | 300/20 | 1,72 | 393,60 | 434,30 |
| 11 | 320 | 35 | 9,72 | 150/20 | 0,80 | 391,30 | 433,70 |
| 12 | 220 | 105 | 29,17 | 200/20 | 1,04 | 393,00 | 434,50 |
| 13 | 320 | 35 | 9,72 | 150/20 | 0,80 | 389,50 | 432,00 |
| 14 | 310 | 70 | 19,44 | 150/20 | 2,81 | 391,40 | |
| 15 | 300 | 35 | 9,72 | 150/15 | 0,75 | 393,90 | 434,80 |

Continuação da Tabela 4.8:

| Trecho | Comp. (m) | Vazão (m ³ /h) | Vazão (l/s) | D. Classe (mm) | Perda de carga (m) | Cota do terreno (m) | Cota Piezométrica (mca) |
|--------|--------------|------------------------------|----------------|-------------------|--------------------------|---------------------------|-------------------------------|
| 16 | 40 | 280 | 77,78 | 250/15 | 0,39 | 393,30 | 435,60 |
| 17 | 230 | 685 | 190,28 | 300/15 | 4,87 | 393,30 | 436,00 |
| 18 | 310 | 70 | 19,44 | 150/20 | 2,81 | 392,20 | 438,00 |
| 19 | 440 | 820 | 227,78 | 350/15 | 6,13 | 393,70 | 440,90 |
| 20 | 310 | 70 | 19,44 | 150/20 | 2,81 | 393,60 | 434,40 |
| 21 | 300 | 140 | 38,89 | 150/20 | 9,81 | 393,50 | |
| 22 | 530 | 975 | 270,83 | 400/15 | 5,31 | 393,40 | 447,00 |
| 23 | 230 | 35 | 9,72 | 150/15 | 0,58 | 395,10 | 451,80 |
| 24 | 450 | 1040 | 288,89 | 450/15 | 2,87 | 396,20 | 452,30 |
| 25 | 140 | 35 | 9,72 | 150/15 | 0,35 | 403,40 | 444,10 |
| 26 | 340 | 70 | 19,44 | 150/15 | 3,08 | 403,30 | |
| 27 | 320 | 70 | 19,44 | 150/15 | 2,90 | 401,30 | 444,60 |
| 28 | 440 | 210 | 58,33 | 200/15 | 7,51 | 403,20 | 447,50 |
| 29 | 310 | 70 | 19,44 | 150/15 | 2,81 | 400,20 | 449,80 |
| 30 | 310 | 350 | 97,22 | 300/15 | 1,89 | 402,40 | 452,60 |
| 31 | 300 | 35 | 9,72 | 150/20 | 0,75 | 392,10 | |
| 32 | 280 | 35 | 9,72 | 150/20 | 0,70 | 392,10 | 434,60 |
| 33 | 310 | 70 | 19,44 | 150/15 | 2,81 | 394,90 | |
| 34 | 210 | 105 | 29,17 | 150/15 | 4,03 | 397,70 | 438,10 |
| 35 | 340 | 140 | 38,89 | 150/15 | 11,12 | 399,00 | |
| 36 | 310 | 35 | 9,72 | 150/15 | 0,78 | 399,90 | 451,20 |
| 37 | 140 | 70 | 19,44 | 150/15 | 1,27 | 400,50 | |
| 38 | 70 | 210 | 58,33 | 200/15 | 1,20 | 401,30 | 453,30 |
| 39 | 110 | 550 | 152,78 | 350/15 | 0,73 | 402,40 | 454,50 |
| 40 | 10 | 1515 | 420,83 | 500/15 | 0,08 | 401,20 | 455,20 |

4.1.2.1. Resultados através do método Granados

De acordo com os novos cálculos realizados por GOMES (1997), a tabela de balanço hídrico do perímetro foi refeita, modificando-se o valor da vazão parcelar, pois a necessidade de água para a irrigação durante o decorrer do ano é diferente em cada mês. A vazão necessária para irrigar as parcelas de colonização do perímetro (dotação parcelar) adotadas no projeto executivo da ENCO-TAJAL, como sendo igual a 35 m³/h, estando longe de espelhar a realidade das demandas parcelares do perímetro irrigado. De acordo com o rendimento hidro-agrícola realizado por GOMES (1997) a dotação das parcelas de colonização, para os meses de máxima demanda hídrica (setembro e outubro), é de 58,8 m³/h. Para os demais meses do ano, esta dotação diminui, apesar de que ela só é inferior a 35 m³/h (valor adotado pelo projeto original) nos meses de fevereiro, março e abril, que

em os meses de menores requerimentos hídricos. Além de o projeto original estar subdimensionado no que diz respeito à dotação parcelar, o mesmo também subestima a pressão mínima requerida da entrada da parcela. De acordo com o projeto original da ENCO-TAJAL (GOMES, 1997), a pressão mínima requerida na entrada da parcela é de 40 mca, quando na realidade, este valor é de 50 mca para uma dotação parcelar de 58,8 m³/h (tabela 4.9). Para a dotação parcelar de 45 m³/h esta pressão seria de 45 mca, e para uma vazão requerida de 35 m³/h a pressão mínima requerida na cabeceira da parcela seria de 42 mca. As simulações referentes aos dados da ENCO-TAJAL e GOMES (1997) foram executadas separadamente.

Tabela 4.9: Vazão e pressão por parcela de projeto e do período de maior consumo.
(* Calculado por GOMES (1997).

| | Dotação Parcelar (m ³ /h) | Vazão do Aspensor (m ³ /h) | Perdas na Tubulação (mca) | Pressão Requerida (mca) |
|---------------|--------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------|-------------------------|
| ENCO-TAJAL | 35 | 1,03 | 3,05 | 42 |
| GOMES* (1997) | 45 | 1,32 | 5,13 | 45 |
| | 58,8 | 1,73 | 8,43 | 50 |

Por ser uma metodologia de otimização econômica o método Granados precisa de uma série de dados necessários para o cálculo da rede coletiva (dados retirados do projeto da ENCO-TAJAL), que são:

- Número anual de horas de bombeamento: 5000 (ENCO-TAJAL) e 3600 (GOMES, 1997);
- Custo do Kwh: Cr\$ 0,31 (moeda utilizada na época da execução do projeto);
- Rendimento do conjunto motor-bomba: 80%;
- Vida útil do projeto: 40 anos;
- Taxa de juros anuais: 9%.

Os dados apresentados anteriormente são utilizados para o cálculo do custo energético ao final do tempo de vida útil da obra. O custo da rede envolve o preço da tubulação e o custo em sua instalação, como descrito na tabela 4.10, onde tem-se o diâmetro da tubulação e o respectivo preço de acordo com a classe a que pertence.

Tabela 4.10: Preço da tubulação conforme Classe.

| Diâmetro (mm) | Preço (Cr\$/m) | | |
|------------------|----------------|-----------|-----------|
| | Classe 15 | Classe 20 | Classe 25 |
| 100 | 484,00 | 624,00 | 765,00 |
| 125 | 665,00 | 858,00 | 987,00 |
| 150 | 914,00 | 1.053,00 | 1.211,00 |
| 200 | 1.297,00 | 1.590,00 | 1.829,00 |
| 250 | 1.720,00 | 2.129,00 | 2.555,00 |
| 300 | 2.188,00 | 2.743,00 | 3.429,00 |
| 350 | 2.841,00 | 3.530,00 | 4.413,00 |
| 400 | 3.665,00 | 4.636,00 | 5.775,00 |
| 450 | 4.768,00 | 6.088,00 | 7.731,00 |
| 500 | 5.591,00 | 7.433,00 | 9.440,00 |
| 600 | 6.600,00 | 9.000,00 | 11.430,00 |
| 700 | 7.500,00 | 10.500,00 | 13.335,00 |

Para obtenção dos resultados através do método Granados foram utilizados os dados do projeto original (Tabela 4.8) redimensionando-se a rede para uma situação referente a ENCO-TAJAL e para a de demanda máxima (GOMES, 1997) obedecendo-se às novas vazões e pressões necessárias para a total eficiência da rede.

Tabela 4.11: Tabela com diâmetros calculados pela ENCO-TAJAL e por GOMES (1997).

| Trecho | ENCO-TAJAL (mm) | GOMES (mm) | GOMES* (mm) | Trecho | ENCO-TAJAL (mm) | GOMES (mm) | GOMES* (mm) |
|--------|--------------------|------------------|------------------|--------|--------------------|------------------|------------------|
| 1 | 150/20 | 100/20 125/20 | 150/25 | 19 | 350/15 | 400/15 | 150/15 |
| 2 | 150/20 | 150/20 | 200/25 | 20 | 150/20 | 125/20 | 150/20 |
| 3 | 200/20 | 200/20 | 200/25 | 21 | 150/20 | 200/20 | 250/20 |
| 4 | 150/20 | 100/20 | 125/25 150/25 | 22 | 400/15 | 400/15 | 500/15 |
| 5 | 250/20 | 200/20 | 250/20 | 23 | 150/15 | 100/20 | 125/20 |
| 6 | 150/20 | 125/20 | 200/25 | 24 | 450/15 | 400/15 | 500/15 |
| 7 | 250/20 | 300/15 | 300/20 350/15 | 25 | 150/15 | 125/20 | 150/20 |
| 8 | 150/20 | 100/20 | 150/25 150/20 | 26 | 150/15 | 150/15 | 200/20 |
| 9 | 150/20 | 150/20 | 150/20 200/20 | 27 | 150/15 | 125/20 150/20 | 200/20 |
| | | | | 28 | 200/15 250/15 | 200/15 250/15 | 300/15 350/15 |
| | | | | 29 | 150/15 | 125/20 | 200/20 |

Continuação da Tabela 4.11:

| Trecho | ENCO-TAJAL (mm) | GOMES (mm) | GOMES* (mm) | Trecho | ENCO-TAJAL (mm) | GOMES (mm) | GOMES* (mm) |
|--------|--------------------|---------------|----------------|--------|--------------------|---------------|----------------|
| 10 | 300/20 | 300/20 | 350/15 | 30 | 300/15 | 300/15 | 350/15 |
| 11 | 150/20 | 100/20 | 125/20 | 31 | 150/20 | 100/20 | 125/20 |
| | | 125/20 | 150/20 | 32 | 150/20 | 100/20 | 200/20 |
| 12 | 200/20 | 150/20 | 250/20 | 33 | 150/15 | 125/20 | 250/20 |
| 13 | 150/20 | 100/20 | 150/25 | 34 | 150/15 | 150/15 | 250/20 |
| 14 | 150/20 | 150/20 | 150/20 | | | | 300/15 |
| 15 | 150/15 | 100/20 | 125/20 | 35 | 150/15 | 200/20 | 300/15 |
| | | 125/20 | 150/20 | 36 | 150/15 | 100/20 | 125/20 |
| 16 | 250/15 | 300/15 | 350/15 | 37 | 150/15 | 125/20 | 200/20 |
| 17 | 300/15 | 350/15 | 400/15 | 38 | 200/15 | 200/15 | 300/15 |
| 18 | 150/20 | 125/20 | 150/20 | 39 | 350/15 | 350/15 | 400/15 |
| | | | | 40 | 500/15 | 500/15 | 700/15 |

Os resultados demonstrados na tabela 4.11 referente à coluna ENCO-TAJAL são os calculados pela mesma. Os resultados da coluna GOMES foram obtidos através de Granados usando-se os mesmos dados do projeto da ENCO-TAJAL. A coluna referente a GOMES* obteve resultados considerando-se os novos valores de demanda e pressão do projeto.

O referido modelo atua calculando também o valor econômico do sistema. O custo total de investimento da rede coletiva no resultado GOMES foi de Cr\$ 23.429.820,00 (cifra da moeda brasileira referente a época da elaboração do projeto do Perímetro Irrigado Senador Nilo Coelho), derivado dos custos dos tubos (Tabela 4.10) mais a instalação. O custo energético não foi calculado pela ENCO-TAJAL, no entanto GOMES estimou esse dado encontrando um valor de Cr\$ 13.465.211,00 para uma cota piezométrica de alimentação de 455,20 metros.

Os custos originais dos tubos apresentados na tabela 4.10 serão ainda majorados nas simulações em 50% para fazer frente a possíveis custos de transporte e instalação e das peças de conexão e controle. Por sua vez, o custo total de investimento da rede, obtido por meio do dimensionamento da ENCO-TAJAL (não houve a utilização de metodologias de otimização econômica), foi de Cr\$ 25.058.946,00, o que representa um valor 6,95% superior ao custo calculado através do método de otimização econômica. O custo de energia capitalizado, obtido do dimensionamento econômico considerando-se os dados

originais, foi de Cr\$ 13.466.323,00. Este custo capitalizado foi determinado para uma taxa de juros anual de 10%, um aumento anual de energia de 9% e vida útil das tubulações de 40 anos.

Os resultados da coluna GOMES* utilizaram os dados fornecidos na tabela 4.9. A necessidade do aumento da pressão na entrada das parcelas fez com que uma nova cota piezométrica fosse necessária, sendo o valor igual a 461,2 metros. Nessa cota, o custo ótimo da rede coletiva de distribuição (com os mesmos preços dos tubos utilizados no dimensionamento da ENCO-TAJAL) é igual a Cr\$ 35.333.712,00, que é 29% maior do que o custo correspondente à rede atualmente existente no perímetro. Para essa cota piezométrica o custo capitalizado da energia de bombeamento é de Cr\$ 17.947.644,00, o que é 25% maior do que o calculado para o estado atual de funcionamento da estação de bombeamento do Setor 11.

4.1.2.2. Resultados através do método PNL2000 com dados da ENCO-TAJAL – CENÁRIO 1

As simulações realizadas com o método PNL2000 obedeceram aos mesmos critérios a que o método Granados foi submetido. A primeira simulação ou *cenário 1* utilizou os dados originais do projeto, com vazão parcelar de 35 m³/h, a pressão na entrada da parcela é de 40 m.c.a e o número de horas de bombeamento anual de 5000, o restante dos dados como preço da tubulação, vida útil da obra e rendimento do conjunto motor-bomba são os mesmos. Essa primeira simulação com o método PNL2000 é comparada aos resultados do projeto pela ENCO-TAJAL e GOMES.

Como nesta simulação é envolvido o valor monetário da obra, é necessário que a equação que relaciona a variação do preço da tubulação com o diâmetro seja formulada, assim como as formulações como o fator de atualização (equação 3.1) e o custo de operação da estação de bombeamento. Todas estas formulações fazem parte da Função Objetivo.

A equação que relaciona o custo de implantação da tubulação $P(D)$, com o diâmetro (D), pode ser obtida através de um ajuste de curva executado pela ferramenta *linha de tendência* do tipo potencial da planilha Excel. Tais gráficos e suas respectivas equações para as classes utilizadas no trabalho estão relacionados nas figuras 4.6, 4.7 e 4.8.

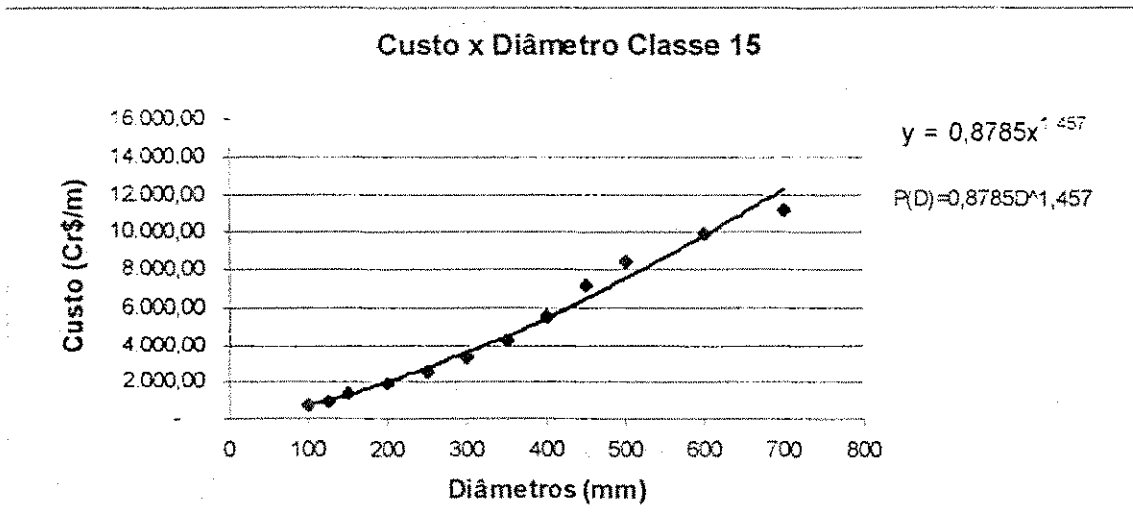


Figura 4.6: Gráfico de relação Custo X Diâmetro Classe 15.

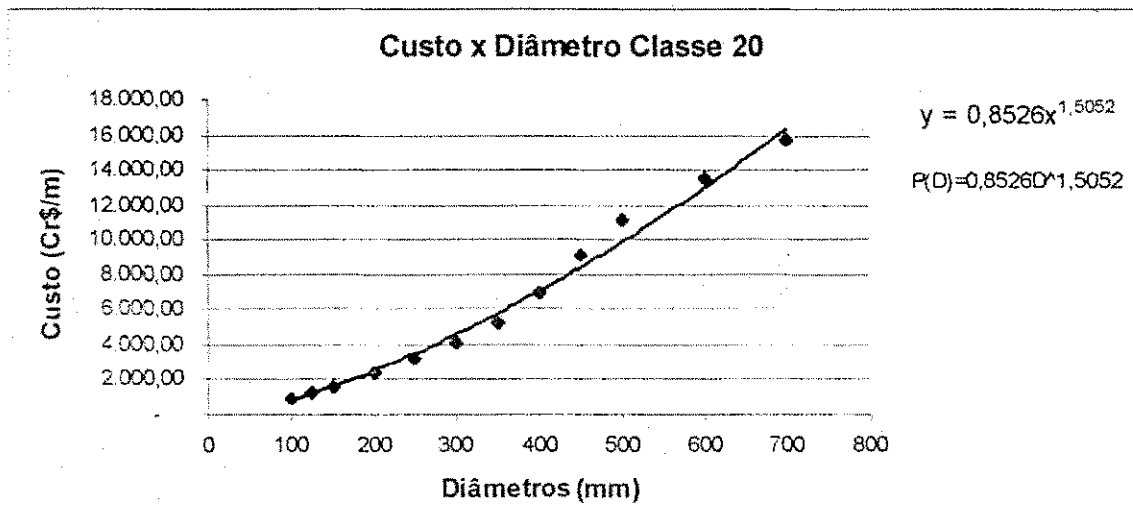


Figura 4.7: Gráfico de relação Custo X Diâmetro Classe 20.

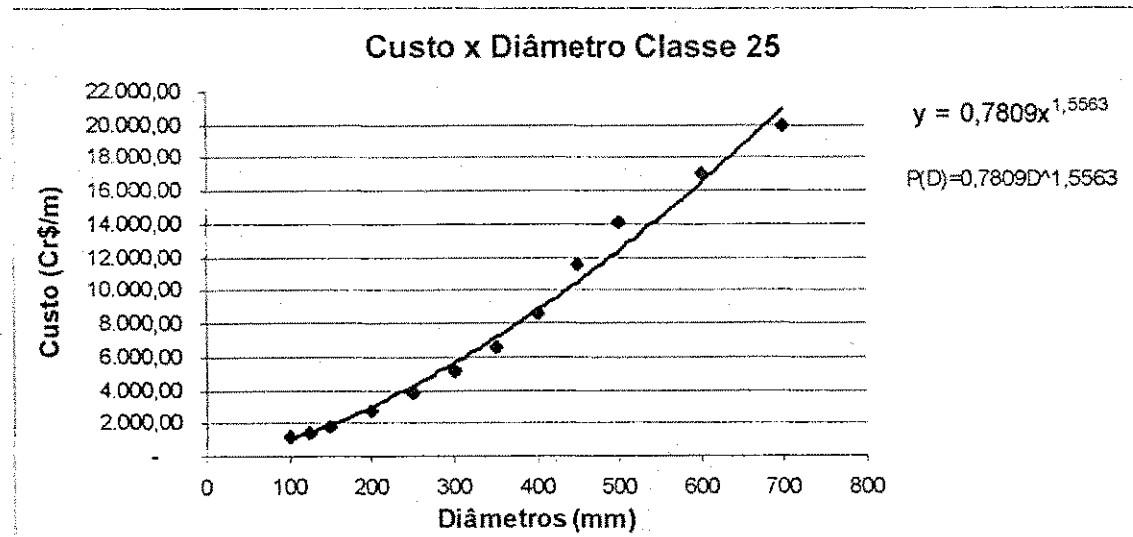


Figura 4.8: Gráfico de relação Custo X Diâmetro Classe 25.

A partir dos gráficos das figuras antes mencionadas tem-se:

- Para classe 15 – $P(D) = 0,8785 \times D^{1,4570}$;
- Para classe 20 – $P(D) = 0,8526 \times D^{1,5052}$;
- Para classe 25 – $P(D) = 0,7809 \times D^{1,5563}$.

O custo unitário (C_h) de operação da estação de bombeamento por unidade de altura manométrica pode ser determinado através da equação 3.3 na célula “J50” (tabela 4.9).

$$C_h = \frac{9,81 \times 0,42083 \times 5000 \times 0,31}{0,80} = 7.998,66 \text{ Cr\$/m/ano} \quad (\text{ENCO-TAJAL})$$

$$C_h = \frac{9,81 \times 0,70233 \times 3600 \times 0,31}{0,80} = 9.611,40 \text{ Cr\$/m/ano} \quad (\text{GOMES})$$

Para a taxa de juros anuais de 10%, taxa de aumento de energia de 9% e a vida útil das instalações de 40 anos, o coeficiente de atualização (célula K50) na próxima tabela será:

$$F_a = \frac{(1+0,09)^{40} - (1+0,10)^{40}}{(1+0,09) - (1+0,10)} \times \frac{1}{(1+0,10)^{40}} = 30,6$$

A edição inicial da planilha sem o uso da ferramenta Solver está mostrada na tabela 4.12:

Continuação da tabela 4.12:

46

47 Segunda Parte da Planilha

| 48 | Nº | Alt. Piez (m) | Cota (m) | P. Disp. (mca) | Nº de horas Anuais | C. de kWh (C/\$) | Rend. (%) | Pot. Requer (Kw) | C. energia (C/\$) | Coef. Atual (Fa) | C. energia atual (C/\$) | C. total (C/\$) |
|----|----|---------------|----------|----------------|--------------------|------------------|-----------|------------------|-------------------|------------------|-------------------------|-----------------|
| 49 | 1 | 455,12 | 401,20 | 53,92 | 5000 | 0,310 | 80 | 278,67 | 431.931,23 | 30,6 | 13.217.095,77 | 38.440.057,44 |
| 51 | 2 | 454,39 | 402,40 | 51,99 | | | | | | | | |
| 52 | 3 | 453,20 | 401,30 | 51,90 | | | | | | | | |
| 53 | 4 | 451,93 | 400,50 | 51,43 | | | | | | | | |
| 54 | 5 | 451,15 | 399,90 | 51,25 | | | | | | | | |
| 55 | 6 | 442,08 | 399,00 | 43,08 | | | | | | | | |
| 56 | 7 | 436,05 | 397,70 | 40,35 | | | | | | | | |
| 57 | 8 | 435,24 | 394,90 | 40,34 | | | | | | | | |
| 58 | 9 | 434,53 | 392,10 | 42,43 | | | | | | | | |
| 59 | 10 | 433,78 | 392,10 | 41,68 | | | | | | | | |
| 60 | 11 | 432,50 | 402,40 | 50,10 | | | | | | | | |
| 61 | 12 | 449,69 | 400,20 | 49,49 | | | | | | | | |
| 62 | 13 | 444,99 | 403,20 | 41,79 | | | | | | | | |
| 63 | 14 | 442,09 | 401,30 | 40,79 | | | | | | | | |
| 64 | 15 | 441,91 | 403,30 | 38,61 | | | | | | | | |
| 65 | 16 | 441,56 | 403,40 | 38,16 | | | | | | | | |
| 66 | 17 | 452,26 | 396,20 | 56,06 | | | | | | | | |
| 67 | 18 | 451,68 | 395,10 | 56,58 | | | | | | | | |
| 68 | 19 | 446,94 | 393,40 | 53,54 | | | | | | | | |
| 69 | 20 | 437,13 | 393,50 | 43,63 | | | | | | | | |
| 70 | 21 | 434,32 | 393,60 | 40,72 | | | | | | | | |
| 71 | 22 | 440,81 | 393,70 | 47,11 | | | | | | | | |
| 72 | 23 | 438,00 | 392,20 | 45,80 | | | | | | | | |
| 73 | 24 | 435,55 | 393,30 | 42,25 | | | | | | | | |
| 74 | 25 | 434,80 | 393,90 | 40,90 | | | | | | | | |
| 75 | 26 | 432,74 | 391,40 | 41,34 | | | | | | | | |
| 76 | 27 | 431,94 | 399,50 | 42,44 | | | | | | | | |
| 77 | 28 | 434,51 | 393,00 | 41,51 | | | | | | | | |
| 78 | 29 | 433,71 | 391,30 | 42,41 | | | | | | | | |
| 79 | 30 | 434,22 | 393,60 | 40,62 | | | | | | | | |
| 80 | 31 | 431,28 | 391,90 | 39,38 | | | | | | | | |
| 81 | 32 | 428,47 | 389,30 | 39,17 | | | | | | | | |
| 82 | 33 | 430,68 | 390,60 | 40,08 | | | | | | | | |
| 83 | 34 | 430,51 | 391,00 | 39,51 | | | | | | | | |
| 84 | 35 | 429,92 | 389,50 | 40,42 | | | | | | | | |
| 85 | 36 | 427,12 | 387,90 | 39,22 | | | | | | | | |
| 86 | 37 | 426,49 | 386,40 | 40,09 | | | | | | | | |
| 87 | 38 | 432,23 | 391,50 | 40,73 | | | | | | | | |
| 88 | 39 | 431,43 | 399,50 | 41,93 | | | | | | | | |


 Diâmetros Classe 15
 Diâmetros Classe 20

4.1.2.2.1. Etapa 1

A primeira fase da etapa 1 refere-se a *Função Objetivo* (equação 3.2) correspondente ao custo atualizado do sistema de abastecimento:

$$C(D_i, Q_i, H) = [250 P(D_1) + 310 P(D_2) + \dots + 110 P(D_{39}) + 10 P(D_{40})] + (7.998,66 \times 30,6 \times H)$$

Ao se substituir P(D) na equação anterior, deve-se ter atenção quanto a que classe pertence à tubulação, classe 15, 20 e 25, que ocorrem nessa rede de distribuição.

As *Restrições* da etapa I são:

- a) Pressões mínimas nos nós: esta restrição impõe que em todos os nós da rede a pressão disponível seja igual ou superior a 40 mca (E50 a E88);
- b) Diâmetros da rede: os diâmetros impostos ao Solver devem estar compreendidos entre 100 mm e 500 mm (D4 a D43), já que a rede tem estes como diâmetros mínimos e máximos;

Sabendo quais são as *Restrições* a serem utilizadas nesta primeira etapa, é necessário que se definam as células *Variáveis* do método. Nessa etapa tem-se como *Variáveis* de decisão os diâmetros e a altura manométrica (D4 a D44).

Após a definição da *Função Objetivo*, das *Variáveis* e das *Restrição* inicia-se a etapa de edição da planilha e utilização da ferramenta Solver.

- Primeira Parte da Planilha:

Coluna B: número de trechos. Esta coluna é preenchida com os 40 trechos da rede;

Coluna C: vazão nos trechos em l/s. Estes valores foram fornecidos pela ENCO-TAJAL em m³/h e convertidos para l/s para se adequar ao restantes das equações;

Coluna D: diâmetros da tubulação. Estes valores foram fornecidos pela ENCO-TAJAL, devido à rede ser existente e estar sendo simulado o redimensionamento econômico da mesma, esta se torna uma *Variável*;

Coluna D (linha 44): altura manométrica. Como a altura manométrica influencia nas pressões e no custo da rede, esta também é uma *Variável* (inicial igual a 54 m);

Coluna D (linha 45): altura piezométrica de cabeceira em metros. Este valor é obtido pela soma da altura manométrica mais a cota do terreno de origem (inicial igual a 455,20 m);

Coluna E: coeficiente de Hazen-Williams. Foi adotado pelo projeto da ENCO-TAJAL e por GOMES (1997) o valor de $C = 140$;

Coluna F: comprimento dos trechos em metros. Valores fornecidos pela ENCO-TAJAL;

Coluna G: perdas de carga em mca. Calculados através da fórmula de Hazen-Williams de perda de carga;

Coluna H: perdas de cargas majoradas. Segundo GOMES (1997), esta coluna foi adotada para se calcular a perda de carga nos trechos majoradas em 15% para fazer frente às perdas de carga localizadas na rede de distribuição;

Coluna I: cota do terreno no trecho em metros. Fornecido pela ENCO-TAJAL;

Coluna J: velocidade em m/s. Calculada para se saber a velocidade média em um determinado trecho;

Coluna K: vazão nos trechos em m³/h. Estes dados foram os fornecidos inicialmente pela ENCO-TAJAL;

Coluna L: custo unitário em Cr\$/m. Estes valores são obtidos através da equação que relaciona o preço do tubo com o seu diâmetro;

Coluna M: custo total do trecho em Cr\$. Este valor é igual ao custo unitário do tubo do diâmetro utilizado vezes o comprimento do trecho;

Coluna M (linha 44): custo total da rede em Cr\$. Esta célula compreende a soma do custo de todos os trechos.

- Segunda Parte da Planilha:

Coluna B: número de nós;

Coluna C: altura piezométrica do nó em mca. Este valor é calculado pela diferença entre a altura piezométrica a montante e a perda de carga do trecho a montante;

Coluna D: cota topográfica do nó em metros. Dados fornecidos;

Coluna E: pressão disponível no nó em mca. O seu cálculo corresponde à diferença entre a altura piezométrica e a cota do terreno do nó;

Coluna F: número anual de horas de bombeamento. Este é um valor atribuído pela ENCO-TAJAL (5000 horas de bombeamento);

Coluna G: custo do kwh. Este é um valor atribuído pela ENCO-TAJAL (Cr\$ 0,31);

Coluna H: rendimento do conjunto motor-bomba. Valor atribuído pela ENCO-TAJAL (80%);

Coluna I: potência do conjunto motor-bomba;

Coluna J: custo anual com energia. Este valor é encontrado após se multiplicarem o custo do kwh vezes número anual de horas bombeadas vezes a potência do conjunto motor-bomba;

Coluna K: coeficiente de atualização. Valor calculado através da equação 3.1 ($F_a = 30,6$);

Coluna L: custo atualizado da energia. Valor calculado multiplicando-se o coeficiente de atualização vezes o custo anual com energia;

Coluna M: custo total do projeto. Esta célula é a que será minimizada na simulação através da ferramenta Solver.

Após se inserir na planilha os dados iniciais, se utiliza a ferramenta Solver conforme a figura 4.9 para o início da simulação.

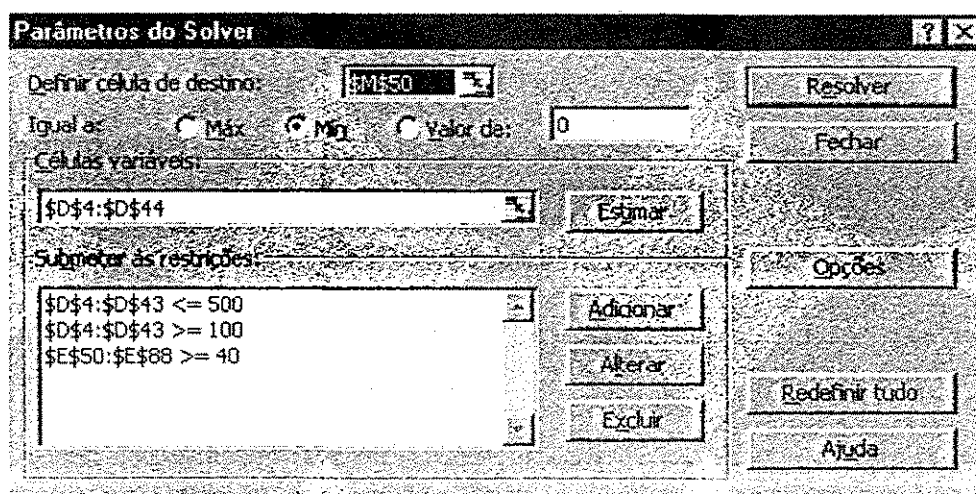


Figura 4.9: Caixa de Parâmetros do Solver simulando o redimensionamento da rede na etapa 1 (ENCO-TAJAL).

Após o uso da ferramenta Solver do Excel obteve-se os resultados que estão apresentados na tabela 4.13:

Tabela 4.13: Resultado obtido através do Método PNL2000 com os dados do projeto original da ENCO-TAJAL na Etapa I:

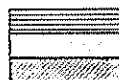


| A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | | |
|----------------------------|--------------------|---------------|--------|-----------|--------------|-----------------|----------|------------|---------------------------|---------------------|----------------|---------------------|--|---------------|
| Primeira Parte da Planilha | | | | | | | | | | | | | | |
| Trecho | Vazão (l/s) | Diâmetro (mm) | Coef. | Comp. (m) | Perdas (mca) | Perda maj. -15% | Cota (m) | Vcl. (m/s) | Vazão (m ³ /h) | Custo Unit. (R\$/m) | C. Total (R\$) | | | |
| 4 | 1 | 9,72 | 123 | 140 | 250 | 1,42 | 1,63 | 386,40 | 0,82 | 35 | 1.199,03 | 299.008,54 | | |
| 5 | 2 | 19,44 | 151 | 140 | 310 | 2,39 | 2,75 | 387,90 | 1,09 | 70 | 1.617,72 | 501.492,91 | | |
| 6 | 3 | 29,17 | 189 | 140 | 160 | 1,48 | 1,70 | 389,50 | 1,29 | 105 | 1.931,06 | 308.970,12 | | |
| 7 | 4 | 9,72 | 100 | 140 | 70 | 1,10 | 1,27 | 391,00 | 1,24 | 35 | 873,26 | 61.128,45 | | |
| 8 | 5 | 38,89 | 164 | 140 | 220 | 2,30 | 2,65 | 390,60 | 1,46 | 140 | 2.189,82 | 481.761,21 | | |
| 9 | 6 | 19,44 | 126 | 140 | 310 | 5,07 | 5,83 | 389,30 | 1,49 | 70 | 1.282,74 | 397.649,11 | | |
| 10 | 7 | 77,78 | 237 | 140 | 300 | 3,34 | 3,84 | 391,90 | 1,77 | 280 | 3.193,56 | 953.067,87 | | |
| 11 | 8 | 9,72 | 103 | 140 | 320 | 4,25 | 4,90 | 389,50 | 1,16 | 35 | 919,11 | 294.114,58 | | |
| 12 | 9 | 19,44 | 126 | 140 | 220 | 3,98 | 4,57 | 391,50 | 1,55 | 70 | 1.243,74 | 273.622,26 | | |
| 13 | 10 | 113,89 | 274 | 140 | 210 | 2,34 | 2,69 | 393,60 | 1,94 | 410 | 3.973,01 | 834.332,05 | | |
| 14 | 11 | 9,72 | 105 | 140 | 320 | 3,97 | 4,56 | 391,30 | 1,12 | 35 | 939,66 | 300.691,87 | | |
| 15 | 12 | 29,17 | 144 | 140 | 220 | 4,43 | 5,09 | 393,00 | 1,78 | 105 | 1.517,28 | 333.802,64 | | |
| 16 | 13 | 9,72 | 105 | 140 | 320 | 4,31 | 4,96 | 389,50 | 1,16 | 35 | 915,88 | 293.081,61 | | |
| 17 | 14 | 19,44 | 126 | 140 | 310 | 5,65 | 6,50 | 391,40 | 1,55 | 70 | 1.240,50 | 384.553,49 | | |
| 18 | 15 | 9,72 | 100 | 140 | 300 | 4,72 | 5,42 | 383,90 | 1,24 | 35 | 720,68 | 216.203,65 | | |
| 19 | 16 | 77,78 | 221 | 140 | 40 | 0,62 | 0,71 | 393,30 | 2,02 | 280 | 2.294,67 | 91.786,98 | | |
| 20 | 17 | 190,28 | 350 | 140 | 230 | 2,00 | 2,30 | 393,30 | 1,98 | 685 | 4.469,94 | 1.028.087,24 | | |
| 21 | 18 | 19,44 | 112 | 140 | 310 | 10,23 | 11,77 | 392,20 | 1,98 | 70 | 1.032,52 | 320.081,97 | | |
| 22 | 19 | 227,78 | 372 | 140 | 440 | 3,94 | 4,53 | 393,70 | 2,09 | 820 | 4.895,66 | 2.154.088,88 | | |
| 23 | 20 | 19,44 | 126 | 140 | 310 | 5,61 | 6,45 | 393,60 | 1,55 | 70 | 1.243,09 | 365.357,53 | | |
| 24 | 21 | 38,89 | 155 | 140 | 300 | 7,34 | 8,44 | 393,50 | 2,07 | 140 | 1.684,07 | 505.221,22 | | |
| 25 | 22 | 270,83 | 399 | 140 | 530 | 4,65 | 5,35 | 393,40 | 2,16 | 975 | 5.421,04 | 2.873.149,74 | | |
| 26 | 23 | 9,72 | 100 | 140 | 230 | 3,62 | 4,16 | 395,10 | 1,24 | 35 | 720,68 | 165.756,13 | | |
| 27 | 24 | 288,89 | 407 | 140 | 450 | 4,06 | 4,67 | 396,20 | 2,22 | 1040 | 5.571,02 | 2.506.959,70 | | |
| 28 | 25 | 9,72 | 121 | 140 | 140 | 0,87 | 0,99 | 403,40 | 0,84 | 35 | 952,93 | 133.410,40 | | |
| 29 | 26 | 19,44 | 148 | 140 | 340 | 2,83 | 3,25 | 403,30 | 1,13 | 70 | 1.280,24 | 435.290,91 | | |
| 30 | 27 | 19,44 | 128 | 140 | 320 | 5,52 | 6,35 | 401,30 | 1,52 | 70 | 1.029,23 | 329.353,66 | | |
| 31 | 28 | 58,33 | 216 | 140 | 440 | 4,53 | 5,20 | 403,20 | 1,60 | 210 | 2.208,11 | 971.567,65 | | |
| 32 | 29 | 19,44 | 110 | 140 | 310 | 11,00 | 12,65 | 400,20 | 2,04 | 70 | 829,36 | 257.107,02 | | |
| 33 | 30 | 97,22 | 254 | 140 | 310 | 3,68 | 4,23 | 402,40 | 1,91 | 350 | 2.807,76 | 870.406,62 | | |
| 34 | 31 | 9,72 | 106 | 140 | 300 | 3,48 | 4,00 | 392,10 | 1,09 | 35 | 959,11 | 267.734,45 | | |
| 35 | 32 | 9,72 | 106 | 140 | 280 | 3,29 | 3,79 | 392,10 | 1,10 | 35 | 955,35 | 267.497,76 | | |
| 36 | 33 | 19,44 | 135 | 140 | 310 | 4,10 | 4,71 | 394,90 | 1,36 | 70 | 1.114,55 | 345.509,74 | | |
| 37 | 34 | 29,17 | 152 | 140 | 210 | 3,30 | 3,80 | 397,70 | 1,61 | 105 | 1.324,49 | 278.142,95 | | |
| 38 | 35 | 38,89 | 165 | 140 | 340 | 6,06 | 6,97 | 399,00 | 1,82 | 140 | 1.495,97 | 508.629,20 | | |
| 39 | 36 | 9,72 | 100 | 140 | 310 | 4,87 | 5,60 | 399,90 | 1,24 | 35 | 720,68 | 223.410,44 | | |
| 40 | 37 | 19,44 | 100 | 140 | 140 | 7,95 | 9,14 | 400,50 | 2,48 | 70 | 720,68 | 100.895,04 | | |
| 41 | 38 | 58,33 | 186 | 140 | 70 | 1,49 | 1,71 | 401,30 | 2,15 | 210 | 1.777,93 | 124.455,18 | | |
| 42 | 39 | 152,78 | 305 | 140 | 110 | 1,25 | 1,44 | 402,40 | 2,10 | 550 | 3.653,22 | 401.853,69 | | |
| 43 | 40 | 420,83 | 496 | 140 | 10 | 0,07 | 0,08 | 401,20 | 2,18 | 1515 | 7.432,36 | 74.323,57 | | |
| 44 | Altura Man. | | 57,40 | | | | | | | | | Custo da Rede (R\$) | | 21.578.546,01 |
| 45 | Pez. de cam. (mca) | | 458,60 | | | | | | | | | | | |

Continuação da tabela 4.13:

46

47 Segunda Parte da Planilha

| 48 | Nº | Alt. Piez. (m) | Cota (m) | P. Disp. (mca) | Nº de horas Anuais | C. do Kw (R\$) | Rend. do bomb (%) | Pot. Requer. (Kw) | C. energia (Cr\$) | Coef. Atual (Fa) | C. energia atual (Cr\$) | C. total (Cr\$) |
|----|----|-------------------|-------------|-------------------|-----------------------|-------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------|----------------------------|--------------------------|
| 49 | 1 | 458,52 | 401,20 | 57,32 | 5000 | 0,310 | 80 | 296,21 | 459.118,86 | 30,6 | 14.049.037,07 | 35.607.585,88 |
| 51 | 2 | 457,08 | 402,40 | 54,68 | | | | | | | | |
| 52 | 3 | 456,37 | 401,30 | 54,07 | | | | | | | | |
| 53 | 4 | 446,24 | 400,50 | 45,74 | | | | | | | | |
| 54 | 5 | 440,63 | 399,90 | 40,73 | | | | | | | | |
| 55 | 6 | 448,40 | 399,00 | 49,40 | | | | | | | | |
| 56 | 7 | 444,60 | 397,70 | 46,90 | | | | | | | | |
| 57 | 8 | 439,89 | 394,90 | 44,99 | | | | | | | | |
| 58 | 9 | 436,10 | 392,10 | 44,00 | | | | | | | | |
| 59 | 10 | 432,10 | 392,10 | 40,00 | | | | | | | | |
| 60 | 11 | 452,85 | 402,40 | 50,45 | | | | | | | | |
| 61 | 12 | 440,20 | 400,20 | 40,00 | | | | | | | | |
| 62 | 13 | 447,65 | 403,20 | 44,45 | | | | | | | | |
| 63 | 14 | 441,30 | 401,30 | 40,00 | | | | | | | | |
| 64 | 15 | 444,39 | 403,30 | 41,09 | | | | | | | | |
| 65 | 16 | 443,40 | 403,40 | 40,00 | | | | | | | | |
| 66 | 17 | 453,65 | 396,20 | 57,65 | | | | | | | | |
| 67 | 18 | 449,69 | 396,10 | 54,59 | | | | | | | | |
| 68 | 19 | 448,50 | 393,40 | 55,10 | | | | | | | | |
| 69 | 20 | 440,05 | 393,50 | 46,55 | | | | | | | | |
| 70 | 21 | 433,60 | 393,60 | 40,00 | | | | | | | | |
| 71 | 22 | 443,97 | 393,70 | 50,27 | | | | | | | | |
| 72 | 23 | 432,20 | 392,20 | 40,00 | | | | | | | | |
| 73 | 24 | 440,96 | 393,30 | 47,66 | | | | | | | | |
| 74 | 25 | 436,53 | 393,90 | 41,63 | | | | | | | | |
| 75 | 26 | 434,46 | 391,40 | 43,06 | | | | | | | | |
| 76 | 27 | 429,50 | 389,50 | 40,00 | | | | | | | | |
| 77 | 28 | 435,86 | 393,00 | 42,86 | | | | | | | | |
| 78 | 29 | 431,30 | 391,30 | 40,00 | | | | | | | | |
| 79 | 30 | 438,98 | 393,60 | 45,38 | | | | | | | | |
| 80 | 31 | 435,13 | 391,90 | 43,23 | | | | | | | | |
| 81 | 32 | 429,30 | 389,30 | 40,00 | | | | | | | | |
| 82 | 33 | 432,48 | 390,60 | 41,88 | | | | | | | | |
| 83 | 34 | 431,22 | 391,00 | 40,22 | | | | | | | | |
| 84 | 35 | 430,79 | 389,50 | 41,29 | | | | | | | | |
| 85 | 36 | 428,03 | 387,90 | 40,13 | | | | | | | | |
| 86 | 37 | 426,40 | 386,40 | 40,00 | | | | | | | | |
| 87 | 38 | 434,40 | 391,50 | 42,90 | | | | | | | | |
| 88 | 39 | 429,50 | 389,50 | 40,00 | | | | | | | | |


 Custo Total Minimizado (Célula Destino)

 Diâmetros Classe 15

 Diâmetros Classe 20

4.1.2.2.2. Etapa 2

De posse dos resultados dos diâmetros ótimos e altura manométrica obtidos na etapa 1 da simulação, realiza-se um novo processo, considerando como variáveis as vazões nos trechos, os dois comprimentos para cada trecho e a altura de bombeamento. Para cada trecho são adotados dois diâmetros comerciais, um imediatamente superior e outro imediatamente inferior ao obtido na primeira etapa. Antes de elaborar a Função Objetivo, é preciso definir os diâmetros comerciais disponíveis para a solução do problema. Com base nos resultados obtidos na etapa 1 do problema é que se adiciona os pares de diâmetros comerciais pré-dimensionadas.

A primeira fase da etapa 2 refere-se a *Função Objetivo* (equação 3.9) correspondente ao custo atualizado do sistema de abastecimento:

$$C(D_i, Q_i, H) = [(200 P(D_{1,1}) + 50 P(D_{1,2})) + (210 P(D_{2,1}) + 100 P(D_{2,2})) + \dots + (55 P(D_{39,1}) + 55 P(D_{39,2})) + (5 P(D_{40,1}) + 5 P(D_{40,2}))] + (7.998,66 \times 30,6 \times H)$$

As *Restrições* da etapa 2 são:

- Pressões mínimas nos nós: esta restrição impõe que em todos os nós da rede a pressão disponível seja igual ou superior a 40 mca (E139 a E177);
- Comprimentos dos trechos: a soma dos sub-trechos de um trecho deve ser igual ao comprimento do trecho considerado;
- Não negatividade dos comprimentos: todos os comprimentos devem ser maiores ou iguais a zero;

Após a definição da *Função Objetivo*, das *Variáveis* e das *Restrição* inicia-se a etapa de edição da planilha e utilização da ferramenta Solver.

- Primeira Parte da Planilha:

Coluna B: número de trechos;

Coluna C: vazão nos trechos em l/s. Estes valores foram fornecidos pela ENCO-TAJAL em m³/h e convertidos para l/s para se adequar ao restantes das equações (célula C4: =(K4*1000)/3600);

Coluna D: diâmetros da tubulação. Nesta segunda etapa, tem-se o diâmetro comercial dos sub-trechos (D4 a D83);

Coluna D (linha 84): altura manométrica. Como a altura manométrica influencia nas pressões e no custo da rede, esta também é uma *Variável* (inicial igual a 51,80 m);

Coluna D (linha 85): altura piezométrica de cabeceira em metros. Este valor é obtido pela soma da altura manométrica mais a cota do terreno de origem (inicial igual a 453,00 m);

Coluna E: coeficiente de Hazen-Williams. Foi adotado pelo projeto da ENCO-TAJAL e por GOMES (1997) o valor de C = 140;

Coluna F: comprimento dos trechos em metros. Na segunda etapa os comprimentos dos sub-trechos são *Variáveis* (F4 a F83);

Coluna F (F84 a F123): vazão nos trechos em l/s. Esta coluna é igual coluna C e é inserida logo abaixo dos comprimentos dos trechos para ser facilitada a sua adição às *Variáveis*;

Coluna F (linha 124): altura manométrica. Esta célula tem o mesmo valor que a célula localizada na coluna D linha 84, este é o mesmo artifício utilizado nas linhas anteriores;

Coluna G: perdas de carga em mca. Calculados através da fórmula de Hazen-Williams de perda de carga;

Coluna H: perdas de cargas majoradas. Segundo GOMES (1997), esta coluna foi adotada para se calcular a perda de carga nos trechos majoradas em 15% para fazer frente às perdas de carga localizadas na rede de distribuição;

Coluna I: perdas totais no trecho. Esta coluna soma as perdas de carga nos sub-trechos;

Coluna J: velocidade em m/s. Calculada para se saber a velocidade média em um determinado trecho;

Coluna K: vazão nos trechos em m³/h. Estes dados foram os fornecidos inicialmente pela ENCO-TAJAL;

Coluna L: custo unitário em Cr\$/m. O custo unitário a ser inserido deve ser o que foi fornecido pela ENCO-TAJAL inicialmente (tabela 4.9);

Coluna M: custo total do trecho em Cr\$. Este valor é igual ao custo unitário do tubo do diâmetro utilizado vezes o comprimento do trecho;

Coluna M (linha 84): custo total da rede em Cr\$. Esta célula compreende a soma do custo de todos os trechos.

Acrescenta-se a esta planilha uma tabela com quatro colunas que são adicionadas às restrições (I, J, K, L). Estas colunas se referem ao trecho (I93 a I132), L2 que é a soma dos sub-trechos (J93 a J132), L1 que é o valor dos comprimentos dos trechos (K93 a K132) e L1-L2 que é a coluna referente a diferença entre L1 e L2 (L93 a L132), esta última coluna é tida como restrição e os valores de suas células devem ser iguais a zero.

- Segunda Parte da Planilha:

Coluna B: número de nós;

Coluna C: altura piezométrica do nó em mca. Este valor é calculado pela diferença entre a altura piezométrica a montante e a perda de carga do trecho a montante (C139 a C177);

Coluna D: cota topográfica do nó em metros;

Coluna E: pressão disponível no nó em mca. O seu cálculo corresponde à diferença entre a altura piezométrica e a cota do terreno do nó;

Coluna F: número anual de horas de bombeamento;

Coluna G: custo do kwh;

Coluna H: rendimento do conjunto motor-bomba;

Coluna I: potência do conjunto motor-bomba;

Coluna J: custo anual com energia. Este valor é encontrado após se multiplicarem o custo do kwh vezes número anual de horas bombeadas vezes a potência do conjunto motor-bomba;

Coluna K: coeficiente de atualização;

Coluna L: custo atualizado da energia. Valor calculado multiplicando-se o coeficiente de atualização vezes o custo anual com energia;

Coluna M: custo total do projeto. Esta célula é a que será minimizada na simulação através da ferramenta Solver.

Após se inserir na planilha os dados iniciais se utiliza a ferramenta Solver para o início da simulação. O preenchimento da caixa de parâmetros do Solver se processou conforme a figura 4.10.

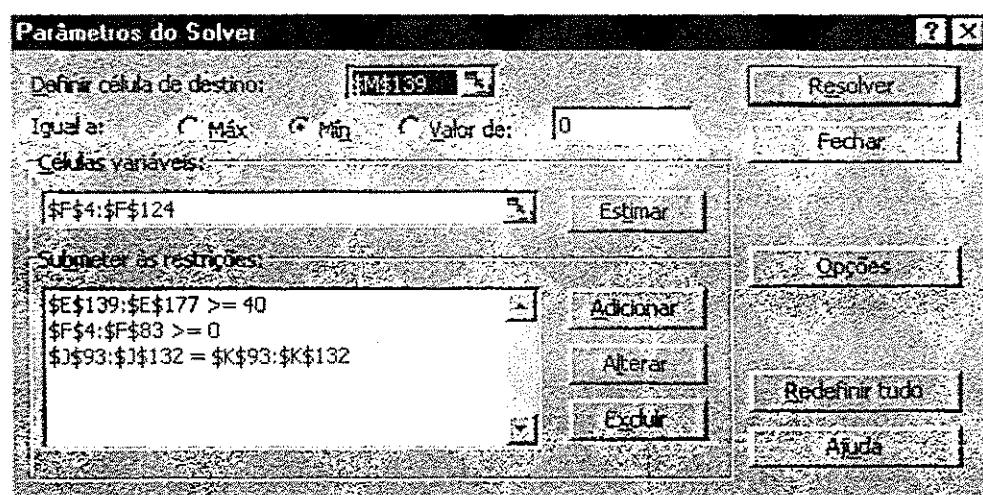


Figura 4.10: Caixa de Parâmetros do Solver simulando o redimensionamento da rede na etapa 2 (ENCO-TAJAL).

Após o uso da ferramenta Solver obteve-se os resultados estão mostrados na tabela 4.14:

Tabela 4.14: Resultado obtido através do Método PNL2000 com os dados do projeto original da ENCO-TAJAL na Etapa 2:

| Primeira Parte da Planilha | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------|-------------|---------------|-------|----------|--------------|------------------|---------------------|------------|--------------|---------------------|----------------|--------------|--|--|
| A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | | |
| Trecho | Vazão (l/s) | Diâmetro (mm) | Coef. | Comp (m) | Perdas (mca) | Perdas maj. -15% | Perdas Totais (mca) | Vel. (m/s) | Vazão (m3/h) | Preço Unit. (C\$/m) | C. Total (C\$) | | | |
| 4 | 1 | 9.72 | 100 | 140 | 0 | 0.00 | 0.00 | 1.52 | 1.24 | 35 | 936.00 | - | | |
| 5 | | 9.72 | 125 | 140 | 250 | 1.33 | 1.52 | 0.79 | 0.79 | 35 | 1.287.00 | 321.750.00 | | |
| 6 | 2 | 19.44 | 150 | 140 | 310 | 2.44 | 2.61 | 2.61 | 1.10 | 70 | 1.579.50 | 489.645.00 | | |
| 7 | | 19.44 | 200 | 140 | 0 | 0.00 | 0.00 | 0.62 | 0.62 | 70 | 2.385.00 | - | | |
| 8 | 3 | 29.17 | 150 | 140 | 75 | 1.25 | 1.44 | 1.64 | 1.65 | 105 | 1.579.50 | 118.462.50 | | |
| 9 | | 29.17 | 200 | 140 | 85 | 0.35 | 0.40 | 0.93 | 0.93 | 105 | 2.385.00 | 202.725.00 | | |
| 10 | 4 | 9.72 | 100 | 140 | 70 | 1.10 | 1.27 | 1.27 | 1.24 | 35 | 936.00 | 65.520.00 | | |
| 11 | | 9.72 | 125 | 140 | 0 | 0.00 | 0.00 | 0.79 | 0.79 | 35 | 1.287.00 | - | | |
| 12 | 5 | 38.89 | 150 | 140 | 0 | 0.00 | 0.00 | 1.77 | 2.20 | 140 | 1.579.50 | - | | |
| 13 | | 38.89 | 200 | 140 | 220 | 1.54 | 1.77 | 1.24 | 1.40 | 140 | 2.385.00 | 524.700.00 | | |
| 14 | 6 | 19.44 | 125 | 140 | 170 | 3.25 | 3.74 | 5.01 | 1.59 | 70 | 1.287.00 | 218.790.00 | | |
| 15 | | 19.44 | 150 | 140 | 140 | 1.10 | 1.27 | 1.10 | 1.10 | 70 | 1.579.50 | 221.130.00 | | |
| 16 | 7 | 77.78 | 200 | 140 | 0 | 0.00 | 0.00 | 2.94 | 2.48 | 280 | 2.385.00 | - | | |
| 17 | | 77.78 | 250 | 140 | 300 | 2.56 | 2.94 | 1.59 | 1.59 | 260 | 3.193.50 | 938.050.00 | | |
| 18 | 8 | 9.72 | 100 | 140 | 320 | 5.03 | 5.79 | 5.79 | 1.24 | 35 | 936.00 | 299.520.00 | | |
| 19 | | 9.72 | 125 | 140 | 0 | 0.00 | 0.00 | 0.79 | 0.79 | 35 | 1.287.00 | - | | |
| 20 | 9 | 19.44 | 125 | 140 | 0 | 0.00 | 0.00 | 1.99 | 1.59 | 70 | 1.287.00 | - | | |
| 21 | | 19.44 | 150 | 140 | 220 | 1.73 | 1.99 | 1.10 | 1.10 | 70 | 1.579.50 | 347.490.00 | | |
| 22 | 10 | 113.89 | 250 | 140 | 0 | 0.00 | 0.00 | 1.72 | 2.32 | 410 | 3.193.50 | - | | |
| 23 | | 113.89 | 300 | 140 | 210 | 1.49 | 1.72 | 1.61 | 1.61 | 410 | 4.114.50 | 864.045.00 | | |
| 24 | 11 | 9.72 | 100 | 140 | 95 | 1.49 | 1.72 | 3.09 | 1.24 | 35 | 936.00 | 68.920.00 | | |
| 25 | | 9.72 | 125 | 140 | 225 | 1.19 | 1.37 | 0.79 | 0.79 | 35 | 1.287.00 | 289.575.00 | | |
| 26 | 12 | 29.17 | 125 | 140 | 0 | 0.00 | 0.00 | 4.22 | 2.38 | 105 | 1.287.00 | - | | |
| 27 | | 29.17 | 150 | 140 | 220 | 3.67 | 4.22 | 1.65 | 1.65 | 105 | 1.579.50 | 347.490.00 | | |
| 28 | 13 | 9.72 | 100 | 140 | 320 | 5.03 | 5.79 | 5.79 | 1.24 | 35 | 936.00 | 299.520.00 | | |
| 29 | | 9.72 | 125 | 140 | 0 | 0.00 | 0.00 | 0.79 | 0.79 | 35 | 1.287.00 | - | | |
| 30 | 14 | 19.44 | 125 | 140 | 40 | 0.77 | 0.88 | 3.33 | 1.59 | 70 | 1.287.00 | 51.480.00 | | |
| 31 | | 19.44 | 150 | 140 | 270 | 2.13 | 2.45 | 1.10 | 1.10 | 70 | 1.579.50 | 426.465.00 | | |
| 32 | 15 | 9.72 | 100 | 140 | 240 | 3.77 | 4.34 | 4.70 | 1.24 | 35 | 726.00 | 174.240.00 | | |
| 33 | | 9.72 | 125 | 140 | 60 | 0.32 | 0.37 | 0.79 | 0.79 | 35 | 997.50 | 59.850.00 | | |
| 34 | 16 | 77.78 | 200 | 140 | 0 | 0.00 | 0.00 | 0.39 | 2.48 | 280 | 1.945.50 | - | | |
| 35 | | 77.78 | 250 | 140 | 40 | 0.34 | 0.39 | 1.59 | 1.59 | 290 | 2.580.00 | 103.200.00 | | |
| 36 | 17 | 190.28 | 300 | 140 | 0 | 0.00 | 0.00 | 2.30 | 2.69 | 655 | 3.262.00 | - | | |
| 37 | | 190.28 | 350 | 140 | 230 | 2.00 | 2.30 | 1.98 | 1.98 | 655 | 4.261.50 | 950.145.00 | | |
| 38 | 18 | 19.44 | 100 | 140 | 53 | 3.01 | 3.46 | 9.12 | 2.48 | 70 | 936.00 | 43.608.00 | | |
| 39 | | 19.44 | 125 | 140 | 257 | 4.82 | 5.66 | 1.59 | 1.59 | 70 | 1.287.00 | 330.759.00 | | |
| 40 | 19 | 227.78 | 350 | 140 | 0 | 0.00 | 0.00 | 3.20 | 2.37 | 820 | 4.261.50 | - | | |
| 41 | | 227.78 | 400 | 140 | 440 | 2.78 | 3.20 | 1.81 | 1.81 | 820 | 5.497.50 | 2.416.900.00 | | |
| 42 | 20 | 19.44 | 125 | 140 | 0 | 0.00 | 0.00 | 2.81 | 1.59 | 70 | 1.287.00 | - | | |
| 43 | | 19.44 | 150 | 140 | 310 | 2.44 | 2.81 | 1.10 | 1.10 | 70 | 1.579.50 | 489.645.00 | | |
| 44 | 21 | 38.89 | 150 | 140 | 230 | 6.54 | 7.52 | 8.09 | 2.20 | 140 | 1.579.50 | 363.285.00 | | |
| 45 | | 38.89 | 200 | 140 | 70 | 0.49 | 0.56 | 1.24 | 1.24 | 140 | 2.385.00 | 166.950.00 | | |
| 46 | 22 | 270.83 | 350 | 140 | 0 | 0.00 | 0.00 | 5.31 | 2.82 | 975 | 4.261.50 | - | | |
| 47 | | 270.83 | 400 | 140 | 530 | 4.62 | 5.31 | 2.16 | 2.16 | 975 | 5.497.50 | 2.913.675.00 | | |
| 48 | 23 | 9.72 | 100 | 140 | 230 | 3.62 | 4.16 | 4.16 | 1.24 | 35 | 726.00 | 166.950.00 | | |
| 49 | | 9.72 | 125 | 140 | 0 | 0.00 | 0.00 | 0.79 | 0.79 | 35 | 997.50 | - | | |
| 50 | 24 | 288.89 | 400 | 140 | 450 | 4.42 | 5.08 | 5.08 | 2.30 | 1040 | 5.497.50 | 2.473.875.00 | | |
| 51 | | 288.89 | 450 | 140 | 0 | 0.00 | 0.00 | 1.82 | 1.82 | 1040 | 7.152.00 | - | | |
| 52 | 25 | 9.72 | 100 | 140 | 0 | 0.00 | 0.00 | 0.85 | 1.24 | 35 | 997.50 | - | | |
| 53 | | 9.72 | 125 | 140 | 140 | 0.74 | 0.85 | 0.79 | 0.79 | 35 | 1.371.00 | 191.940.00 | | |
| 54 | 26 | 19.44 | 125 | 140 | 0 | 0.00 | 0.00 | 3.08 | 1.59 | 70 | 997.50 | - | | |
| 55 | | 19.44 | 150 | 140 | 340 | 2.68 | 3.08 | 1.10 | 1.10 | 70 | 1.371.00 | 466.140.00 | | |
| 56 | 27 | 19.44 | 125 | 140 | 242 | 4.63 | 5.33 | 6.03 | 1.59 | 70 | 997.50 | 241.395.00 | | |
| 57 | | 19.44 | 150 | 140 | 78 | 0.61 | 0.71 | 1.10 | 1.10 | 70 | 1.371.00 | 106.938.00 | | |
| 58 | 28 | 58.33 | 200 | 140 | 0 | 0.00 | 0.00 | 2.53 | 1.86 | 210 | 1.945.50 | - | | |
| 59 | | 58.33 | 250 | 140 | 440 | 2.20 | 2.53 | 1.19 | 1.19 | 210 | 2.580.00 | 1.135.200.00 | | |
| 60 | 29 | 19.44 | 100 | 140 | 66 | 3.75 | 4.31 | 9.68 | 2.48 | 70 | 726.00 | 47.916.00 | | |
| 61 | | 19.44 | 125 | 140 | 244 | 4.67 | 5.37 | 1.59 | 1.59 | 70 | 997.50 | 243.390.00 | | |
| 62 | 30 | 97.22 | 250 | 140 | 182 | 2.35 | 2.70 | 3.48 | 1.98 | 350 | 2.580.00 | 469.560.00 | | |
| 63 | | 97.22 | 300 | 140 | 128 | 0.68 | 0.78 | 1.38 | 1.38 | 350 | 3.282.00 | 420.096.00 | | |
| 64 | 31 | 9.72 | 100 | 140 | 300 | 4.72 | 5.42 | 5.42 | 1.24 | 35 | 936.00 | 280.800.00 | | |
| 65 | | 9.72 | 125 | 140 | 0 | 0.00 | 0.00 | 0.79 | 0.79 | 35 | 1.287.00 | - | | |
| 66 | 32 | 9.72 | 100 | 140 | 280 | 4.40 | 5.06 | 5.06 | 1.24 | 35 | 936.00 | 262.080.00 | | |
| 67 | | 9.72 | 125 | 140 | 0 | 0.00 | 0.00 | 0.79 | 0.79 | 35 | 1.287.00 | - | | |
| 68 | 33 | 19.44 | 125 | 140 | 0 | 0.00 | 0.00 | 2.81 | 1.59 | 70 | 997.50 | - | | |
| 69 | | 19.44 | 150 | 140 | 310 | 2.44 | 2.81 | 1.10 | 1.10 | 70 | 1.371.00 | 426.010.00 | | |
| 70 | 34 | 29.17 | 150 | 140 | 210 | 3.51 | 4.03 | 4.03 | 1.65 | 105 | 1.371.00 | 287.910.00 | | |
| 71 | | 29.17 | 200 | 140 | 0 | 0.00 | 0.00 | 0.93 | 0.93 | 105 | 1.945.50 | - | | |

Continuação da tabela 4.14:

| | | | | | | | | | | | | |
|-----|--------------------|--------|-----|-----|--------|------|------|------|------|------|----------|------------|
| 72 | 35 | 38,89 | 150 | 140 | 0 | 0,00 | 0,00 | 2,74 | 2,20 | 140 | 1,371,00 | - |
| 73 | | 38,89 | 200 | 140 | 340 | 2,38 | 2,74 | | 1,24 | 140 | 1,945,50 | 661,470,00 |
| 74 | 36 | 9,72 | 100 | 140 | 310 | 4,87 | 5,60 | 5,60 | 1,24 | 35 | 726,00 | 225,060,00 |
| 75 | | 9,72 | 125 | 140 | 0 | 0,00 | 0,00 | | 0,79 | 35 | 997,50 | - |
| 76 | 37 | 19,44 | 100 | 140 | 82 | 4,65 | 5,35 | 6,63 | 2,48 | 70 | 726,00 | 59,532,00 |
| 77 | | 19,44 | 125 | 140 | 58 | 1,11 | 1,28 | | 1,59 | 70 | 997,50 | 57,855,00 |
| 78 | 38 | 58,33 | 150 | 140 | 0 | 0,00 | 0,00 | 1,20 | 3,30 | 210 | 1,371,00 | - |
| 79 | | 58,33 | 200 | 140 | 70 | 1,04 | 1,20 | | 1,86 | 210 | 1,945,50 | 136,185,00 |
| 80 | 39 | 152,78 | 300 | 140 | 110 | 1,35 | 1,55 | 1,55 | 2,16 | 550 | 3,282,00 | 361,020,00 |
| 81 | | 152,78 | 350 | 140 | 0 | 0,00 | 0,00 | | 1,59 | 550 | 4,261,50 | - |
| 82 | 40 | 420,83 | 450 | 140 | 0 | 0,00 | 0,00 | 0,08 | 2,65 | 1515 | 7,152,00 | - |
| 83 | | 420,83 | 500 | 140 | 10 | 0,07 | 0,08 | | 2,14 | 1515 | 8,386,50 | 83,865,00 |
| 84 | Altura Man. | 53,79 | | | 9,72 | | | | | | | |
| 85 | Piez. de cam. (m) | 454,99 | | | 19,44 | | | | | | | |
| 86 | | | | | 29,17 | | | | | | | |
| 87 | | | | | 9,72 | | | | | | | |
| 88 | | | | | 38,89 | | | | | | | |
| 89 | | | | | 19,44 | | | | | | | |
| 90 | | | | | 77,78 | | | | | | | |
| 91 | | | | | 9,72 | | | | | | | |
| 92 | | | | | 19,44 | | | | | | | |
| 93 | | | | | 113,89 | | | | | | | |
| 94 | | | | | 9,72 | | | | | | | |
| 95 | | | | | 29,17 | | | | | | | |
| 96 | | | | | 9,72 | | | | | | | |
| 97 | | | | | 19,44 | | | | | | | |
| 98 | | | | | 9,72 | | | | | | | |
| 99 | | | | | 77,78 | | | | | | | |
| 100 | | | | | 190,28 | | | | | | | |
| 101 | | | | | 19,44 | | | | | | | |
| 102 | | | | | 227,78 | | | | | | | |
| 103 | | | | | 19,44 | | | | | | | |
| 104 | | | | | 38,89 | | | | | | | |
| 105 | | | | | 270,83 | | | | | | | |
| 106 | | | | | 9,72 | | | | | | | |
| 107 | | | | | 288,89 | | | | | | | |
| 108 | | | | | 9,72 | | | | | | | |
| 109 | | | | | 19,44 | | | | | | | |
| 110 | | | | | 19,44 | | | | | | | |
| 111 | | | | | 58,33 | | | | | | | |
| 112 | | | | | 19,44 | | | | | | | |
| 113 | | | | | 97,22 | | | | | | | |
| 114 | | | | | 9,72 | | | | | | | |
| 115 | | | | | 9,72 | | | | | | | |
| 116 | | | | | 19,44 | | | | | | | |
| 117 | | | | | 29,17 | | | | | | | |
| 118 | | | | | 38,89 | | | | | | | |
| 119 | | | | | 9,72 | | | | | | | |
| 120 | | | | | 19,44 | | | | | | | |
| 121 | | | | | 58,33 | | | | | | | |
| 122 | | | | | 152,78 | | | | | | | |
| 123 | | | | | 420,83 | | | | | | | |
| 124 | Altura manométrica | 53,79 | | | 53,79 | | | | | | | |
| 125 | | | | | | | | | | | | |
| 126 | | | | | | | | | | | | |
| 127 | | | | | | | | | | | | |
| 128 | | | | | | | | | | | | |
| 129 | | | | | | | | | | | | |
| 130 | | | | | | | | | | | | |
| 131 | | | | | | | | | | | | |
| 132 | | | | | | | | | | | | |
| 133 | | | | | | | | | | | | |
| 134 | | | | | | | | | | | | |

Custo da Rede (Cr\$) 22.989.751,50

| Trecho | L2 (m) | L1 (m) | L1-L2 (m) |
|--------|--------|--------|-----------|
| 1 | 250 | 250 | 0 |
| 2 | 310 | 310 | 0 |
| 3 | 160 | 160 | 0 |
| 4 | 70 | 70 | 0 |
| 5 | 220 | 220 | 0 |
| 6 | 310 | 310 | 0 |
| 7 | 300 | 300 | 0 |
| 8 | 320 | 320 | 0 |
| 9 | 220 | 220 | 0 |
| 10 | 210 | 210 | 0 |
| 11 | 320 | 320 | 0 |
| 12 | 220 | 220 | 0 |
| 13 | 320 | 320 | 0 |
| 14 | 310 | 310 | 0 |
| 15 | 300 | 300 | 0 |
| 16 | 40 | 40 | 0 |
| 17 | 230 | 230 | 0 |
| 18 | 310 | 310 | 0 |
| 19 | 440 | 440 | 0 |
| 20 | 310 | 310 | 0 |
| 21 | 300 | 300 | 0 |
| 22 | 530 | 530 | 0 |
| 23 | 230 | 230 | 0 |
| 24 | 450 | 450 | 0 |
| 25 | 140 | 140 | 0 |
| 26 | 340 | 340 | 0 |
| 27 | 320 | 320 | 0 |
| 28 | 440 | 440 | 0 |
| 29 | 310 | 310 | 0 |
| 30 | 310 | 310 | 0 |
| 31 | 300 | 300 | 0 |
| 32 | 280 | 280 | 0 |
| 33 | 310 | 310 | 0 |
| 34 | 210 | 210 | 0 |
| 35 | 340 | 340 | 0 |
| 36 | 310 | 310 | 0 |
| 37 | 140 | 140 | 0 |
| 38 | 70 | 70 | 0 |
| 39 | 110 | 110 | 0 |
| 40 | 10 | 10 | 0 |

Continuação da tabela 4.14:

135

136 Segunda Parte da Planilha

| 137 | Nº | Alt. Piez (m) | Cota (m) | P. Disp. (mca) | Nº de horas | | Rend. do bomb (%) | Pot. Requer (Kw) | C energia (OS) | Coef. Atual (Fa) | C energia atual (OS) | C total (OS) |
|-----|----|------------------|-------------|-------------------|-------------|-------|----------------------|---------------------|-------------------|---------------------|-------------------------|--------------------------|
| | | | | | Anual | (R\$) | | | | | | |
| 138 | 1 | 454,92 | 401,20 | 53,72 | 5000 | 0,310 | 80 | 277,60 | 430.253,32 | 30,6 | 13.165.659,64 | 36.185.211,14 |
| 140 | 2 | 453,37 | 402,40 | 50,97 | | | | | | | | |
| 141 | 3 | 452,17 | 401,30 | 50,87 | | | | | | | | |
| 142 | 4 | 445,54 | 400,50 | 45,04 | | | | | | | | |
| 143 | 5 | 439,94 | 399,90 | 40,04 | | | | | | | | |
| 144 | 6 | 449,43 | 399,00 | 50,43 | | | | | | | | |
| 145 | 7 | 445,40 | 397,70 | 47,70 | | | | | | | | |
| 146 | 8 | 442,59 | 394,90 | 47,69 | | | | | | | | |
| 147 | 9 | 437,53 | 392,10 | 45,43 | | | | | | | | |
| 148 | 10 | 432,11 | 392,10 | 40,01 | | | | | | | | |
| 149 | 11 | 449,89 | 402,40 | 47,49 | | | | | | | | |
| 150 | 12 | 440,21 | 400,20 | 40,01 | | | | | | | | |
| 151 | 13 | 447,35 | 403,20 | 44,15 | | | | | | | | |
| 152 | 14 | 441,32 | 401,30 | 40,02 | | | | | | | | |
| 153 | 15 | 444,27 | 403,30 | 40,97 | | | | | | | | |
| 154 | 16 | 443,42 | 403,40 | 40,02 | | | | | | | | |
| 155 | 17 | 449,83 | 396,20 | 53,63 | | | | | | | | |
| 156 | 18 | 445,67 | 395,10 | 50,57 | | | | | | | | |
| 157 | 19 | 444,52 | 393,40 | 51,12 | | | | | | | | |
| 158 | 20 | 435,43 | 393,50 | 42,93 | | | | | | | | |
| 159 | 21 | 433,62 | 393,60 | 40,02 | | | | | | | | |
| 160 | 22 | 441,32 | 393,70 | 47,62 | | | | | | | | |
| 161 | 23 | 432,20 | 392,20 | 40,00 | | | | | | | | |
| 162 | 24 | 439,63 | 393,30 | 45,33 | | | | | | | | |
| 163 | 25 | 433,92 | 393,90 | 40,02 | | | | | | | | |
| 164 | 26 | 435,30 | 391,40 | 43,90 | | | | | | | | |
| 165 | 27 | 429,51 | 399,50 | 40,01 | | | | | | | | |
| 166 | 28 | 434,40 | 399,00 | 41,40 | | | | | | | | |
| 167 | 29 | 431,31 | 391,30 | 40,01 | | | | | | | | |
| 168 | 30 | 437,30 | 393,60 | 43,70 | | | | | | | | |
| 169 | 31 | 434,35 | 391,90 | 42,46 | | | | | | | | |
| 170 | 32 | 429,35 | 399,30 | 40,05 | | | | | | | | |
| 171 | 33 | 432,59 | 390,60 | 41,98 | | | | | | | | |
| 172 | 34 | 431,32 | 391,00 | 40,32 | | | | | | | | |
| 173 | 35 | 430,74 | 399,50 | 41,24 | | | | | | | | |
| 174 | 36 | 427,93 | 397,90 | 40,03 | | | | | | | | |
| 175 | 37 | 425,41 | 396,40 | 40,01 | | | | | | | | |
| 176 | 38 | 435,31 | 391,50 | 43,81 | | | | | | | | |
| 177 | 39 | 429,52 | 399,50 | 40,02 | | | | | | | | |

Custo a ser Minimizado

Diâmetro Classe 15

Diâmetro Classe 20

A simulação referente ao cenário 1 obteve resultados melhores comparados aos fornecidos pela ENCO-TAJAL e GOMES, considerando-se os mesmos preços das tubulações e suas respectivas classes e o custo energético. A tabela 4.15 mostra os valores encontrados através do método PNL2000 (cenário 1) comparados a GOMES e ENCO-TAJAL.

Tabela 4.15: Comparação entre ENCO-TAJAL x GOMES x CENÁRIO 1.

| | Custo Energético (Cr\$) | Custo da Rede (Cr\$) | Custo Total (Cr\$) |
|------------|-------------------------|----------------------|--------------------|
| ENCO-TAJAL | 13.466.323,00 | 25.058.946,00 | 38.525.269,00 |
| GOMES | 13.465.211,00 | 23.429.820,00 | 36.895.031,00 |
| CENÁRIO 1 | 13.166.669,64 | 22.989.751,50 | 36.156.421,14 |

Ao se comparar o custo energético da obra, que varia conforme sua altura manométrica de bombeamento, temos que o *cenário 1*, que é o resultado obtido através do método PNL2000 é 2,27% menor que o resultado fornecido pela ENCO-TAJAL e 2,26% menor que o resultado fornecido através do método Granados (GOMES). O custo da rede, que é o custo da tubulação somado à sua implantação, tem um resultado no *cenário 1* 9% menor do que o fornecido pela ENCO-TAJAL e 1,91% menor que GOMES. No custo total da obra, que é a soma do custo energético com o custo da rede, os resultados através do método PNL2000 é 6,65% menor que o total fornecido pela ENCO-TAJAL e 2,04% menor que o custo ótimo encontrado através do método Granados (GOMES).

Ao se considerar os valores obtidos temos que em um eventual redimensionamento do perímetro irrigado, com os mesmos dados da ENCO-TAJAL, como demonstrado na simulação *cenário 1*, o método PNL2000 forneceria o menor valor a ser investido na obra, tendo como suporte os resultados eficazes obtidos.

4.1.2.3. Resultados através do método PNL2000 com dados de GOMES* – CENÁRIO 2

Os resultados obtidos no *cenário 1* foram calculados com os dados iniciais fornecidos pela ENCO-TAJAL, com vazão parcelar de 35 m³/h e pressão disponível nos nós iguais ou superiores a 40 m.c.a. O *cenário 2* trabalha com as novas determinações de necessidade hídrica do perímetro irrigado, já que as fornecidas pela ENCO-TAJAL e simuladas no *cenário 1*, encontram-se sub-dimensionadas.

Através de cálculos que consideram o balanço hídrico, GOMES* (1997) calculou novos valores, tendo como vazão parcelar 58,8 m³/h e pressão disponível nas entradas das parcelas iguais ou superiores a 50 m.c.a, de acordo com a tabela 4.9 (parte em negrito) e o número de horas de bombeamento anual passa de 5000 (*cenário 1*) para 3600 horas (dados utilizados por GOMES (1997) na simulação GOMES* com o método Granados). O restante dos dados como preço das tubulações, o rendimento do conjunto motor-bomba e a

vida útil da obra também são os mesmos da simulação anterior. Portanto, tem-se que a vazão fornecida ao perímetro irrigado, que no cenário 1 é de 1.515 m³/h passa a ter no cenário 2 uma vazão de 2.528,4 m³/h.

A metodologia utilizada é a mesma que no cenário anterior, dividida em duas etapas. A tabela 4.16 apresenta a planilha com os dados iniciais para simulação com os dados de GOMES (1997).

Tabela 4.16: Planilha inicial do Perímetro Irrigado Senador Nilo Coelho com dados de GOMES (1997) sem o uso da ferramenta Solver:

| A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | |
|----------------------------|-------------------|---------------|-------|-----------|--------------|----------------|----------|------------|---------------------------|----------------------|----------------------|--------------|---------------|
| Primeira Parte da Planilha | | | | | | | | | | | | | |
| Trecho | Vazão (l/s) | Diâmetro (mm) | Coef. | Comp. (m) | Perdas (mca) | Perda maj. 15% | Cota (m) | Vel. (m/s) | Vazão (m ³ /h) | Preço Unit. (Cr\$/m) | C. Total (Cr\$) | | |
| 4 | 1 | 16,33 | 150 | 140 | 250 | 1,43 | 1,64 | 396,40 | 0,92 | 58,8 | 1.902,16 | 475.539,13 | |
| 5 | 2 | 32,67 | 200 | 140 | 310 | 1,57 | 1,81 | 387,90 | 1,04 | 117,6 | 2.976,38 | 922.677,86 | |
| 6 | 3 | 49,00 | 200 | 140 | 180 | 1,72 | 1,98 | 399,50 | 1,56 | 176,4 | 2.976,38 | 476.220,83 | |
| 7 | 4 | 16,33 | 125 | 140 | 70 | 0,97 | 1,12 | 391,00 | 1,33 | 58,8 | 1.432,24 | 100.256,96 | |
| 8 | 5 | 65,33 | 250 | 140 | 220 | 1,36 | 1,56 | 390,60 | 1,33 | 235,2 | 3.468,36 | 763.040,01 | |
| 9 | 6 | 44,92 | 200 | 140 | 310 | 2,84 | 3,26 | 399,30 | 1,43 | 161,7 | 2.976,38 | 922.677,86 | |
| 10 | 7 | 142,92 | 300 | 140 | 300 | 3,25 | 3,74 | 391,90 | 2,02 | 514,5 | 4.563,61 | 1.369.052,11 | |
| 11 | 8 | 16,33 | 150 | 140 | 320 | 1,83 | 2,10 | 399,50 | 0,92 | 58,8 | 1.902,16 | 606.690,09 | |
| 12 | 9 | 32,67 | 150 | 140 | 220 | 4,53 | 5,21 | 391,50 | 1,85 | 117,6 | 1.607,67 | 353.688,20 | |
| 13 | 10 | 166,61 | 350 | 140 | 210 | 1,43 | 1,64 | 393,60 | 1,73 | 599,8 | 4.471,46 | 939.005,64 | |
| 14 | 11 | 24,50 | 125 | 140 | 320 | 9,40 | 10,81 | 391,30 | 2,00 | 88,2 | 1.221,84 | 390.988,75 | |
| 15 | 12 | 65,33 | 250 | 140 | 220 | 1,36 | 1,56 | 393,00 | 1,33 | 235,2 | 3.468,36 | 763.040,01 | |
| 16 | 13 | 16,33 | 150 | 140 | 320 | 1,83 | 2,10 | 399,50 | 0,92 | 58,8 | 1.902,16 | 606.690,09 | |
| 17 | 14 | 32,67 | 150 | 140 | 310 | 6,38 | 7,34 | 391,40 | 1,85 | 117,6 | 1.607,67 | 498.378,83 | |
| 18 | 15 | 16,33 | 125 | 140 | 300 | 4,16 | 4,78 | 393,90 | 1,33 | 58,8 | 1.221,84 | 366.551,95 | |
| 19 | 16 | 147,00 | 350 | 140 | 40 | 0,22 | 0,25 | 393,30 | 1,53 | 529,2 | 4.471,46 | 178.858,22 | |
| 20 | 17 | 294,19 | 400 | 140 | 230 | 2,19 | 2,52 | 393,30 | 2,26 | 1023,1 | 5.431,79 | 1.249.312,28 | |
| 21 | 18 | 32,67 | 150 | 140 | 310 | 6,38 | 7,34 | 392,20 | 1,85 | 117,6 | 1.607,67 | 498.378,83 | |
| 22 | 19 | 342,47 | 450 | 140 | 440 | 3,34 | 3,84 | 393,70 | 2,15 | 1232,9 | 6.448,70 | 2.837.429,47 | |
| 23 | 20 | 32,67 | 150 | 140 | 310 | 6,38 | 7,34 | 393,60 | 1,85 | 117,6 | 1.607,67 | 498.378,83 | |
| 24 | 21 | 68,06 | 250 | 140 | 300 | 2,00 | 2,30 | 393,50 | 1,39 | 245 | 3.468,36 | 1.040.509,10 | |
| 25 | 22 | 423,03 | 500 | 140 | 530 | 3,55 | 4,09 | 393,40 | 2,16 | 1522,9 | 7.518,67 | 3.984.895,45 | |
| 26 | 23 | 16,33 | 125 | 140 | 230 | 3,19 | 3,67 | 395,10 | 1,33 | 58,8 | 1.221,84 | 281.023,16 | |
| 27 | 24 | 449,17 | 500 | 140 | 450 | 3,38 | 3,88 | 396,20 | 2,29 | 1617 | 7.518,67 | 3.383.401,80 | |
| 28 | 25 | 16,33 | 150 | 140 | 140 | 0,80 | 0,92 | 403,40 | 0,92 | 58,8 | 1.607,67 | 225.074,31 | |
| 29 | 26 | 34,03 | 200 | 140 | 340 | 1,66 | 2,14 | 403,30 | 1,08 | 122,5 | 2.478,88 | 842.819,54 | |
| 30 | 27 | 39,47 | 200 | 140 | 320 | 2,30 | 2,65 | 401,30 | 1,26 | 142,1 | 2.478,88 | 793.241,92 | |
| 31 | 28 | 106,17 | 300 | 140 | 440 | 2,75 | 3,16 | 403,20 | 1,50 | 382,2 | 3.571,97 | 1.571.655,47 | |
| 32 | 29 | 39,47 | 200 | 140 | 310 | 2,23 | 2,57 | 400,20 | 1,26 | 142,1 | 2.478,88 | 788.453,11 | |
| 33 | 30 | 144,83 | 350 | 140 | 310 | 1,62 | 1,87 | 402,40 | 1,51 | 521,4 | 4.471,46 | 1.386.151,18 | |
| 34 | 31 | 21,78 | 125 | 140 | 300 | 7,08 | 8,15 | 392,10 | 1,78 | 78,4 | 1.221,84 | 366.551,95 | |
| 35 | 32 | 51,72 | 200 | 140 | 280 | 3,33 | 3,83 | 392,10 | 1,65 | 186,2 | 2.478,88 | 694.086,68 | |
| 36 | 33 | 68,06 | 250 | 140 | 310 | 2,07 | 2,38 | 394,90 | 1,39 | 245 | 3.468,36 | 1.075.192,74 | |
| 37 | 34 | 87,11 | 250 | 140 | 210 | 2,21 | 2,54 | 397,70 | 1,78 | 313,6 | 3.468,36 | 728.368,37 | |
| 38 | 35 | 106,17 | 300 | 140 | 340 | 2,12 | 2,44 | 399,00 | 1,50 | 382,2 | 3.571,97 | 1.214.468,77 | |
| 39 | 36 | 20,42 | 125 | 140 | 310 | 6,50 | 7,47 | 399,90 | 1,66 | 73,5 | 1.221,84 | 378.770,35 | |
| 40 | 37 | 36,75 | 200 | 140 | 140 | 0,88 | 1,02 | 400,50 | 1,17 | 132,3 | 2.478,88 | 347.043,34 | |
| 41 | 38 | 142,92 | 200 | 140 | 70 | 5,46 | 6,28 | 401,30 | 4,55 | 514,5 | 1.978,53 | 138.497,06 | |
| 42 | 39 | 253,17 | 400 | 140 | 110 | 0,85 | 0,97 | 402,40 | 2,02 | 911,4 | 5.431,79 | 597.497,18 | |
| 43 | 40 | 702,33 | 700 | 140 | 10 | 0,03 | 0,04 | 401,20 | 1,83 | 2528,4 | 12.275,79 | 122.757,95 | |
| 44 | Altura Man. | | 54 | | | | | | | | Custo da Rede (Cr\$) | | 34.761.343,33 |
| 45 | Piez. de cam. (m) | | 453,2 | | | | | | | | | | |

Continuação da tabela 4.16:

46

47 Segunda Parte da Flanilha

| 48 | Nº | Alt. Piez (m) | Cota (m) | P.Disp. (mca) | Nº de horas Anuais | C. de Kwh (C\$) | Rend. (%) | Pot. Requer. (Kw) | C. energia (C\$) | Coef. Atual (Fa) | C. energia atual (C\$) | C. total (C\$) |
|----|----|------------------|-------------|------------------|-----------------------|--------------------|--------------|----------------------|---------------------|---------------------|---------------------------|-------------------|
| 49 | 1 | 455,16 | 401,20 | 53,96 | 3600 | 0,310 | 80 | 465,07 | 519.015,41 | 30,6 | 15.881.871,66 | 50.643.214,99 |
| 51 | 2 | 454,19 | 402,40 | 51,79 | | | | | | | | |
| 52 | 3 | 447,91 | 401,30 | 46,61 | | | | | | | | |
| 53 | 4 | 446,89 | 400,50 | 46,39 | | | | | | | | |
| 54 | 5 | 439,42 | 399,90 | 39,52 | | | | | | | | |
| 55 | 6 | 445,46 | 399,00 | 46,46 | | | | | | | | |
| 56 | 7 | 442,92 | 397,70 | 45,22 | | | | | | | | |
| 57 | 8 | 440,55 | 394,90 | 45,65 | | | | | | | | |
| 58 | 9 | 436,72 | 392,10 | 44,62 | | | | | | | | |
| 59 | 10 | 428,57 | 392,10 | 36,47 | | | | | | | | |
| 60 | 11 | 452,32 | 402,40 | 49,92 | | | | | | | | |
| 61 | 12 | 449,75 | 400,20 | 49,55 | | | | | | | | |
| 62 | 13 | 449,16 | 403,20 | 46,96 | | | | | | | | |
| 63 | 14 | 446,51 | 401,30 | 45,21 | | | | | | | | |
| 64 | 15 | 447,02 | 403,30 | 43,72 | | | | | | | | |
| 65 | 16 | 446,10 | 403,40 | 42,70 | | | | | | | | |
| 66 | 17 | 451,28 | 396,20 | 55,08 | | | | | | | | |
| 67 | 18 | 447,61 | 395,10 | 52,51 | | | | | | | | |
| 68 | 19 | 447,18 | 393,40 | 53,78 | | | | | | | | |
| 69 | 20 | 444,88 | 393,50 | 51,38 | | | | | | | | |
| 70 | 21 | 437,54 | 393,60 | 43,94 | | | | | | | | |
| 71 | 22 | 443,34 | 393,70 | 49,64 | | | | | | | | |
| 72 | 23 | 436,00 | 392,20 | 43,80 | | | | | | | | |
| 73 | 24 | 440,57 | 393,30 | 47,27 | | | | | | | | |
| 74 | 25 | 436,79 | 393,90 | 41,89 | | | | | | | | |
| 75 | 26 | 433,23 | 391,40 | 41,83 | | | | | | | | |
| 76 | 27 | 431,13 | 389,50 | 41,63 | | | | | | | | |
| 77 | 28 | 439,01 | 393,00 | 46,01 | | | | | | | | |
| 78 | 29 | 428,20 | 391,30 | 36,90 | | | | | | | | |
| 79 | 30 | 439,18 | 393,60 | 45,58 | | | | | | | | |
| 80 | 31 | 436,44 | 391,90 | 43,54 | | | | | | | | |
| 81 | 32 | 432,18 | 399,30 | 42,88 | | | | | | | | |
| 82 | 33 | 433,88 | 390,60 | 43,28 | | | | | | | | |
| 83 | 34 | 432,77 | 391,00 | 41,77 | | | | | | | | |
| 84 | 35 | 431,90 | 389,50 | 42,40 | | | | | | | | |
| 85 | 36 | 430,10 | 397,90 | 42,20 | | | | | | | | |
| 86 | 37 | 428,46 | 386,40 | 42,06 | | | | | | | | |
| 87 | 38 | 433,97 | 391,50 | 42,47 | | | | | | | | |
| 88 | 39 | 431,87 | 389,50 | 42,37 | | | | | | | | |

| | |
|--|--------------------|
| | Dâmetros Classe 15 |
| | Dâmetros Classe 20 |
| | Dâmetros Classe 25 |

4.1.2.3.1. Etapa 1

Como na simulação anterior, a primeira fase na etapa 1 é a definição da Função Objetivo .

$$C(D_i, Q_i, H) = [250 P(D_1) + 310 P(D_2) + \dots + 110 P(D_{39}) + 10 P(D_{40})] + (9.611,40 \times 30,6 \times H)$$

De acordo com os novos dados desta simulação, as Restrições são:

- Pressões mínimas nos nós: as pressões nos nós da rede devem ser iguais ou superiores a 50 mca (E50 a E88);

- b) Diâmetros da rede: os diâmetros da rede devem estar entre 100 mm e 500 mm (D4 a D43).

As Variáveis são os diâmetros da rede e a altura manométrica (D4 a D44). Após definidos todos os parâmetros do Solver tem-se a edição da planilha. A forma de edição é a mesma do cenário anterior.

Após se inserir na planilha os dados iniciais se utiliza a ferramenta Solver para o início da simulação e através de sua caixa de parâmetros inicia-se a simulação, conforme a figura 4.11.

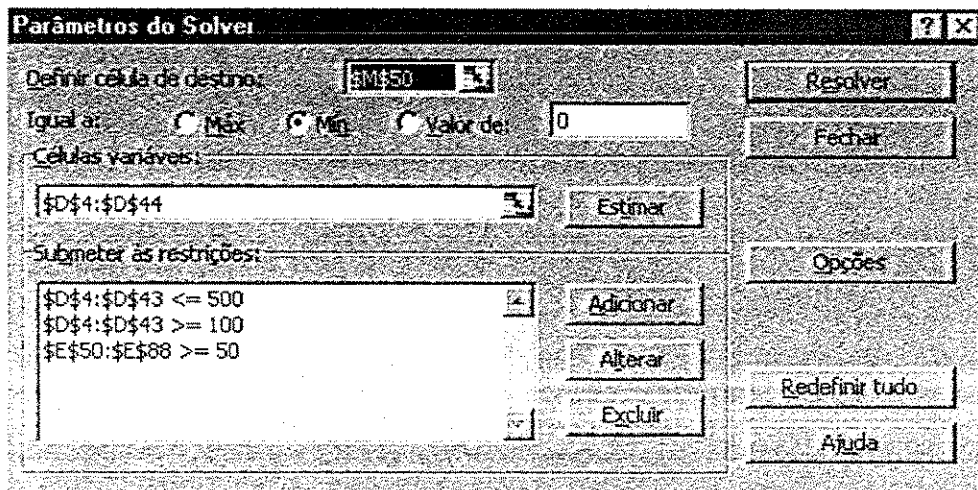


Figura 4.11: Caixa de Parâmetros do Solver simulando o redimensionamento da rede na etapa 1 (GOMES).

Definidos os parâmetros da ferramenta Solver tem-se como resultado a tabela 4.17.

Tabela 4.17: Resultado obtido através do Método PNL2000 com os dados de GOMES (1997) na Etapa I.

| A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | | |
|-----------------------------------|--------------------|---------------|--------|-----------|--------------|----------------|----------|------------|--------------|----------------------|-----------------|----------------------|--|---------------|
| <i>Primeira Parte da Planilha</i> | | | | | | | | | | | | | | |
| Trecho | Vazão (l/s) | Diâmetro (mm) | Coef. | Comp. (m) | Perdas (mca) | Perda maj. 15% | Cota (m) | Vel. (m/s) | Vazão (m³/h) | Preço Unit. (Cr\$/m) | C. Total (Cr\$) | | | |
| 4 | 1 | 16,33 | 141 | 140 | 250 | 1,94 | 2,24 | 386,40 | 1,05 | 58,8 | 1.722,77 | 430.692,92 | | |
| 5 | 2 | 32,67 | 172 | 140 | 310 | 3,28 | 3,77 | 387,90 | 1,41 | 117,6 | 2.352,92 | 729.404,80 | | |
| 6 | 3 | 49,00 | 193 | 140 | 160 | 2,03 | 2,34 | 389,50 | 1,67 | 176,4 | 2.820,88 | 451.340,88 | | |
| 7 | 4 | 16,33 | 100 | 140 | 70 | 2,68 | 3,31 | 391,00 | 2,08 | 58,8 | 1.012,03 | 70.842,43 | | |
| 8 | 5 | 65,33 | 217 | 140 | 220 | 2,69 | 3,10 | 390,60 | 1,76 | 235,2 | 2.807,81 | 617.717,28 | | |
| 9 | 6 | 44,92 | 164 | 140 | 310 | 7,43 | 8,54 | 389,30 | 2,12 | 161,7 | 2.187,90 | 678.250,21 | | |
| 10 | 7 | 142,92 | 268 | 140 | 300 | 3,97 | 4,57 | 391,90 | 2,20 | 514,5 | 4.268,76 | 1.286.627,69 | | |
| 11 | 8 | 16,33 | 117 | 140 | 320 | 6,23 | 7,16 | 389,50 | 1,53 | 58,8 | 1.285,08 | 411.225,15 | | |
| 12 | 9 | 32,67 | 147 | 140 | 220 | 5,00 | 5,75 | 391,50 | 1,93 | 117,6 | 1.559,15 | 343.013,17 | | |
| 13 | 10 | 166,61 | 324 | 140 | 210 | 2,08 | 2,39 | 393,60 | 2,02 | 599,8 | 3.995,79 | 839.115,78 | | |
| 14 | 11 | 24,50 | 140 | 140 | 320 | 5,41 | 6,22 | 391,30 | 1,59 | 88,2 | 1.449,12 | 463.719,05 | | |
| 15 | 12 | 65,33 | 286 | 140 | 220 | 5,69 | 6,54 | 393,00 | 2,40 | 235,2 | 2.228,08 | 490.178,64 | | |
| 16 | 13 | 16,33 | 118 | 140 | 320 | 5,92 | 6,81 | 389,50 | 1,50 | 58,8 | 1.305,89 | 417.883,52 | | |
| 17 | 14 | 32,67 | 148 | 140 | 310 | 6,74 | 7,76 | 391,40 | 1,89 | 117,6 | 1.580,57 | 489.977,19 | | |
| 18 | 15 | 16,33 | 107 | 140 | 300 | 8,84 | 10,17 | 389,90 | 1,82 | 58,8 | 967,78 | 290.335,21 | | |
| 19 | 16 | 147,00 | 280 | 140 | 40 | 0,64 | 0,74 | 383,30 | 2,39 | 529,2 | 3.227,05 | 129.052,09 | | |
| 20 | 17 | 284,19 | 403 | 140 | 230 | 2,11 | 2,42 | 383,30 | 2,23 | 1023,1 | 5.497,31 | 1.264.360,98 | | |
| 21 | 18 | 32,67 | 129 | 140 | 310 | 13,07 | 15,03 | 392,20 | 2,48 | 117,6 | 1.288,40 | 399.402,81 | | |
| 22 | 19 | 342,47 | 430 | 140 | 440 | 4,18 | 4,81 | 393,70 | 2,36 | 1232,9 | 6.029,65 | 2.653.132,44 | | |
| 23 | 20 | 32,67 | 143 | 140 | 310 | 6,87 | 7,90 | 393,60 | 1,91 | 117,6 | 1.571,64 | 467.207,52 | | |
| 24 | 21 | 68,06 | 183 | 140 | 300 | 9,16 | 10,53 | 383,50 | 2,59 | 245 | 2.166,76 | 650.026,29 | | |
| 25 | 22 | 423,03 | 465 | 140 | 530 | 5,06 | 5,82 | 393,40 | 2,49 | 1522,9 | 6.767,65 | 3.586.962,89 | | |
| 26 | 23 | 16,33 | 100 | 140 | 230 | 9,45 | 10,87 | 395,10 | 2,08 | 58,8 | 873,26 | 200.850,61 | | |
| 27 | 24 | 449,17 | 473 | 140 | 450 | 4,41 | 5,07 | 386,20 | 2,55 | 1617 | 6.941,90 | 3.123.854,76 | | |
| 28 | 25 | 16,33 | 105 | 140 | 140 | 1,35 | 1,55 | 403,40 | 1,15 | 58,8 | 1.368,26 | 191.556,36 | | |
| 29 | 26 | 34,03 | 167 | 140 | 340 | 4,46 | 5,13 | 403,30 | 1,55 | 122,5 | 1.891,25 | 643.024,41 | | |
| 30 | 27 | 39,47 | 156 | 140 | 320 | 7,64 | 8,78 | 401,30 | 2,06 | 142,1 | 1.711,82 | 547.781,57 | | |
| 31 | 28 | 106,17 | 258 | 140 | 440 | 5,72 | 6,58 | 403,20 | 2,03 | 382,2 | 2.867,96 | 1.261.913,12 | | |
| 32 | 29 | 39,47 | 137 | 140 | 310 | 14,32 | 16,46 | 400,20 | 2,70 | 142,1 | 1.366,76 | 432.630,31 | | |
| 33 | 30 | 144,83 | 288 | 140 | 310 | 4,17 | 4,80 | 402,40 | 2,22 | 521,4 | 3.372,52 | 1.045.480,03 | | |
| 34 | 31 | 21,78 | 146 | 140 | 300 | 3,37 | 3,88 | 392,10 | 1,31 | 78,4 | 1.536,87 | 461.060,49 | | |
| 35 | 32 | 51,72 | 187 | 140 | 260 | 4,61 | 5,31 | 392,10 | 1,88 | 186,2 | 2.240,47 | 627.332,80 | | |
| 36 | 33 | 68,06 | 203 | 140 | 310 | 5,71 | 6,56 | 394,90 | 2,11 | 245 | 2.533,10 | 786.262,25 | | |
| 37 | 34 | 87,11 | 219 | 140 | 210 | 4,34 | 4,99 | 397,70 | 2,34 | 313,6 | 2.816,30 | 591.423,03 | | |
| 38 | 35 | 106,17 | 240 | 140 | 340 | 6,24 | 7,17 | 399,00 | 2,34 | 382,2 | 2.587,86 | 879.877,60 | | |
| 39 | 36 | 20,42 | 112 | 140 | 310 | 10,96 | 12,60 | 399,90 | 2,06 | 73,5 | 1.039,56 | 322.269,19 | | |
| 40 | 37 | 36,75 | 133 | 140 | 140 | 6,53 | 7,51 | 400,50 | 2,66 | 132,3 | 1.335,74 | 187.003,67 | | |
| 41 | 38 | 142,92 | 270 | 140 | 70 | 1,26 | 1,46 | 401,30 | 2,49 | 514,5 | 3.065,84 | 214.608,75 | | |
| 42 | 39 | 253,17 | 368 | 140 | 110 | 1,27 | 1,46 | 402,40 | 2,38 | 911,4 | 4.810,51 | 529.156,11 | | |
| 43 | 40 | 702,33 | 500 | 140 | 10 | 0,17 | 0,20 | 401,20 | 3,58 | 2528,4 | 7.518,67 | 75.186,71 | | |
| 44 | Altura Men | | 71,92 | | | | | | | | | Custo da Rede (Cr\$) | | 29.300.860,92 |
| 45 | Piez de cam. (mca) | | 473,12 | | | | | | | | | | | |

Continuação da tabela 4.17:

46

47 Segunda Parte da planilha

| 48 | N6 | Alt. Piz (m) | Octa (m) | P.Disp (mca) | Nº de horas Anuais | C do Kw (C\$) | Rend (%) | Pot. Requer. (Kw) | Canal energia (C\$) | Coef. Atual (Fa) | C energia atual (C\$) | C total (C\$) |
|----|----|-----------------|-------------|-----------------|-----------------------|------------------|-------------|----------------------|------------------------|---------------------|--------------------------|------------------|
| 49 | 1 | 472,92 | 401,20 | 71,72 | 3600 | 0,310 | 80 | 619,40 | 691.250,31 | 30,6 | 21.152.259,57 | 50.453.110,49 |
| 50 | 2 | 471,46 | 402,40 | 69,06 | | | | | | | | |
| 51 | 3 | 470,01 | 401,30 | 68,71 | | | | | | | | |
| 52 | 4 | 462,50 | 400,50 | 62,00 | | | | | | | | |
| 53 | 5 | 449,90 | 399,90 | 50,00 | | | | | | | | |
| 54 | 6 | 462,84 | 399,00 | 63,84 | | | | | | | | |
| 55 | 7 | 457,85 | 397,70 | 60,15 | | | | | | | | |
| 56 | 8 | 451,28 | 394,90 | 56,38 | | | | | | | | |
| 57 | 9 | 445,98 | 392,10 | 53,88 | | | | | | | | |
| 58 | 10 | 442,10 | 392,10 | 50,00 | | | | | | | | |
| 59 | 11 | 466,66 | 402,40 | 64,26 | | | | | | | | |
| 60 | 12 | 450,20 | 400,20 | 50,00 | | | | | | | | |
| 61 | 13 | 460,08 | 403,20 | 56,88 | | | | | | | | |
| 62 | 14 | 451,30 | 401,30 | 50,00 | | | | | | | | |
| 63 | 15 | 464,95 | 403,30 | 61,65 | | | | | | | | |
| 64 | 16 | 453,40 | 403,40 | 50,00 | | | | | | | | |
| 65 | 17 | 457,85 | 398,20 | 59,65 | | | | | | | | |
| 66 | 18 | 456,98 | 395,10 | 61,88 | | | | | | | | |
| 67 | 19 | 462,03 | 393,40 | 68,63 | | | | | | | | |
| 68 | 20 | 451,50 | 393,50 | 58,00 | | | | | | | | |
| 69 | 21 | 443,60 | 393,60 | 50,00 | | | | | | | | |
| 70 | 22 | 457,23 | 393,70 | 63,53 | | | | | | | | |
| 71 | 23 | 442,20 | 392,20 | 50,00 | | | | | | | | |
| 72 | 24 | 454,07 | 393,30 | 60,77 | | | | | | | | |
| 73 | 25 | 443,90 | 393,90 | 50,00 | | | | | | | | |
| 74 | 26 | 446,31 | 391,40 | 54,91 | | | | | | | | |
| 75 | 27 | 439,50 | 399,50 | 50,00 | | | | | | | | |
| 76 | 28 | 447,52 | 393,00 | 54,52 | | | | | | | | |
| 77 | 29 | 441,30 | 391,30 | 50,00 | | | | | | | | |
| 78 | 30 | 452,41 | 393,60 | 58,81 | | | | | | | | |
| 79 | 31 | 447,84 | 391,90 | 55,94 | | | | | | | | |
| 80 | 32 | 439,30 | 399,30 | 50,00 | | | | | | | | |
| 81 | 33 | 444,75 | 390,60 | 54,15 | | | | | | | | |
| 82 | 34 | 441,44 | 391,00 | 50,44 | | | | | | | | |
| 83 | 35 | 442,41 | 399,50 | 52,91 | | | | | | | | |
| 84 | 36 | 438,64 | 397,90 | 50,74 | | | | | | | | |
| 85 | 37 | 436,40 | 396,40 | 50,00 | | | | | | | | |
| 86 | 38 | 446,66 | 391,50 | 55,16 | | | | | | | | |
| 87 | 39 | 439,50 | 399,50 | 50,00 | | | | | | | | |

| | |
|--|---------------------|
| | Diâmetros Classe 15 |
| | Diâmetros Classe 20 |
| | Diâmetros Classe 25 |

4.1.2.3.2. Etapa 2

De posse do resultado da primeira etapa, que fornece os diâmetros ótimos da rede, tem-se como no cenário anterior, a próxima etapa é desdobrar os diâmetros ótimos em dois comerciais e considerar como Variáveis de decisão as vazões, os dois comprimentos para cada diâmetro comercial nos sub-trechos e a altura manométrica de bombeamento.

Na primeira fase da etapa 2 a *Função Objetivo* que corresponde ao custo atualizado do sistema de abastecimento (equação 3.9) é:

$$C(D_i, Q_i, H) = [(200 P(D_{1,1}) + 50 P(D_{1,2})) + (210 P(D_{2,1}) + 100 P(D_{2,2})) + \dots + (55 P(D_{39,1}) + 55 P(D_{39,2})) + (5 P(D_{40,1}) + 5 P(D_{40,2}))] + (9.611,40 \times 30,6 \times H)$$

As *Restrições* desta etapa são:

- Pressões mínimas nos nós: esta restrição impõe que em todos os nós da rede a pressão disponível seja igual ou superior a 50 mca (E139 a E177);
- Comprimentos dos trechos: a soma dos sub-trechos de um trecho deve ser igual ao comprimento do trecho considerado;
- Não negatividade dos comprimentos: todos os comprimentos devem ser maiores ou iguais a zero;

Após a definição da *Função Objetivo*, das *Variáveis* e das *Restrições* se inicia a etapa de edição da planilha na etapa 2, conforme feito no cenário anterior e utiliza-se a ferramenta Solver.

Após se inserir na planilha todos os dados da etapa 2 ativa-se a ferramenta Solver para o início da simulação, tendo como células selecionadas as demonstradas na figura 4.12.

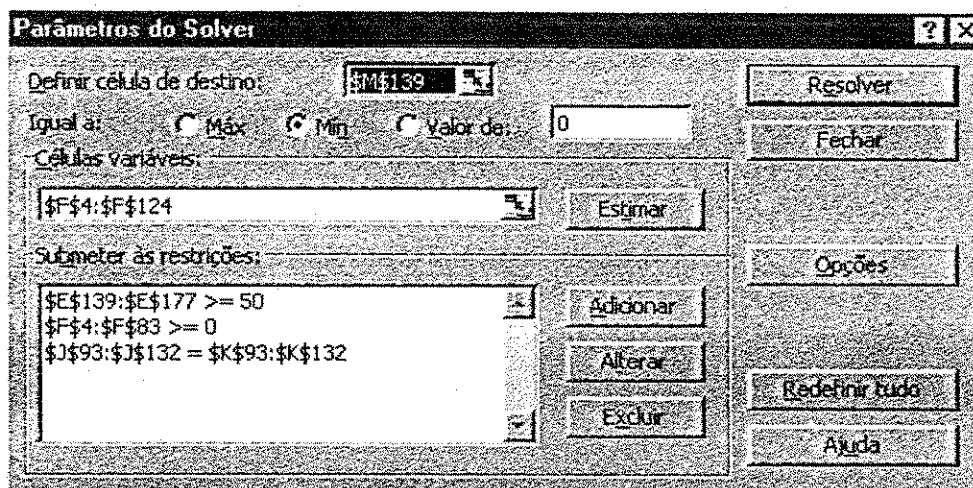


Figura 4.12: Caixa de Parâmetros do Solver simulando o redimensionamento da rede na etapa 2 (GOMES).

O resultado final da simulação com os dados fornecidos por GOMES (1997) estão na tabela 4.18. Essa tabela informa a nova estrutura da rede de distribuição do Perímetro Irrigado Senador Nilo Coelho após se simular o seu redimensionamento com novas vazões e pressões disponíveis.

Tabela 4.18: Resultado obtido através do Método PNL2000 com dados de GOMES (1997) na Etapa 2:

| A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M |
|----------------------------|-------------|---------------|-------|----------|--------------|------------|---------------|------------|--------------|---------------------|---------------|--------------|
| Primeira Parte da Florilha | | | | | | | | | | | | |
| Techo | Vazão (l/s) | Diâmetro (mm) | Coef. | Comp (m) | Perdas (mca) | Perda -15% | Perdas Totais | Vel. (m/s) | Vazão (m³/h) | Preço Unit. (C\$/m) | C Total (C\$) | |
| 4 | 1 | 16.33 | 125 | 140 | 0 | 0.00 | 0.00 | 1.64 | 1.33 | 58.8 | 1.480.50 | - |
| 5 | | 16.33 | 150 | 140 | 250 | 1.43 | 1.64 | 0.92 | 0.92 | 58.8 | 1.816.50 | 454.125.00 |
| 6 | 2 | 32.67 | 150 | 140 | 140 | 2.88 | 3.32 | 4.31 | 1.85 | 117.6 | 1.816.50 | 254.310.00 |
| 7 | | 32.67 | 200 | 140 | 170 | 0.86 | 0.99 | 1.04 | 1.04 | 117.6 | 2.743.50 | 456.395.00 |
| 8 | 3 | 49.00 | 150 | 140 | 0 | 0.00 | 0.00 | 1.98 | 2.77 | 176.4 | 1.816.50 | - |
| 9 | | 49.00 | 200 | 140 | 180 | 1.72 | 1.99 | 1.56 | 1.56 | 176.4 | 2.743.50 | 438.960.00 |
| 10 | 4 | 16.33 | 100 | 140 | 70 | 2.88 | 3.31 | 3.31 | 2.08 | 58.8 | 1.147.50 | 80.325.00 |
| 11 | | 16.33 | 125 | 140 | 0 | 0.00 | 0.00 | 1.33 | 1.33 | 58.8 | 1.480.50 | - |
| 12 | 5 | 65.33 | 200 | 140 | 15 | 0.27 | 0.32 | 1.77 | 2.08 | 235.2 | 2.385.00 | 35.775.00 |
| 13 | | 65.33 | 250 | 140 | 205 | 1.27 | 1.46 | 1.33 | 1.33 | 235.2 | 3.193.50 | 654.667.50 |
| 14 | 6 | 44.92 | 150 | 140 | 110 | 4.09 | 4.70 | 6.80 | 2.54 | 161.7 | 1.816.50 | 199.815.00 |
| 15 | | 44.92 | 200 | 140 | 200 | 1.63 | 2.10 | 1.43 | 1.43 | 161.7 | 2.743.50 | 548.700.00 |
| 16 | 7 | 142.92 | 250 | 140 | 0 | 0.00 | 0.00 | 3.74 | 2.91 | 514.5 | 3.193.50 | - |
| 17 | | 142.92 | 300 | 140 | 300 | 3.26 | 3.74 | 2.02 | 2.02 | 514.5 | 4.114.50 | 1.234.350.00 |
| 18 | 8 | 16.33 | 100 | 140 | 0 | 0.00 | 0.00 | 5.10 | 2.08 | 58.8 | 1.147.50 | - |
| 19 | | 16.33 | 125 | 140 | 320 | 4.44 | 5.10 | 1.33 | 1.33 | 58.8 | 1.480.50 | 473.760.00 |
| 20 | 9 | 32.67 | 125 | 140 | 0 | 0.00 | 0.00 | 5.21 | 2.95 | 117.6 | 1.287.00 | - |
| 21 | | 32.67 | 150 | 140 | 220 | 4.53 | 5.21 | 1.85 | 1.85 | 117.6 | 1.579.50 | 347.490.00 |
| 22 | 10 | 166.61 | 300 | 140 | 116 | 1.67 | 1.92 | 2.65 | 2.36 | 599.8 | 3.282.00 | 380.712.00 |
| 23 | | 166.61 | 350 | 140 | 94 | 0.64 | 0.73 | 1.73 | 1.73 | 599.8 | 4.251.50 | 400.581.00 |
| 24 | 11 | 24.50 | 125 | 140 | 80 | 2.35 | 2.70 | 6.04 | 2.00 | 88.2 | 1.287.00 | 102.960.00 |
| 25 | | 24.50 | 150 | 140 | 240 | 2.90 | 3.34 | 1.39 | 1.39 | 88.2 | 1.579.50 | 379.060.00 |
| 26 | 12 | 65.33 | 150 | 140 | 0 | 0.00 | 0.00 | 4.63 | 3.70 | 235.2 | 1.579.50 | - |
| 27 | | 65.33 | 200 | 140 | 220 | 4.03 | 4.63 | 2.08 | 2.08 | 235.2 | 2.385.00 | 524.700.00 |
| 28 | 13 | 16.33 | 100 | 140 | 0 | 0.00 | 0.00 | 5.10 | 2.08 | 58.8 | 1.147.50 | - |
| 29 | | 16.33 | 125 | 140 | 320 | 4.44 | 5.10 | 1.33 | 1.33 | 58.8 | 1.480.50 | 473.760.00 |
| 30 | 14 | 32.67 | 125 | 140 | 0 | 0.00 | 0.00 | 7.34 | 2.66 | 117.6 | 1.287.00 | - |
| 31 | | 32.67 | 150 | 140 | 310 | 6.38 | 7.34 | 1.85 | 1.85 | 117.6 | 1.579.50 | 489.645.00 |
| 32 | 15 | 16.33 | 100 | 140 | 105 | 4.31 | 4.96 | 8.07 | 2.08 | 58.8 | 936.00 | 98.290.00 |
| 33 | | 16.33 | 125 | 140 | 195 | 2.70 | 3.11 | 1.33 | 1.33 | 58.8 | 1.287.00 | 250.965.00 |
| 34 | 16 | 147.00 | 250 | 140 | 0 | 0.00 | 0.00 | 0.53 | 3.00 | 529.2 | 2.580.00 | - |
| 35 | | 147.00 | 300 | 140 | 40 | 0.46 | 0.53 | 2.08 | 2.08 | 529.2 | 3.282.00 | 131.280.00 |
| 36 | 17 | 284.19 | 400 | 140 | 230 | 2.19 | 2.52 | 2.52 | 2.26 | 1023.1 | 5.497.50 | 1.254.425.00 |
| 37 | | 284.19 | 450 | 140 | 0 | 0.00 | 0.00 | 1.79 | 1.79 | 1023.1 | 7.152.00 | - |
| 38 | 18 | 32.67 | 125 | 140 | 160 | 6.01 | 9.21 | 12.76 | 2.66 | 117.6 | 1.287.00 | 205.920.00 |
| 39 | | 32.67 | 150 | 140 | 150 | 3.09 | 3.55 | 1.85 | 1.85 | 117.6 | 1.579.50 | 236.925.00 |
| 40 | 19 | 342.47 | 400 | 140 | 440 | 5.92 | 6.81 | 6.81 | 2.73 | 1232.9 | 5.497.50 | 2.418.900.00 |
| 41 | | 342.47 | 450 | 140 | 0 | 0.00 | 0.00 | 2.15 | 2.15 | 1232.9 | 7.152.00 | - |
| 42 | 20 | 32.67 | 125 | 140 | 0 | 0.00 | 0.00 | 7.34 | 2.66 | 117.6 | 1.287.00 | - |
| 43 | | 32.67 | 150 | 140 | 310 | 6.38 | 7.34 | 1.85 | 1.85 | 117.6 | 1.579.50 | 489.645.00 |
| 44 | 21 | 68.06 | 150 | 140 | 58 | 4.65 | 5.35 | 10.64 | 3.85 | 245 | 1.579.50 | 91.611.00 |
| 45 | | 68.06 | 200 | 140 | 242 | 4.78 | 5.50 | 2.17 | 2.17 | 245 | 2.385.00 | 577.170.00 |
| 46 | 22 | 423.03 | 450 | 140 | 530 | 5.95 | 6.84 | 6.84 | 2.66 | 1522.9 | 7.152.00 | 3.790.560.00 |
| 47 | | 423.03 | 500 | 140 | 0 | 0.00 | 0.00 | 2.16 | 2.16 | 1522.9 | 8.386.50 | - |
| 48 | 23 | 16.33 | 100 | 140 | 230 | 9.45 | 10.67 | 10.67 | 2.08 | 58.8 | 936.00 | 215.280.00 |
| 49 | | 16.33 | 125 | 140 | 0 | 0.00 | 0.00 | 1.33 | 1.33 | 58.8 | 1.287.00 | - |
| 50 | 24 | 443.17 | 450 | 140 | 450 | 5.64 | 6.49 | 6.49 | 2.83 | 1617 | 7.152.00 | 3.218.400.00 |
| 51 | | 443.17 | 500 | 140 | 0 | 0.00 | 0.00 | 2.29 | 2.29 | 1617 | 8.386.50 | - |
| 52 | 25 | 16.33 | 125 | 140 | 0 | 0.00 | 0.00 | 0.92 | 1.33 | 58.8 | 1.287.00 | - |
| 53 | | 16.33 | 150 | 140 | 140 | 0.80 | 0.92 | 0.92 | 0.92 | 58.8 | 1.579.50 | 221.130.00 |
| 54 | 26 | 34.03 | 150 | 140 | 290 | 6.44 | 7.41 | 7.72 | 1.93 | 122.5 | 1.579.50 | 458.055.00 |
| 55 | | 34.03 | 200 | 140 | 50 | 0.27 | 0.31 | 1.08 | 1.08 | 122.5 | 2.385.00 | 119.250.00 |
| 56 | 27 | 39.47 | 150 | 140 | 320 | 9.36 | 10.76 | 10.76 | 2.23 | 142.1 | 1.579.50 | 505.440.00 |
| 57 | | 39.47 | 200 | 140 | 0 | 0.00 | 0.00 | 1.25 | 1.25 | 142.1 | 2.385.00 | - |
| 58 | 28 | 106.17 | 250 | 140 | 400 | 6.07 | 6.98 | 7.27 | 2.16 | 382.2 | 2.580.00 | 1.032.000.00 |
| 59 | | 106.17 | 300 | 140 | 40 | 0.25 | 0.29 | 1.50 | 1.50 | 382.2 | 3.282.00 | 131.280.00 |
| 60 | 29 | 39.47 | 125 | 140 | 180 | 12.79 | 14.71 | 19.08 | 3.22 | 142.1 | 1.287.00 | 231.660.00 |
| 61 | | 39.47 | 150 | 140 | 130 | 3.80 | 4.37 | 2.23 | 2.23 | 142.1 | 1.579.50 | 205.335.00 |
| 62 | 30 | 144.63 | 250 | 140 | 0 | 0.00 | 0.00 | 3.96 | 2.95 | 521.4 | 2.580.00 | - |
| 63 | | 144.63 | 300 | 140 | 310 | 3.44 | 3.96 | 2.05 | 2.05 | 521.4 | 3.282.00 | 1.017.420.00 |
| 64 | 31 | 21.78 | 125 | 140 | 0 | 0.00 | 0.00 | 3.35 | 1.78 | 78.4 | 1.287.00 | - |
| 65 | | 21.78 | 150 | 140 | 300 | 2.92 | 3.35 | 1.23 | 1.23 | 78.4 | 1.579.50 | 473.850.00 |
| 66 | 32 | 51.72 | 150 | 140 | 32 | 1.54 | 1.77 | 5.16 | 2.93 | 186.2 | 1.579.50 | 50.544.00 |
| 67 | | 51.72 | 200 | 140 | 248 | 2.95 | 3.39 | 1.65 | 1.65 | 186.2 | 2.385.00 | 591.480.00 |
| 68 | 33 | 68.06 | 200 | 140 | 310 | 6.12 | 7.04 | 7.04 | 2.17 | 245 | 2.385.00 | 739.350.00 |
| 69 | | 68.06 | 250 | 140 | 0 | 0.00 | 0.00 | 1.39 | 1.39 | 245 | 3.193.50 | - |
| 70 | 34 | 87.11 | 200 | 140 | 210 | 6.55 | 7.53 | 7.53 | 2.77 | 313.6 | 2.385.00 | 500.650.00 |
| 71 | | 87.11 | 250 | 140 | 0 | 0.00 | 0.00 | 1.78 | 1.78 | 313.6 | 3.193.50 | - |

Continuação da tabela 4.18:

| | | | | | | | | | | | | | |
|-----|---------------------|--------|--------|-----|-----|--------------------|-------|-------|------|--------|----------|------------|--|
| 72 | 35 | 106,17 | 200 | 140 | 0 | 0,00 | 0,00 | 5,94 | 3,38 | 362,2 | 1,945,50 | - | |
| 73 | | 106,17 | 250 | 140 | 340 | 5,16 | 5,94 | | 2,16 | 362,2 | 2,580,00 | 877,200,00 | |
| 74 | 36 | 20,42 | 190 | 140 | 203 | 12,61 | 14,50 | 17,08 | 2,60 | 73,5 | 936,00 | 190,008,00 | |
| 75 | | 20,42 | 125 | 140 | 107 | 2,24 | 2,58 | | 1,66 | 73,5 | 1,287,00 | 137,709,00 | |
| 76 | 37 | 36,75 | 125 | 140 | 0 | 0,00 | 0,00 | 4,12 | 3,00 | 132,3 | 1,287,00 | - | |
| 77 | | 36,75 | 190 | 140 | 140 | 3,59 | 4,12 | | 2,08 | 132,3 | 1,579,50 | 221,130,00 | |
| 78 | 38 | 142,92 | 250 | 140 | 70 | 1,84 | 2,12 | 2,12 | 2,91 | 514,5 | 2,580,00 | 180,600,00 | |
| 79 | | 142,92 | 300 | 140 | 0 | 0,00 | 0,00 | | 2,02 | 514,5 | 3,282,00 | - | |
| 80 | 39 | 253,17 | 350 | 140 | 110 | 1,62 | 1,87 | 1,87 | 2,63 | 911,4 | 4,261,50 | 468,765,00 | |
| 81 | | 253,17 | 400 | 140 | 0 | 0,00 | 0,00 | | 2,02 | 911,4 | 5,497,50 | - | |
| 82 | 40 | 702,33 | 450 | 140 | 0 | 0,00 | 0,00 | 0,20 | 4,42 | 2526,4 | 7,152,00 | - | |
| 83 | | 702,33 | 500 | 140 | 10 | 0,17 | 0,20 | | 3,58 | 2526,4 | 8,366,50 | 83,866,00 | |
| 84 | Altura Man | | 74,16 | | | 16,33 | | | | | | | |
| 85 | Flez. de cam. (mca) | | 475,36 | | | 32,67 | | | | | | | |
| 86 | | | | | | 49,00 | | | | | | | |
| 87 | | | | | | 16,33 | | | | | | | |
| 88 | | | | | | 66,33 | | | | | | | |
| 89 | | | | | | 44,92 | | | | | | | |
| 90 | | | | | | 142,92 | | | | | | | |
| 91 | | | | | | 16,33 | | | | | | | |
| 92 | | | | | | 32,67 | | | | | | | |
| 93 | | | | | | 166,61 | | | | | | | |
| 94 | | | | | | 24,50 | | | | | | | |
| 95 | | | | | | 66,33 | | | | | | | |
| 96 | | | | | | 16,33 | | | | | | | |
| 97 | | | | | | 32,67 | | | | | | | |
| 98 | | | | | | 16,33 | | | | | | | |
| 99 | | | | | | 147,00 | | | | | | | |
| 100 | | | | | | 284,19 | | | | | | | |
| 101 | | | | | | 32,67 | | | | | | | |
| 102 | | | | | | 342,47 | | | | | | | |
| 103 | | | | | | 32,67 | | | | | | | |
| 104 | | | | | | 68,06 | | | | | | | |
| 105 | | | | | | 423,03 | | | | | | | |
| 106 | | | | | | 16,33 | | | | | | | |
| 107 | | | | | | 449,17 | | | | | | | |
| 108 | | | | | | 16,33 | | | | | | | |
| 109 | | | | | | 34,03 | | | | | | | |
| 110 | | | | | | 39,47 | | | | | | | |
| 111 | | | | | | 106,17 | | | | | | | |
| 112 | | | | | | 39,47 | | | | | | | |
| 113 | | | | | | 144,63 | | | | | | | |
| 114 | | | | | | 21,78 | | | | | | | |
| 115 | | | | | | 51,72 | | | | | | | |
| 116 | | | | | | 68,06 | | | | | | | |
| 117 | | | | | | 87,11 | | | | | | | |
| 118 | | | | | | 106,17 | | | | | | | |
| 119 | | | | | | 20,42 | | | | | | | |
| 120 | | | | | | 36,75 | | | | | | | |
| 121 | | | | | | 142,92 | | | | | | | |
| 122 | | | | | | 253,17 | | | | | | | |
| 123 | | | | | | 702,33 | | | | | | | |
| 124 | | | | | | Altura manométrica | 74,16 | | | | | | |
| 125 | | | | | | | | | | | | | |
| 126 | | | | | | | | | | | | | |
| 127 | | | | | | | | | | | | | |
| 128 | | | | | | | | | | | | | |
| 129 | | | | | | | | | | | | | |
| 130 | | | | | | | | | | | | | |
| 131 | | | | | | | | | | | | | |
| 132 | | | | | | | | | | | | | |
| 133 | | | | | | | | | | | | | |
| 134 | | | | | | | | | | | | | |

Custo da Rede (Cr\$) 29.366.392,50

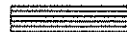
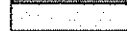


| Trecho | L2 (m) | L1 (m) | L1-L2 (m) |
|--------|--------|--------|-----------|
| 1 | 250 | 250 | 0 |
| 2 | 310 | 310 | 0 |
| 3 | 160 | 160 | 0 |
| 4 | 70 | 70 | 0 |
| 5 | 220 | 220 | 0 |
| 6 | 310 | 310 | 0 |
| 7 | 300 | 300 | 0 |
| 8 | 320 | 320 | 0 |
| 9 | 220 | 220 | 0 |
| 10 | 210 | 210 | 0 |
| 11 | 320 | 320 | 0 |
| 12 | 220 | 220 | 0 |
| 13 | 320 | 320 | 0 |
| 14 | 310 | 310 | 0 |
| 15 | 300 | 300 | 0 |
| 16 | 40 | 40 | 0 |
| 17 | 220 | 220 | 0 |
| 18 | 310 | 310 | 0 |
| 19 | 440 | 440 | 0 |
| 20 | 310 | 310 | 0 |
| 21 | 300 | 300 | 0 |
| 22 | 530 | 530 | 0 |
| 23 | 230 | 230 | 0 |
| 24 | 450 | 450 | 0 |
| 25 | 140 | 140 | 0 |
| 26 | 340 | 340 | 0 |
| 27 | 320 | 320 | 0 |
| 28 | 440 | 440 | 0 |
| 29 | 310 | 310 | 0 |
| 30 | 310 | 310 | 0 |
| 31 | 300 | 300 | 0 |
| 32 | 280 | 280 | 0 |
| 33 | 310 | 310 | 0 |
| 34 | 210 | 210 | 0 |
| 35 | 340 | 340 | 0 |
| 36 | 310 | 310 | 0 |
| 37 | 140 | 140 | 0 |
| 38 | 70 | 70 | 0 |
| 39 | 110 | 110 | 0 |
| 40 | 10 | 10 | 0 |

Continuação da tabela 4.18:

136

136 Segunda Parte da Flanilha

| 137 | Nº | Alt. Piez (m) | Cota (m) | P.Disp. (mca) | Nº de horas Anuais | Cob Kw (FS) | Rend do bomba (%) | Pot. Requer. (Kw) | C. energia (C\$) | Coef. Atual. (Fa) | C. energia atual (C\$) | Ctotal (C\$) |
|-----|----|------------------|-------------|------------------|-----------------------|----------------|----------------------|----------------------|---------------------|----------------------|---------------------------|-----------------|
| 138 | | | | | | | | | | | | |
| 139 | 1 | 475,16 | 401,20 | 73,96 | 3600 | 0,310 | 80 | 638,66 | 712.741,89 | 30,6 | 21.809.901,73 | 51.176.256,23 |
| 140 | 2 | 473,29 | 402,40 | 70,89 | | | | | | | | |
| 141 | 3 | 471,17 | 401,30 | 69,87 | | | | | | | | |
| 142 | 4 | 467,05 | 400,50 | 66,55 | | | | | | | | |
| 143 | 5 | 449,97 | 399,90 | 50,07 | | | | | | | | |
| 144 | 6 | 465,24 | 399,00 | 66,24 | | | | | | | | |
| 145 | 7 | 457,70 | 397,70 | 60,00 | | | | | | | | |
| 146 | 8 | 450,66 | 394,90 | 55,76 | | | | | | | | |
| 147 | 9 | 445,50 | 392,10 | 53,40 | | | | | | | | |
| 148 | 10 | 442,15 | 392,10 | 50,05 | | | | | | | | |
| 149 | 11 | 469,33 | 402,40 | 66,93 | | | | | | | | |
| 150 | 12 | 450,26 | 400,20 | 50,08 | | | | | | | | |
| 151 | 13 | 462,05 | 403,20 | 58,85 | | | | | | | | |
| 152 | 14 | 451,31 | 401,30 | 50,01 | | | | | | | | |
| 153 | 15 | 454,34 | 403,30 | 51,04 | | | | | | | | |
| 154 | 16 | 453,42 | 403,40 | 50,02 | | | | | | | | |
| 155 | 17 | 466,67 | 396,20 | 72,47 | | | | | | | | |
| 156 | 18 | 457,80 | 395,10 | 62,70 | | | | | | | | |
| 157 | 19 | 461,83 | 393,40 | 68,43 | | | | | | | | |
| 158 | 20 | 450,99 | 393,50 | 57,49 | | | | | | | | |
| 159 | 21 | 443,65 | 393,60 | 50,05 | | | | | | | | |
| 160 | 22 | 455,02 | 393,70 | 61,32 | | | | | | | | |
| 161 | 23 | 442,26 | 392,20 | 50,06 | | | | | | | | |
| 162 | 24 | 451,97 | 393,30 | 58,67 | | | | | | | | |
| 163 | 25 | 443,90 | 393,90 | 50,00 | | | | | | | | |
| 164 | 26 | 444,63 | 391,40 | 53,23 | | | | | | | | |
| 165 | 27 | 439,53 | 399,50 | 50,03 | | | | | | | | |
| 166 | 28 | 447,34 | 393,00 | 54,34 | | | | | | | | |
| 167 | 29 | 441,30 | 391,30 | 50,00 | | | | | | | | |
| 168 | 30 | 449,84 | 393,60 | 55,24 | | | | | | | | |
| 169 | 31 | 445,10 | 391,90 | 54,20 | | | | | | | | |
| 170 | 32 | 439,30 | 399,30 | 50,00 | | | | | | | | |
| 171 | 33 | 444,33 | 390,60 | 53,73 | | | | | | | | |
| 172 | 34 | 441,02 | 391,00 | 50,02 | | | | | | | | |
| 173 | 35 | 442,35 | 399,50 | 52,86 | | | | | | | | |
| 174 | 36 | 439,05 | 397,90 | 50,15 | | | | | | | | |
| 175 | 37 | 436,41 | 396,40 | 50,01 | | | | | | | | |
| 176 | 38 | 444,63 | 391,50 | 53,13 | | | | | | | | |
| 177 | 39 | 439,53 | 399,50 | 50,03 | | | | | | | | |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
|  | Custo aser Minimizado |
|  | Dímetros Classe 15 |
|  | Dímetros Classe 20 |
|  | Dímetros Classe 25 |

A simulação referente ao *cenário 2* obteve resultados satisfatórios comparados aos fornecidos por GOMES*, tendo diferenciação no custo energético, devido a altura manométrica encontrada por cada método. A tabela 4.19 mostra os valores encontrados através do método PNL2000 (*cenário 2*) comparados a GOMES*.

Tabela 4.19: Comparação entre GOMES* x CENÁRIO 2.

| | Custo Energético (Cr\$) | Custo da Rede (Cr\$) | Custo Total da Obra (Cr\$) |
|-----------|-------------------------|----------------------|----------------------------|
| GOMES* | 17.959.116,00 | 34.894.396,00 | 52.853.512,00 |
| CENÁRIO 2 | 21.809.901,73 | 29.366.392,50 | 51.176.294,23 |

De acordo com os resultados encontrados no *cenário 2* através do método PNL2000, o valor encontrado referente ao custo energético é 21,44% maior do que o encontrado pelo método Granados (GOMES*), devido a altura manométrica adotada por cada método. O PNL2000 adotou uma altura manométrica igual a 74,16 m.c.a, enquanto o método Granados adotou uma altura manométrica de 62,72 m.c.a, sendo a diferença, de 11,44 m.c.a, a causa de tamanha desconformidade no resultado. No entanto, esse aumento no valor energético é compensado com o custo da rede, que através de simulação com método PNL2000 obtém um valor 18,82% menor que o valor obtido através do método Granados e o custo total da obra também é menor 3,27%.

Com outro cenário pode-se simular ainda a imposição de limite para a altura manométrica, para isso, se adiciona uma nova restrição (*cenário 3*) onde a altura manométrica seja igual ou inferior a 67 m.c.a. A tabela 4.20 apresenta os valores obtidos no *cenário 3* com uma altura manométrica igual a 66,12 m.c.a.

Tabela 4.20: Comparação entre GOMES* x CENÁRIO 3.

| | Custo Energético (Cr\$) | Custo da Rede (Cr\$) | Custo Total da Obra (Cr\$) |
|-----------|-------------------------|----------------------|----------------------------|
| GOMES* | 17.959.116,00 | 34.894.396,00 | 52.853.512,00 |
| CENÁRIO 3 | 19.447.520,59 | 32.245.065,00 | 51.692.585,59 |

Devido a menor altura manométrica, o custo da rede elevou-se comparado ao *cenário 2*, porém permaneceu 8,21% menor que o valor em GOMES*. O custo energético encontrado com o método PNL2000 é 8,28% maior do que com o método Granados. O custo total, o entanto, continua menor com o método PNL2000, cerca de 2,24%.

Nas simulações onde foi utilizada a opção do redimensionamento da rede de distribuição, o método PNL2000 mostrou resultados eficazes ao ser comparado a uma metodologia já conhecida, o método Granados. Portanto, tem-se que as simulações realizadas pelo PNL2000 no *cenário 1* utilizou-se dos dados iniciais da ENCO-TAJAL da mesma forma que a simulação denominada de GOMES (método Granados). De acordo com os resultados encontrados pelo PNL2000, na simulação da rede ramificada, os resultados obtidos foram positivos, tendo ao final no *cenário 1* um valor monetário inferior

ao calculado pela ENCO-TAJAL e GOMES conforme demonstrado na tabela 4.15 do capítulo anterior como demonstrado.

A simulação GOMES* (método Granados) e o *cenário 2* trabalharam com os dados obtidos através dos novos cálculos que indicavam a real situação e necessidade da rede, tendo um valor significativamente superior ao da projetada pela ENCO-TAJAL. Ambas as simulações, Granados e PNL2000, obtiveram resultados superiores aos calculados pela ENCO-TAJAL devido a mesma ter sido sub-dimensionada.

O *cenário 2* obteve um resultado inferior ao custo total obtido por GOMES*, indicando também nessa simulação a eficácia do método estudado. Com a utilização dos mesmos dados, alterando-se apenas a altura manométrica de bombeamento, com *cenário 3* obteve também resultados melhores que o método Granados.

4.1.2.4. Resultados através do método PNL2000 com dados de GOMES* para cenários diversos

Outros cenários podem ser simulados, fornecendo um conjunto maior de resultados para que o usuário ou empreendedor tenha maior certeza por qual alternativa deve ser adotada.

O *cenário 4* utiliza os dados iniciais fornecidos pela ENCO-TAJAL, com vazão parcelar de 35 m³/h, a vazão fornecida pela estação de bombeamento de 1.590 m³/h, vazão que atende suficientemente todas as parcelas, e a pressão disponível na entrada da parcela é de 40 m.c.a, o número de horas de bombeamento é reduzido de 5000 horas para 3600 horas. Como resultado obtido nesse cenário tem-se:

- O custo energético é de Cr\$ 10.329.779,32, reduzindo-se em 32,32% o valor comparado a simulação com 5000 horas de bombeamento.
- O custo da rede não se altera, pois apenas a altura manométrica é variável de decisão.
- A potência requerida pelo conjunto motor-bomba eleva-se de 288,18 Kw para 302,49 Kw.

No *cenário 5* foi simulado o fornecimento de água para as parcelas em dois turnos, irrigando metade das parcelas em cada um. No primeiro turno o fornecimento seria para as parcelas a jusante do trecho 24 com vazão de 1.040 m³/h. No segundo turno seria fornecida

a vazão às parcelas a jusante do trecho 39 com vazão de 550 m³/h. O número de horas bombeadas seria de 2400 horas (10 horas/dia) para cada turno.

Tabela 4.21: Resultado da simulação do *cenário 5* através do método PNL2000.

| | Vazão (m ³ /h) | Potencia Requerida | Custo Energético (Cr\$) |
|---------|---------------------------|--------------------|-------------------------|
| Turno 1 | 1.040 | 194,10 | 4.418.861,81 |
| Turno 2 | 550 | 104,50 | 2.379.060,50 |
| | | Custo Total (Cr\$) | 6.797.922,31 |

Desta forma, o custo energético seria notadamente menor. No entanto, se fosse necessário um número maior de horas ou a alteração de algum trecho da rede, essa alternativa não poderia ser utilizada. Esse tipo de simulação seria muito vantajosa se não houver a necessidade de modificações estruturais na rede, pois fornece outras alternativas às freqüentemente utilizadas.

Houve ainda em algumas entradas de parcelas a pressão excessiva, chegando a valores acima de 70 m.c.a..

Os outros cenários simulados, *cenários 4 e 5*, obtiveram resultados positivos, fornecendo alternativas para a resolução de um eventual problema desse tipo na rede.

O método PNL2000 pode ainda fornecer inúmeros outros cenários dependendo da necessidade da rede. Os tipos de simulações realizadas em redes de distribuição podem ser inúmeras, pois o método PNL2000 através da planilha do Excel fornecem essa possibilidade.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O Método PNL2000 como uma ferramenta de Simulação de Cenários de Operação de Sistemas de Abastecimento de Água através de adaptações nas equações e parâmetros utilizadas pelo método de Dimensionamento Econômico de Redes Malhadas, de acordo com o objetivo inicial dessa dissertação, mostrou-se bastante eficaz após a obtenção dos resultados simulados nos cenários dos exemplos de redes malhadas e ramificadas.

A possibilidade de simulação de cenários envolvendo a variável econômica, que pode estar relacionada tanto com o redimensionamento da rede como apenas com o custo energético de uma estação de bombeamento ou ainda apenas na modificação de parte das tubulações de uma rede. O redimensionamento da rede tem como componentes o custo total da rede (custo da tubulação e custo energético), sendo utilizado na simulação como opção para verificar se a rede estudada pode ter sido super ou sub-dimensionada. Já a variável econômica envolvida no custo energético possibilita ao operador, simular de maneira eficaz, se a rede necessita de alteração na altura manométrica de bombeamento ou mesmo a aumento ou redução na potência requerida pelo conjunto motor-bomba.

Em todos os cenários simulados no Grande Anel da Rede de Distribuição de Água da cidade de Recife-PE, pôde-se observar o comportamento da rede com todos os parâmetros (altura manométrica, vazão bombeada ou pressão disponível) utilizados nas equações. Os resultados encontrados através do PNL2000 demonstram a realidade da rede, tendo as pressões e a distribuição das vazões bem representadas no método, além do restante dos parâmetros, como equação da continuidade, equação da conservação de energia nos anéis, altura piezométrica e perda de carga. Tem-se ainda que as situações impostas ao método podem ser inúmeras, ficando a cargo do usuário a definição da Função

Objetivo, de Variáveis e Restrições. Portanto, tem-se através do Método PNL2000 uma ferramenta com capacidade de simular o comportamento da rede o mais próximo da realidade.

Quanto às simulações realizadas no Setor 11 do Perímetro Irrigado Senador Nilo Coelho, o PNL2000 mostrou também sua eficácia na simulação em redes ramificadas através de cenários e das comparações feitas aos dados originais de projeto da rede executados pela ENCO-TAJAL e os resultados fornecidos através do método Granados para um mesmo conjunto de dados.

Tem-se então como conclusões obtidas ao final desse trabalho que o Método PNL2000 mostra-se eficaz em simulações de cenários em redes ramificadas e malhadas, podendo ter variação na função objetivo, nas variáveis de decisão e nas restrições adotadas, dando ao método uma robustez para trabalhar com diferentes tipos de situações do dia a dia em uma mesma rede, fornecendo diferentes resultados e alternativas para o usuário ou operador. Outro fator importante e que atua de forma significativa é a interface do método com o usuário, que através da planilha eletrônica Excel, fornece ferramentas de fácil acesso e domínio por parte do usuário.

Como recomendação desse trabalho de dissertação pode-se ainda utilizar o Método PNL2000 em simulação de redes malhadas e ramificadas de maior porte e com um conjunto de restrições diferentes das já utilizadas, para desta forma verificar-se a aplicabilidade do método em situações com maior exigência do Solver, sendo que para isto, existe a necessidade da potencialização do Solver através de updates disponíveis no mercado.

Para a maior eficiência do método seria necessária a inserção de um mecanismo que considere como variáveis de decisão a classe a que pertencem as tubulações, com a adição de seus respectivos custos econômicos. A versatilidade que a planilha Excel possui de editar operações e formulações matemáticas, proporciona ao usuário rapidez e facilidade na edição de problemas numéricos. Ainda temos que neste trabalho pôde-se comprovar que para a simulação, a grande vantagem é poder se visualizar, em uma planilha, a simulação do comportamento hidráulico de uma rede pressurizada de abastecimento, submetida a diferentes condições de projeto ou operação.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ALPEROVITS, E., SHAMIR, U. Design of Optimal Water Distribution System. Water Resources Research. Vol. 13, nº 6, p. 885 – 900. New York – NY, U. S. A., 1977.

ALZAMORA, Fernando Martínez; CERRILLO, José Luis. Modelo Matemático de una Red, *in*: Curso de Ingeniería Hidráulica Aplicada a los Sistemas de Distribución de Agua. Catedra de Mecánica de Fluidos Universidad Politécnica de Valencia, Madrid, Espanha, 1987.

AZEVEDO, Luiz Gabriel T. de; PORTO, Rubem La Laina; FILHO, Kamet Zahed. Modelos de Simulação e de Rede de Fluxo, *in*: Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos. Organizador: Rubem La Laina Porto. Editora Universidade/UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Porto Alegre – RS, 1997.

BARBOSA, Paulo Sérgio Franco. Modelos de Simulação e de Rede de Fluxo, *in*: Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos. Organizador: Rubem La Laina Porto. Editora Universidade/UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Porto Alegre – RS, 1997.

BARBOSA, P. S. F.; FRANCATO, A. L.; ALMEIDA, R. Algoritmo de Otimização para a Operação em Tempo Real de Sistemas Urbanos de Abastecimento de Água. Anais do XIX CONGRESSO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, Tomo I. Córdoba, Argentina, 2000.

BARBOSA, Juliana M. do S. Gomes. Simulação da Operação de Bombas em Sistemas de Abastecimento de Água. Dissertação em Mestrado. Universidade Federal da Paraíba. Campina Grande – PB, 2001.

BARROS, Mario Thadeu L. de. A Programação Dinâmica aplicada à Engenharia de Recursos Hídricos, *in*: Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos. Organizador: Rubem La Laina Porto. Editora Universidade/UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Porto Alegre – RS, 1997.

BELLMAN, R. E.. Dynamic Programming. New Jersey, Princeton University Press, 1957.

BHAVE, Pramod R.; SONAK, Vilas V.. A Critical Study of the Linear Programming Gradient Method for Optimal Design of Water Supply Networks. Water Resources Research. Vol. 28, nº 6, p. 1577 – 1584, New York, NY, U. S. A., 1992.

BRAGA, Benedito; BARBOSA, Paulo S. F.; NAKAYAMA, Paulo T. Sistemas de Suporte à Decisão em Recursos Hídricos. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Volume 3, nº. 3, p. 73 – 95. Porto Alegre – RS, 1998.

CARVALHO, Daniel Fonseca de. Otimização do Uso da Água no Perímetro Irrigado do Gorutuba. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa – MG, 1998.

CIRILO, José Almir. A Programação Dinâmica aplicada à Engenharia de Recursos Hídricos, *in*: Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos. Organizador: Rubem La Laina Porto. Editora Universidade/UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Porto Alegre – RS, 1997.

COMPESA. Companhia Pernambucana de Saneamento. Comunicação pessoal, 1999.

EIGER, G.; SHAMIR, U. BEM-TAL, A.. Optimal Design of Water Distribution System. Water Resources Research. AGO, Vol. 30, N. 9, p. 2937-2946, New York, NY, USA, 1994.

FAIR, Gordon M.; GEYER, John C.. Elements of Water Supply and Wast-water Disposal. 4ª Edição. John Wiley & Sons. New York – NY, U.S.A, 1964.

FORMIGA, Klebber Teodomiro Martins. Metodologia de Otimização de Redes Malhadas através da Programação Não Linear. Dissertação em Mestrado. Universidade Federal da Paraíba. Campina Grande – 1999.

FRITZCHE, Helmut. Programação Não Linear: análise e métodos. Editora Edgard Blucher, São Paulo – SP, 1979.

GESSLER, J.; WALSKY, T. M.. Technical Report EL-85-11: Water Distribution System Optimization. U. S. Army Corps Engineers, Washington, DC, USA, 1985.

GESSLER, J.. Pipe Network Optimization by Enumeration. Proc. Computer Applications Water Resources, ASCE, New York, NY, USA, 1985.

GOMES, Heber Pimentel. Desempenho Hidráulico da Irrigação do Setor 11 do Perímetro Senador Nilo Coelho: Diagnóstico e Soluções. Relatório Técnico Parcial. Campina Grande – PB, 1997.

GOMES, Heber Pimentel. Engenharia de Irrigação: Hidráulica dos Sistemas Pressurizados Aspersão e Gotejamento. 3ª Edição. Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande – PB, 1999.

GOMES, Heber Pimentel. Curso de Dimensionamento Econômico de Sistemas de Abastecimento de Água in: XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. ABES. João Pessoa – PB, 2001a.

GOMES, Heber Pimentel. Análise do Desempenho Hidro-Agrícola do Perímetro de Irrigação Nilo Coelho. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Volume 6, nº. 2, p. 119 – 127. Porto Alegre – RS, 2001b.

GRANADOS, Alfredo. Infraestructuras de Regadíos – Redes Coletivas de Riego a presión. Servicio de Publicación de E. T. S. I. de Caminos de la Universidad Politécnica de Madrid, Espanha, 1990.

HANSELMAN, Duane; LITTLEFIELD, Bruce. MATLAB, versão do estudante: guia do usuário. Trad. Hércules Pereira Neves. Makron Books. São Paulo - SP, 1997.

ILAB-TECNOLOGIA. Inteligência Artificial e Sistema Especialistas. Disponível no Site da Web: <http://www.ilab.com.br/tecnolog.htm>. Data: 01/11/2001.

LASDON, L. S.; WARREN, A. D.; RATNER, M. S.. GRG2 User's Guide. University of Texas at Austin, Austin, Texas, USA, 1984.

LEAL, Antônio Farias. Estudo Comparativo de Métodos de Otimização de Redes Malhadas Pressurizadas. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande – PB, 1995.

LEAL, Antonio Farias; GOMES, Heber Pimentel. Utilização da Metodologia GRANADOS para a Otimização de Redes Hidráulicas Malhadas. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Volume 1, p. 13 – 15. Campina Grande – PB, 1997.

LOUBSER, B.F.; GESSLER, J.. computer Aided Optimization of Water Distribution Networks. The Civil Engineering in South Africa, pp 413-422, Johannesburg, South Africa, 1990.

LOURENÇO, Carlos E. B. Algoritmos Genéticos. Disponível no Site da Web: <http://black.rc.unesp.br/ccomp/algoritmo/direito.html>. Data: 01/11/2001.

MELO, Dimitri P. de. Otimização de Redes Malhadas Abastecidas com Múltiplos Reservatórios, Bombas e Boosters através da Programação Não Linear. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Paraíba. Campina Grande – PB, 2000.

OCHI, Luiz Satoro. Algoritmos Genéticos: Origem e Evolução. Disponível no Site da Web: <http://www.sbmac.org.br/com-fig/public/bol/bol-2/artigos/satoru/satoru.html>. Data: 01/11/2001.

PORTO, Rodrigo de Melo. Hidráulica Básica. 2ª Edição. Publicado por EESC – USP, São Carlos – SP, 1999.

PRADO, Darci. Programação Linear. Arquivo PDF extraído do livro. Belo Horizonte – MG, 1999.

SILVA, Rossana Cavalcanti Araújo. Otimização de Redes Ramificadas através do método da Programação Não-Linear. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Paraíba. Campina Grande – PB, 1997.

SIMPSON, Angus R.; DANDY, Graeme C.; MURPHY, Laurence J.. Genetic Algorithms Compares to Other Techniques for Pipe Optimization. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, Vol. 120, N. 4, pp. 423-443, New York, NY, USA, 1994.

YEH, William W-G. Reservoir Management and Operations Models: A State-of-the-Art Review. Water Resources Research, Vol. 21, nº 12 (December 1985), p. 1797 – 1818. U.S.A, 1985.